

---

## Planteamiento y resumen de la tesis

En los procesos de conformado por mecanizado, las herramientas son uno de los recursos más dinámicos y difíciles de gestionar (Ref 13). Esto se debe, principalmente, a la gran diversidad de herramientas existentes, a que se requieren varias herramientas para procesar un lote, y a la pérdida progresiva de su capacidad de corte. Para garantizar que las herramientas adecuadas se encuentran disponibles, en las máquinas que las necesitan, para procesar los diferentes lotes, y en los instantes que se requieren, es necesario establecer una programación de utilización de las herramientas, así como una gestión de las tareas de más bajo nivel relacionadas con las herramientas, como preparaciones, transportes, etc. De esta forma, la producción no se detiene por escasez del recurso herramienta.

El recurso herramienta puede ser considerado en las diferentes etapas del ciclo productivo, desde el diseño hasta la propia fabricación de los productos. El planteamiento y ámbito de la tesis se ha ceñido al nivel más operativo de las herramientas en el taller, por lo que únicamente aborda la programación y la gestión de las herramientas en este nivel.

La programación y la gestión de las herramientas no se pueden realizar aisladamente, sino que deben integrarse con el resto de funciones relacionadas con la fabricación. De estas funciones, la tesis se centra en la planificación de procesos y la programación de la producción. La planificación de procesos se encarga de seleccionar las herramientas y las condiciones de trabajo adecuadas en cada operación de mecanizado. La programación de la producción asigna los trabajos a las máquinas.

El objetivo principal de esta tesis ha consistido en desarrollar una propuesta para la programación y gestión de las herramientas de mecanizado, integrada con la planificación de procesos y la programación de la producción. La utilización de la capacidad de generación de alternativas de herramientas por el planificador de procesos asistido por ordenador, permite realizar una programación de los trabajos en las máquinas, independiente del recurso herramienta. Disponiendo de estas alternativas, es posible resolver las incompatibilidades o interferencias que surgen con el uso simultáneo de las herramientas entre las distintas operaciones por la programación de los trabajos, lo que da lugar a una programación de las herramientas.

La programación de herramientas es la base que sustenta la propuesta realizada en la tesis. La selección de todas las posibles alternativas de herramientas en cada operación por el planificador de procesos provoca

---

incompatibilidades o interferencias con la programación de los trabajos, que se ha realizado sin considerar las herramientas. Las interferencias surgen con el uso simultáneo de las herramientas entre las distintas operaciones, dado que, por ejemplo, una misma herramienta no puede ser utilizada simultáneamente por varias máquinas en los mismos instantes de tiempo. La propuesta realizada en la tesis consiste en resolver estas interferencias de forma iterativa y en orden prioritario, reduciendo el número de alternativas de herramientas en las operaciones. Los objetivos planteados en la resolución de interferencias han sido la minimización de los transportes, lo que fomenta la estabilidad de las herramientas en las máquinas, y la asignación de herramientas a las operaciones en función de su necesidad de herramientas, garantizando una solución al problema. Una vez resueltas las interferencias, cada operación tiene asignadas diferentes alternativas de herramientas, sin que existan interferencias entre ellas.

La existencia de alternativas de herramientas en las operaciones mejora la gestión del recurso herramienta. Estas alternativas no sólo se utilizan para resolver las incompatibilidades entre operaciones por el recurso herramienta con la programación de los trabajos, sino que flexibilizan la gestión de herramientas en el nivel más operativo, pudiendo utilizar las alternativas para gestionar los cambios de las herramientas por desgaste de sus filos. Además, las alternativas permiten una cierta independencia con respecto a las incidencias, proporcionando opciones que permiten continuar con el mecanizado, cuando alguna herramienta no está disponible.

Los capítulos en los que se ha organizado la tesis, así como una breve descripción de sus contenidos se exponen a continuación:

- En el capítulo 1 se realiza una introducción a las herramientas de mecanizado, como recurso necesario para conformar las piezas por mecanizado. Seguidamente se presentan las herramientas y su programación y gestión dentro de un sistema productivo.
- El capítulo 2 está dedicado a la revisión bibliográfica sobre la programación y la gestión de herramientas de mecanizado. En primer lugar, se han expuesto las principales funciones o tareas que comprende la gestión de herramientas. En segundo lugar, se ha abordado el problema de programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas de forma simultánea o secuencial.
- El capítulo 3 está dedicado a la exposición del modelo funcional propuesto para la programación y la gestión de herramientas.

- 
- El capítulo 4 expone con detalle la propuesta realizada para la programación de las herramientas, así como la verificación de la viabilidad de la propuesta planteada.
  - Para finalizar, el capítulo 5 presenta las conclusiones más relevantes de la tesis y los futuros trabajos a los que puede dar lugar.

---

---

---

## Plantejament i resum de la tesi

En els processos de conformat per mecanitzat, les ferramentes són un dels recursos més dinàmics i difícils de gestionar (Ref 13). Açò es deu, principalment, a la gran diversitat de ferramentes que hi ha, al fet que es requereixen diverses ferramentes per a processar un lot, i a la pèrdua progressiva de la capacitat de tall que tenen. Per a garantir que les ferramentes adequades es troben disponibles en les màquines que les necessiten, per a processar els diferents lots, en els instants que es requereixen, és necessari establir una programació d'utilització de les ferramentes, així com una gestió de les tasques de més baix nivell relacionades amb les ferramentes, com les preparacions, els transports, etc. D'aquesta manera, la producció no s'ha d'aturar per escassetat del recurs ferramenta.

El recurs ferramenta pot ser considerat en les diferents etapes del cicle productiu, des del disseny fins a la mateixa fabricació dels productes. El plantejament i l'àmbit de la tesi s'ha cenyit al nivell més operatiu de les ferramentes en el taller, per això únicament aborda la programació i la gestió de les ferramentes en aquest nivell.

La programació i la gestió de les ferramentes no es poden realitzar aïlladament, sinó que han d'integrar-se amb la resta de funcions relacionades amb la fabricació. D'aquestes funcions, la tesi es centra en la planificació de processos i la programació de la producció. La planificació de processos s'encarrega de seleccionar les ferramentes i les condicions de treball adequades en cada operació de mecanitzat. La programació de la producció assigna els treballs a les màquines.

L'objectiu principal d'esta tesi ha consistit a desenvolupar una proposta per a la programació i gestió de les ferramentes de mecanitzat, integrada amb la planificació de processos i la programació de la producció. La utilització de la capacitat de generació d'alternatives de ferramentes pel planificador de processos assistit per ordinador, permet realitzar una programació dels treballs en les màquines, independent del recurs ferramenta. Disposant d'estes alternatives, és possible resoldre les incompatibilitats o interferències que sorgixen amb l'ús simultani de les ferramentes entre les diferents operacions per la programació dels treballs, la qual cosa dóna lloc a una programació de les ferramentes.

La programació de ferramentes és la base que sustenta la proposta realitzada en la tesi. La selecció de totes les possibles alternatives de ferramentes en cada operació pel planificador de processos provoca

---

incompatibilitats o interferències amb la programació dels treballs, que s'ha realitzat sense considerar-hi les ferramentes. Les interferències sorgixen amb l'ús simultani de les ferramentes entre les distintes operacions, atés que, per exemple, una mateixa ferramenta no pot ser utilitzada simultàniament per diverses màquines en els mateixos instants de temps. La proposta realitzada en la tesi consisteix a resoldre estes interferències de forma iterativa i en ordre prioritari, reduint el nombre d'alternatives de ferramentes en les operacions. Els objectius plantejats en la resolució d'interferències han sigut la minimització dels transports (la qual cosa fomenta l'estabilitat de les ferramentes en les màquines) i l'assignació de ferramentes a les operacions en funció de la seua necessitat de ferramentes, garantint una solució al problema. Una vegada resoltes les interferències, cada operació té assignades diferents alternatives de ferramentes, sense que hi haja interferències entre aquestes.

L'existència d'alternatives de ferramentes en les operacions millora la gestió del recurs ferramenta. Aquestes alternatives no sols s'utilitzen per a resoldre les incompatibilitats entre operacions pel recurs ferramenta amb la programació dels treballs, sinó que flexibilitzen la gestió de ferramentes en el nivell més operatiu, i es poden utilitzar les alternatives per a gestionar els canvis de les ferramentes per desgast dels seus elements de tall. A més, les alternatives permeten al gestor una certa independència respecte a les incidències, proporcionant-li opcions que permeten continuar amb el mecanitzat, quan alguna ferramenta no està disponible.

Els capítols en què s'ha organitzat la tesi, així com una breu descripció dels continguts s'exposen a continuació:

- En el capítol 1 es realitza una introducció a les ferramentes de mecanitzat, com a recurs necessari per a conformar les peces per mecanitzat. Seguidament, es presenten les ferramentes i la seua programació i gestió dins d'un sistema productiu.
- El capítol 2 està dedicat a la revisió bibliogràfica sobre la programació i la gestió de ferramentes de mecanitzat. En primer lloc, s'han exposat les principals funcions o tasques que comprén la gestió de ferramentes. En segon lloc, s'ha abordat el problema de programació dels treballs i les ferramentes en les màquines de forma simultània o seqüencial.
- El capítol 3 està dedicat a l'exposició del model funcional proposat per a la programació i la gestió de ferramentes.
- El capítol 4 exposa amb detall la proposta realitzada per a la programació de les ferramentes, així com la verificació de la viabilitat de la proposta plantejada.

- 
- Per a finalitzar, el capítol 5 presenta les conclusions més rellevants de la tesi i els futurs treballs a què pot donar lloc.

---

---

---

## Thesis abstract and approach

In machining processes, tools are one of the most dynamic and difficult to manage resources of the production system (Ref 13). This is mainly due to the wide diversity of existing tools, the need for various tools in order to process a batch, and the progressive loss of their cutting capacity. In order to ensure that the appropriate tools are available in the machines that need them to process the different batches, and at the required times, it is necessary to establish a tool scheduling and a management of cutting tools, that comprises those tasks necessary to prepare and transport the tools. In this way, production does not stop as a consequence of a lack of availability of the tool resource.

Cutting tools can be taken into account at different stages of production, from design to manufacturing. This thesis approach is dedicated at cutting tools in the most operational level of the shop floor. In this way, it only deals with tool scheduling and tool management at this level.

Tool scheduling and tool management cannot be carried out independently, but they must be integrated with the rest of functions related to the manufacturing process. Thus, this thesis takes into account process planning and production scheduling. Process planning is used to select the adequate cutting tools and working conditions for every machining operation. On the other hand, production scheduling assigns tasks to the machines.

The main objective of this thesis is to develop a proposal for scheduling and managing cutting tools that is integrated with process planning and production scheduling. The capacity of computer aided process planning of generating tool alternatives allow to realize job scheduling without taking into account tool resource. With these tool alternatives, it is possible solve interferences or incompatibilities because of the simultaneous use of the alternatives proposed by the process planner with the production scheduling, which involves the scheduling of tools on machines.

Tool scheduling, is the foundation that supports the proposal made in this thesis. The selection of all possible tool alternatives by the process planner for every operation creates incompatibilities or interferences with production scheduling, as the interaction with the tool resource is not taken into account. Those interferences arise from the simultaneous use of tools in the different operations, since the same tool cannot be used simultaneously by different machines. This thesis suggests solving those interferences iteratively, reducing the number of tool alternatives in the operations. The objectives set

---

out in the resolution of interferences are the minimisation of tool movements, which enhances the stability of tools on machines, and the assignment of tools to the different operations according to their need for tools. Once the interferences have been resolved, different tool alternatives are assigned to each operation without any interference between them.

The existence of tool alternatives for the operations improves the management of the tool resource. Those alternatives are not only used to resolve the incompatibilities between operations by the tool resource with the production scheduling, but they also provide flexibility to the management of tools. The tool manager can use the alternatives to manage tool changes necessary due to cutting edge wear. Besides, these alternatives give some independence to the manager with regard to incidents, thus providing options that make it possible to continue the machining process when a particular tool is not available.

The thesis has been organised into the following chapters:

- In Chapter 1 there is an introduction to cutting tools as a necessary resource to manufacturing parts by material removal. Next, there is an introduction to the tools and their scheduling and management within a production system.
- Chapter 2 is devoted to reviewing the relevant bibliography on scheduling and management of cutting tools. Secondly, this chapter tackles the issue of scheduling machining operations, as well as the independent or integrated assignment of tools to those operations.
- Chapter 3 focuses on the presentation of the functional model suggested for scheduling and tool management.
- Chapter 4 develops in detail the proposal set out for the scheduling of tools, as well as the verification of the feasibility of that proposal.
- Finally, chapter 5 presents the most relevant conclusions of the thesis and suggests directions for future work.

---

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
1.1. LAS HERRAMIENTAS DE MECANIZADO.	2
1.1.1. Componentes de las herramientas de mecanizado.	4
1.1.2. Vida de las herramientas de corte.	6
1.1.2.1. Desgaste y reglaje.	6
1.1.2.2. Cambios de herramienta por pérdida de la capacidad de corte.	9
1.1.3. Materiales para herramientas.	11
1.1.4. Almacenamiento, manipulación y transporte de herramientas.	14
1.1.5. Tendencias en herramientas.	16
1.2. SISTEMAS DE FABRICACIÓN.	20
1.2.1. Funciones de fabricación.	22
1.2.1.1. Planificación de procesos.	23
1.2.1.1.1. Normativa ISO 14649.	24
1.2.1.2. Programación de la producción.	26
1.2.2. Evolución de los sistemas de fabricación.	28
1.2.3. Organización de los recursos productivos.	33
1.3. PROGRAMACIÓN Y GESTIÓN DE HERRAMIENTAS DE MECANIZADO.	35
1.3.1. Programación de las herramientas.	36
1.3.2. Nivel operativo.	38
1.3.3. Normativa ISO 13399.	40
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.</b>	<b>43</b>
2.1. FUNCIONES BÁSICAS EN LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS.	44
2.2. ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS.	53
2.2.1. Asignación estática y dinámica de herramientas.	53
2.2.2. Flujo de piezas y de herramientas.	54
2.2.3. Nivel de duplicidad de herramientas.	54
2.2.4. Posicionamiento de las herramientas en el almacén de la máquina.	56
2.3. INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS CON OTRAS FUNCIONES DE FABRICACIÓN.	57
2.3.1. Integración con la planificación de procesos.	57
2.3.2. Integración con la programación de la producción.	59
2.3.2.1. Programación no simultánea de los trabajos y el recurso herramienta.	61
2.3.2.1.1. Priorización del recurso herramienta.	61
2.3.2.1.2. Priorización de los trabajos.	63
2.3.2.1.2.1. Resolución global.	63
2.3.2.1.2.2. Resolución jerárquica.	66
2.3.2.2. Programación simultánea de los trabajos y el recurso herramienta.	67
2.3.2.2.1. Resolución jerárquica.	68
2.3.2.2.1.1. Resolución del problema de carga.	68
2.3.2.2.1.2. Resolución del problema de secuenciación.	70
2.3.2.2.2. Resolución integrada.	72
2.4. RESUMEN.	74
<b>CAPÍTULO 3. MODELO FUNCIONAL.</b>	<b>77</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.	77

---

3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	78
3.2.1. <i>Propuesta de integración del gestor de herramientas con la planificación de procesos y la programación de la producción.</i> .....	79
3.2.2. <i>Metodología propuesta para el gestor de herramientas.</i> .....	83
3.2.3. <i>Aportaciones de la metodología propuesta.</i> .....	88
3.3. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL.....	89
3.3.1. <i>Modelo IDEF0</i> .....	89
3.3.1.1. Sintaxis y Semántica .....	91
3.3.1.2. Diagramas IDEF0 .....	92
3.3.2. <i>Descripción funcional de la propuesta del gestor.</i> .....	93
3.3.2.1. Sistema de fabricación (A-0) .....	95
3.3.2.2. Fabricar (A0) .....	97
3.3.2.2.1. Diseñar producto (A1) .....	98
3.3.2.2.2. Generar planes de proceso (A2).....	98
3.3.2.2.3. Planificar producción (A3).....	101
3.3.2.2.4. Producir (A4) .....	102
3.3.2.3. Producir (A4).....	103
3.3.2.3.1. Programar producción (A41) .....	104
3.3.2.3.2. Gestionar herramientas (A42).....	106
3.3.2.3.3. Gestionar otros recursos (A43) .....	108
3.3.2.3.4. Fabricar piezas (A44).....	109
3.3.2.3.5. Monitorización (A45) .....	110
3.3.2.4. Gestionar herramientas (A42).....	111
3.3.2.4.1. Determinar horizontes de trabajo (A421).....	111
3.3.2.4.2. Resolver interferencias (A422) .....	113
3.3.2.4.3. Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423) .....	114
3.3.2.4.4. Determinar adaptadores (A424).....	119
3.3.2.4.5. Programar montajes y transportes de herramientas (A425).....	121
3.3.2.5. Resolver interferencias (A422) .....	122
3.3.2.5.1. Detectar y analizar interferencias (A4221).....	123
3.3.2.5.2. Seleccionar interferencia a resolver (A4222).....	126
3.3.2.5.3. Eliminar interferencia (A4223).....	128
3.3.2.6. Eliminar interferencia (A4223).....	129
3.3.2.6.1. Determinar posibles soluciones de la interferencia (A42231).....	131
3.3.2.6.2. Caracterizar posibles soluciones de la interferencia (A42232).....	132
3.3.2.6.3. Seleccionar solución de la interferencia (A42233).....	134
3.4. RESUMEN DE LA PROPUESTA PARA EL MODELO FUNCIONAL .....	134
<b>CAPÍTULO 4. PROGRAMACIÓN DE HERRAMIENTAS.....</b>	<b>137</b>
4.1. PROPUESTA PARA LA PROGRAMACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS .....	138
4.1.1. <i>Detección de interferencias.</i> .....	141
4.1.1.1. Tipos de interferencias.....	142
4.1.1.2. Criticidad de adaptadores.....	145
4.1.1.3. Enlace entre horizontes.....	147
4.1.2. <i>Análisis de interferencias.</i> .....	148
4.1.2.1. Análisis individual de las interferencias.....	148
4.1.2.2. Comparación entre interferencias .....	152
4.1.2.3. Ejemplo de cálculo de índices.....	155
4.1.3. <i>Selección de la interferencia a resolver.</i> .....	158
4.1.4. <i>Procedimiento de resolución de la interferencia.</i> .....	162
4.1.4.1. Generación de soluciones .....	164
4.1.4.1.1. Propuesta para la generación de soluciones de la interferencia.....	166

---

---

4.1.4.1.1.1. Evaluación de los transportes.....	167
4.1.4.1.1.2. Algoritmo de generación de soluciones.....	171
4.1.4.1.1.3. Ejemplo de generación de soluciones.....	173
4.1.4.2. Evaluación de las posibles soluciones.....	174
4.1.4.2.1. Evaluación a nivel de operaciones individuales.....	175
4.1.4.2.2. Caracterización de las posibles soluciones.....	177
4.1.4.2.2.1. Evaluación de índices.....	178
4.1.4.2.2.2. Análisis de los transportes.....	180
4.1.4.2.3. Algoritmo de evaluación de las posibles soluciones.....	185
4.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	190
4.3. VERIFICACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA PROPUESTA REALIZADA DE RESOLUCION DE INTERFERENCIAS.....	199
4.4. RESUMEN DE LA PROPUESTA.....	205
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>207</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	207
5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	209
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>213</b>



---

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad nos encontramos ante un mercado globalizado, cambiante, y caracterizado por una creciente variedad y complejidad de productos, con ciclos de vida y plazos de entrega cada vez más cortos. Para satisfacer la demanda, los sistemas de fabricación, sobre todo en pequeñas y medianas empresas con productos unitarios o personalizados, se han tenido que adaptar a la fabricación de una gran variedad de piezas, disminuyendo los tiempos de estancia de las piezas en el taller y alcanzando los niveles de productividad y calidad requeridos, todo ello con costes reducidos (Ref 23).

El aumento de la automatización en los sistemas de fabricación dedicados al conformado de piezas por mecanizado, hizo que se comenzara a considerar la gestión de herramientas en ellos (Ref 2). Si las herramientas no están disponibles, la producción se detiene, y las ventajas que debería aportar un sistema con alto grado de automatización y flexibilidad se desvanecen dando lugar a una baja productividad. Por tanto, la disponibilidad de herramientas es importante para conseguir una producción ininterrumpida en un entorno de fabricación automatizado (Ref 4, Ref 21, Ref 55).

Por ello, es necesario realizar una programación y una gestión de herramientas, de forma que se disponga de las herramientas adecuadas, en las máquinas que las necesitan y en el tiempo que se requieren (Ref 13, Ref 66), de forma que se cumplan con los objetivos de optimización global del sistema productivo. En relación al recurso herramienta, algunos de estos

objetivos pueden ser el garantizar que no se producen retrasos en las programaciones de los trabajos en las máquinas, debido a la falta de herramientas, minimizar el número de herramientas, etc.

Dado que las herramientas son un recurso productivo, su programación y gestión no se puede realizar aisladamente, sino que se deben enmarcar dentro del funcionamiento del sistema productivo, e integrarse con el resto de las actividades de fabricación. En concreto, deben integrarse con la planificación de procesos y la programación de la producción (Ref 29).

En el desarrollo de este capítulo se expondrán, en primer lugar, las características de las herramientas, como recurso necesario para conformar las piezas por arranque de material. Seguidamente se presentará el papel del recurso herramienta en el conjunto del sistema productivo, para terminar con las actividades que se engloban en la programación y la gestión de herramientas.

## **1.1. LAS HERRAMIENTAS DE MECANIZADO.**

Los procesos de conformado por arranque de material convencionales, también conocidos como procesos de mecanizado, se pueden definir como unos procedimientos aptos para modificar las formas, dimensiones y acabado superficial en una pieza, arrancando de ésta el material sobrante o creces, en forma de viruta. El arranque de este material requiere una combinación de máquinas, herramientas, energía y manipulación, necesarios para obtener las especificaciones requeridas en la pieza final.

El proceso de mecanizado de metales es un proceso de coste elevado, debido principalmente a la eliminación de material, a la energía necesaria para arrancarlo y al coste de las herramientas. Por ello, el mecanizado se suele realizar después de otros procesos de fabricación, como la fundición o la deformación plástica. Estos procesos generan una forma aproximada o general de la pieza, siendo el mecanizado el encargado de proporcionar la geometría final, las dimensiones y los acabados requeridos.

Los procesos de conformado por eliminación de material son uno de los procesos más importantes en la fabricación de las piezas, siendo uno de los que más está evolucionando en la actualidad, debido a su versatilidad y amplia utilización (Ref 63). La importancia de este proceso viene avalada por las siguientes razones (Ref 38):

- Es aplicable a una amplia variedad de materiales (metales, plásticos, etc.).

- Permite la obtención tanto de formas geométricas regulares como de formas muy complejas y variadas.
- Permite la obtención de tolerancias estrechas.
- Permite la obtención de buenos acabados superficiales.

El proceso de conformado por arranque de material no se utiliza únicamente para obtener la forma, geometría y acabado de la pieza, sino que también es utilizado para conseguir los utillajes necesarios para la obtención y transformación de piezas en otros procesos. En concreto, es necesario para la fabricación de los moldes y las matrices en los procesos de inyección de plásticos, deformación plástica, etc.

Las herramientas de mecanizado, que se encargan de eliminar el material sobrante de la pieza (Fig 1-1), se encuentran en continua evolución para adaptarse a los nuevos requerimientos de mecanizado. Entre estos requerimientos, que han favorecido tanto la evolución de las máquinas como de las propias herramientas, se puede destacar la obtención de mejores tolerancias, el mecanizado a alta velocidad, el mecanizado de aleaciones ligeras para la industria espacial y del automóvil, el mecanizado de aleaciones de alta dureza para los moldes y las matrices, el micromecanizado, el mecanizado en seco, el desarrollo de herramientas para las máquinas multiproceso, etc.



*Fig 1-1. Herramientas de mecanizado (Ref 93).*

Las herramientas son uno de los recursos más dinámicos y difíciles de gestionar del sistema productivo (Ref 13), debido principalmente a las siguientes causas:

- La gran diversidad de herramientas, necesarias para la gran variedad de operaciones de mecanizado, se traduce en una amplia variedad de herramientas en el sistema productivo.
- El número de herramientas necesarias para procesar un conjunto de lotes “*puede ser superior en un orden de magnitud al número de lotes a fabricar*” (Ref 29).
- Las herramientas pierden su capacidad de corte, con lo que sus filos deben ser sustituidos periódicamente para continuar con el mecanizado.
- El flujo de herramientas en el sistema productivo puede llegar a ser importante, ya que se debe coordinar los transportes de las herramientas entre las máquinas y los almacenes para satisfacer los requerimientos de los trabajos en curso.

Dada la importancia de las herramientas en el proceso de mecanizado, y siendo el ámbito de la tesis la propuesta de programación y gestión de herramientas, se va a realizar una exposición sobre las principales características de las herramientas: componentes, estimación de su tiempo de vida, materiales utilizados y formas de almacenamiento y transporte de las herramientas en el taller. Finalmente, se tratarán las tendencias actuales relacionadas con las herramientas de mecanizado.

### 1.1.1. COMPONENTES DE LAS HERRAMIENTAS DE MECANIZADO.

Una herramienta de mecanizado está constituida por un conjunto de elementos cortantes y de adaptadores (Ref 45). Este conjunto de elementos que integran la herramienta se puede considerar como una cadena de componentes que van desde el filo de corte hasta el acoplamiento con la maquina (Fig 1-2).



Fig 1-2. Componentes de una herramienta de mecanizado (Ref 45).

Los elementos cortantes representan la parte de la herramienta que está en contacto con la pieza, es decir, la que elimina el material sobrante de la pieza. Estos elementos cortantes pueden ser de distintos tipos: plaquitas intercambiables, elementos soldados, herramientas enterizas (fresas, brocas, etc.).

Los adaptadores son las partes de la herramienta que permiten el acoplamiento del elemento cortante en la máquina. Dentro del conjunto de adaptadores se pueden distinguir tres tipos: los adaptadores para los elementos cortantes o adaptadores primeros, los adaptadores intermedios y los adaptadores finales.

- Los adaptadores para los elementos cortantes son la parte de la herramienta que da soporte a uno o más elementos cortantes. En este grupo se incluyen los adaptadores que sustentan a las plaquitas, como los platos de cuchillas de fresado, los portaplaquitas de torneado, etc., así como los que sustentan a las herramientas enterizas, como son los portabrocas, los portapinzas, etc. Algunos de estos adaptadores, como los portaplaquitas de mango cuadrado o barras cilíndricas se pueden montar directamente en la máquina, sin necesitar más adaptadores.
- Los adaptadores intermedios permiten la unión del adaptador que da soporte a los elementos cortantes con el adaptador final. Estos adaptadores actúan como puente entre distintos acoplamientos, permitiendo flexibilizar los montajes de herramientas y reduciendo el stock de herramientas. Por ello, los adaptadores intermedios llevan un tipo de acoplamiento en su parte más cercana al filo y otro tipo de acoplamiento en su parte más cercana a la máquina. Así, una barra de mandrinar puede ser montada directamente en la torreta de un torno, o la misma barra, con un adaptador intermedio puede unirse a un cono ISO para montarse en una mandrinadora.
- Los adaptadores finales son los últimos de la cadena de componentes, haciendo posible el montaje de la herramienta en la máquina. Dentro de este grupo se encuentran los conos ISO, los acoplamientos VDI, etc.

Una herramienta tiene al menos uno de estos adaptadores (adaptador para los elementos cortantes), no siendo necesario que tenga adaptadores intermedios y/o finales, si la herramienta se monta directamente en la máquina con el adaptador que soporta los elementos cortantes.

Todos estos elementos se unen generando el montaje que dará lugar a una herramienta de corte, capaz de ser montada en la máquina para mecanizar una pieza. La unión de estos elementos se realiza mediante acoplamientos. Los tipos de acoplamientos presentan una gran variedad, ya que se pueden encontrar desde acoplamientos cónicos, cilíndricos, rectangulares, hasta acoplamientos específicos definidos por los distintos fabricantes, como los sistemas Coromant-Capto de Sandvik, los KM25 y los KM Widia de Kennametal, etc.

El elemento cortante se puede montar en el portaherramientas mediante sistemas mecánicos, térmicos o hidráulicos. En los sistemas mecánicos, los portaherramientas sujetan la herramienta mediante elementos de unión, como tornillos, pernos, bridas, etc. Estos elementos de unión se utilizan también para unir los adaptadores entre sí. Los portaherramientas térmicos se calientan mediante inducción para dilatarlos y permitir sujetar la herramienta.

La variedad de elementos que componen la herramienta hace necesario la gestión de su montaje. Los montajes de las herramientas que se van a utilizar, y su posterior desmontaje consumen unos tiempos que deben ser tenidos en cuenta en la programación de utilización de las herramientas. Además, los filos de los elementos cortantes pierden su capacidad de corte y periódicamente deben ser sustituidos para continuar con el mecanizado. Por tanto, también es necesaria una gestión de dichos filos, de forma que estimando el tiempo de vida de la herramienta, se puedan programar los cambios necesarios. Estos cambios también implican un consumo de tiempo para sustituir o acondicionar el elemento cortante.

### **1.1.2. VIDA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE.**

Como se ha comentado, las herramientas pierden su capacidad de corte tras un cierto tiempo mecanizando, siendo necesario sustituir sus filos. El tiempo de vida o duración de una herramienta se puede definir como el periodo de tiempo en el que la herramienta puede ser utilizada para mecanizar (Ref 21). El tiempo de vida está relacionado con el desgaste progresivo que sufre la herramienta. Este desgaste ocasiona que, además del reglaje inicial necesario para trabajar con las herramientas, cada cierto tiempo la herramienta deba ser reglada, para garantizar la precisión dimensional de las piezas.

#### **1.1.2.1. Desgaste y reglaje.**

Durante el mecanizado, la herramienta está sometida a tensiones mecánicas y a elevadas temperaturas. Estas condiciones de trabajo provocan

un desgaste gradual en la herramienta, que depende de varios factores: el material de la pieza, el de la herramienta, las condiciones de mecanizado, etc. En casos extremos, puede ocurrir un fallo prematuro de la herramienta y la destrucción del filo cortante. El fallo prematuro de la herramienta ocurre por la fractura del filo, provocada por las vibraciones, por un exceso de carga o por percusiones.

Los mecanismos básicos de desgaste que actúan sobre la herramienta son la adhesión, la abrasión y la difusión.

- El desgaste por abrasión es debido a que las partículas endurecidas de la viruta rayan y arrancan material de la herramienta.
- El desgaste por adhesión se produce a altas temperaturas y presiones. Este proceso consiste en el soldado o adhesión entre el material de la viruta y la herramienta. El desprendimiento de este material adherido, provoca pérdida de material en la herramienta.
- El desgaste por difusión provoca que los átomos de la herramienta que le dan su dureza, pasen al material de la pieza, siendo más susceptible a la abrasión y la adhesión. Este efecto tiene lugar a elevadas velocidades y temperaturas.

El desgaste se localiza principalmente en dos zonas de la herramienta (Fig 1-3): la cara de desprendimiento y la cara de incidencia (Ref 96).

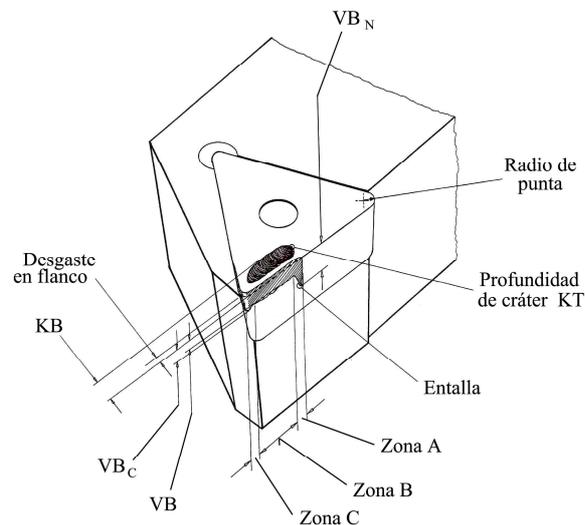


Fig 1-3. Zonas de desgaste (Ref 96).

- El desgaste en la cara de desprendimiento se caracteriza por la formación de un cráter debido al movimiento de la viruta sobre esta cara. Los parámetros que definen la geometría del cráter son la distancia media desde el borde del cráter al filo original (KB), la distancia del centro del cráter al filo (KM) y la profundidad máxima del cráter (KT).
- El desgaste en la cara de incidencia se manifiesta por la aparición sobre esta cara de una banda estriada y brillante paralela a la arista de corte. Este desgaste es el causante de una peor calidad superficial de la pieza, y una disminución de la precisión dimensional. Los parámetros que definen el desgaste en la cara de incidencia son las profundidades media y máxima (VB y VBmáx), la pérdida de filo junto a la punta de la herramienta (VC) y la muesca o ranura lateral (VN).

Los reglajes de las herramientas se realizan cada vez que se utiliza una nueva herramienta, antes de empezar el mecanizado y durante el mecanizado de las distintas piezas del lote. El reglaje de una herramienta de mecanizado consiste en medir con exactitud las dimensiones más importantes de la herramienta, introduciendo los correctores correspondientes en la máquina de control numérico.

Los correctores de la herramienta se establecen sobre la cara de incidencia de la herramienta, por lo que el desgaste VB influye en el valor del corrector de la herramienta (Fig 1-4). El desgaste VB, junto con el ángulo de incidencia del elemento cortante proporciona una variación dimensional del corrector.

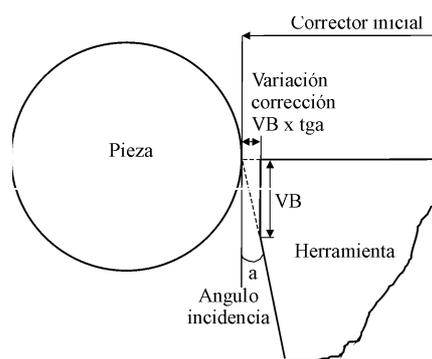


Fig 1-4. Relación entre VB y el corrector.

Existen diversas formas de realizar los reglajes de herramientas. En primer lugar, los reglajes se pueden realizar en la máquina o fuera de ella (reglajes internos o externos). Los sistemas externos de reglaje de herramientas utilizan un sistema de montaje y fijación equivalente al existente en la máquina, incorporando los datos obtenidos de forma manual a la máquina o al sistema informático en el que está conectada la unidad central de la máquina. En segundo lugar, la toma de medidas sobre la herramienta se puede realizar con o sin contacto, mediante sondas o sistemas láser. Con respecto a los sistemas láser, aportan una mayor rapidez, pero requieren un ambiente estable para el haz.

### **1.1.2.2. Cambios de herramienta por pérdida de la capacidad de corte.**

El conocimiento del tiempo de vida de la herramienta es fundamental para establecer la programación de cambio de filos de las herramientas.

Las decisiones de cambio de los filos de las herramientas son importantes, ya que tienen un impacto considerable en los costes operativos y en la productividad del sistema. Si las herramientas se reemplazan antes de lo necesario, se necesitan más herramientas y se incurre en costes más elevados, no aprovechando totalmente la capacidad de corte de la herramienta. Por otro lado, la utilización durante un tiempo largo de la herramienta implica una capacidad de arranque por unidad de tiempo menor (Ref 81). Un cambio por una rotura inesperada de una herramienta supone una incidencia en la fabricación, y tiene un coste más elevado que un cambio programado, ya que los cambios programados están planificados y se pueden desarrollar sin retrasos, mientras que una rotura inesperada puede dar lugar a una parada de máquina, un rechazo de pieza, etc.

Existen diversos criterios para estimar el tiempo de vida de una herramienta, como puede ser el crecimiento del cráter de la cara de desprendimiento o el desgaste alcanzado en la cara de incidencia (VB). El criterio de vida más utilizado es éste último, ya que afecta directamente a las dimensiones de la pieza mecanizada y al acabado superficial obtenido. De esta forma, y conociendo la evolución del desgaste VB con respecto al tiempo, la herramienta se cambia cuando se alcanzan unos valores predeterminados del parámetro VB. Estos valores indican el máximo admisible para que el mecanizado sea viable (Ref 25). Estos valores de VB permitidos varían en función de distintos parámetros, como son el material de la herramienta y el tipo de operación realizado: desbaste o acabado, entre otros. En las operaciones de desbaste el límite de VB se fija para garantizar que el filo de la herramienta no alcanzará temperaturas excesivamente elevadas por rozamiento, mientras que en las operaciones de acabado, los valores de VB se establecen para garantizar el acabado superficial en las

piezas. En relación a los valores máximos permitidos de VB existe tanto normativa (Ref 43) como recomendaciones de fabricantes de herramientas.

La evolución del desgaste en la cara de incidencia (VB) con respecto al tiempo de mecanizado sigue una tendencia creciente y no lineal, en la que pueden apreciarse tres zonas claramente diferenciadas (Fig 1-5): una primera zona donde el desgaste es relativamente súbito, una segunda zona donde el desgaste crece uniformemente de forma lineal y una tercera zona donde el desgaste aumenta rápidamente, hasta que se produce la rotura de la herramienta (Ref 48).

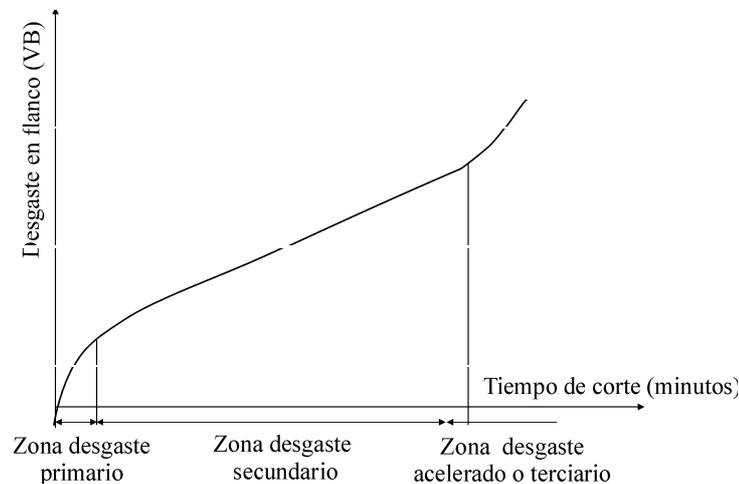


Fig 1-5. Curva de desgaste (Ref 48).

Se han desarrollado diversas teorías que relacionan los parámetros de corte con su tiempo de vida. Este tiempo de vida se especifica para alcanzar un determinado desgaste en la herramienta (Ref 96). La teoría más extendida es la teoría de Taylor, o generalizada de Gilbert, que expresa el tiempo de vida de la herramienta (T) en función del avance (f), la profundidad de pasada (d) y la velocidad de corte (v). Los exponentes y las constantes (C, n, x, y) varían en función del material de la pieza y de la herramienta, obteniéndose de forma experimental.

$$T = C^{1/n} V^{-1/n} d^{-x/n} f^{-y/n}$$

La velocidad de corte es la variable que más influye en el tiempo de vida de la herramienta, seguida del avance y de la profundidad de pasada. Pequeños aumentos de la velocidad de corte, disminuyen en un porcentaje

mayor el tiempo de vida de la herramienta. Las condiciones de corte para las cuales se obtiene una vida relativamente corta son antieconómicas ya que requieren de continuas sustituciones de herramienta. Por otro lado, la utilización de velocidades y avances muy pequeños con los que se obtendría una gran duración de herramienta es igualmente antieconómico, ya que es poco productivo.

Los fabricantes de herramientas invierten grandes esfuerzos en estudiar el progreso del desgaste de la herramienta y poder así determinar su tiempo de vida. Para ello ensayan las herramientas trabajando sobre un determinado material y fijando unas condiciones de corte. Estos ensayos permiten establecer los cambios de la herramienta cuando se trabaja sobre un mismo material y con condiciones de trabajo similares. Sin embargo, si la producción es variable y se fabrican lotes pequeños, las herramientas se utilizan en diferentes operaciones con condiciones de trabajo dispares (Ref 62), por lo que se debe estimar su tiempo de vida, que no es una simple composición de los ensayos individuales.

Los controles periódicos o la monitorización de la herramienta pretenden controlar el desgaste VB, para evitar el mecanizado con desgastes superiores a los admitidos (Ref 25). La monitorización se puede realizar mediante métodos directos o indirectos. En los métodos directos se mide sobre la herramienta el desgaste VB mediante métodos ópticos, sistemas de visión artificial, etc., de forma manual o automática. Estos métodos son precisos, pero necesitan parar la producción para realizar la medición, y si se realizan fuera de la máquina requieren tiempos elevados. Los métodos indirectos relacionan el estado de la herramienta con las variables del proceso: fuerzas, potencia consumida, vibraciones, temperatura, etc. Estos métodos indirectos no detienen la producción, pero necesitan relacionar las variables medidas con el nivel de desgaste producido en la herramienta, así como con la rotura de la herramienta. En muchos casos, establecer estas correlaciones es complicado, por la complejidad del fenómeno de desgaste de la herramienta.

### **1.1.3. MATERIALES PARA HERRAMIENTAS.**

El material de la herramienta de corte es uno de los factores importantes que afectan a su comportamiento en el mecanizado. Durante el corte, las herramientas están sometidas a altas temperaturas, a elevados esfuerzos y a fricción con la viruta y la superficie mecanizada. El material de la herramienta de corte, para ser capaz de soportar estas condiciones de trabajo, debe presentar las siguientes propiedades:

- Tenacidad, para que las fuerzas de impacto y las vibraciones que actúan sobre la herramienta no la fracturen.

- Dureza en caliente, para que la herramienta mantenga la resistencia mecánica, la dureza y la resistencia al desgaste a altas temperaturas.
- Resistencia al desgaste, para obtener una vida de la herramienta aceptable antes de sustituirla.

Evidentemente, ningún material cumple con todos estos requisitos, ya que, por ejemplo, un material con una dureza elevada no posee una buena tenacidad. Por tanto, los materiales de las herramientas buscan una combinación de estas características en mayor o menor grado, en función de los requerimientos del mecanizado.

La evolución en los materiales de las herramientas ha ido encaminada al desarrollo de materiales con mayor dureza, que permitan velocidades de corte más elevadas o que, a velocidades de corte semejantes, permitan una mayor duración de la herramienta, disminuyendo el desgaste (Ref 38, Ref 105). Esta evolución de las herramientas ha estado condicionada, en gran medida, por la evolución que han experimentado las máquinas herramientas.

Los materiales de las herramientas se pueden clasificar, atendiendo a menor o mayor resistencia y dureza en: aceros, carburos, cermets, cerámicas y materiales de elevada dureza, como el CBN y el diamante. La Fig 1-6 muestra una comparativa entre las características de los distintos materiales para herramientas, donde se aprecian las distintas tenacidades y durezas (Ref 74).

Actualmente, los materiales más consumidos en las herramientas de mecanizado son los aceros y los carburos con recubrimiento (Fig 1-7). Los materiales cerámicos, el CBN y el diamante, aunque están incrementando su utilización, aún no han alcanzado el uso de los carburos, debido principalmente a su falta de tenacidad, lo que hace que su campo de aplicación aún esté restringido al mecanizado de materiales y aleaciones de extrema dureza, y al trabajo con elevadas velocidades de corte.

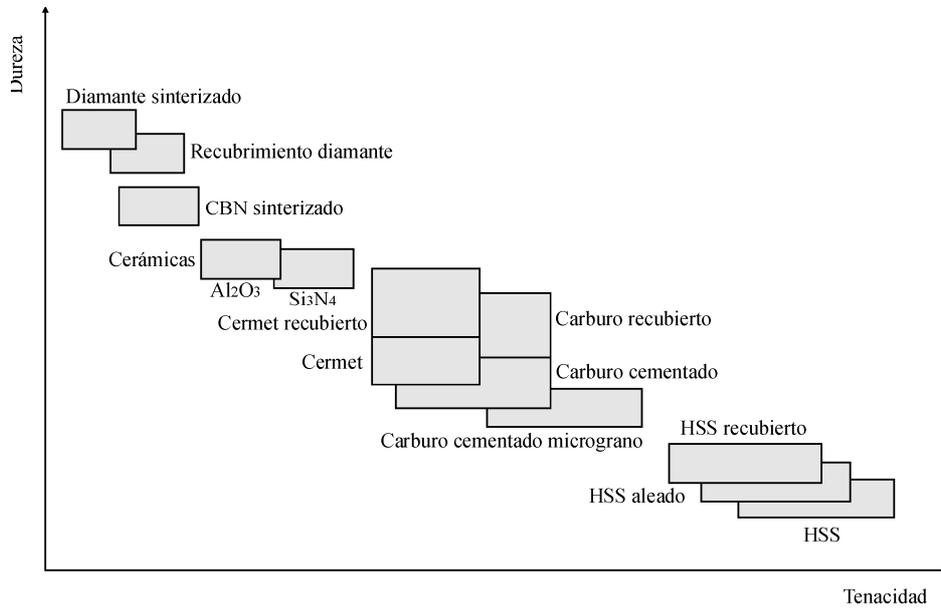


Fig 1-6. Comparativa de materiales de herramientas (Ref 74).

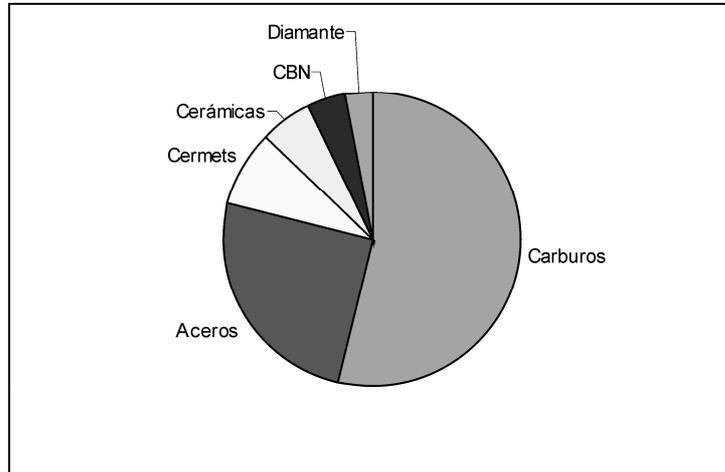


Fig 1-7. Consumo de materiales de herramientas (Ref 96).

El gran consumo de aceros, sobre todo recubiertos, se justifica por su gran tenacidad, su bajo coste y porque representan la opción más económica para fabricar herramientas con formas complicadas. Las herramientas de carburo mantienen una buena relación entre las velocidades de corte y los tiempos de

vida obtenidos, por lo que se adaptan a una gran variedad de procesos. La tendencia actual es utilizarlas recubiertas para conseguir menor fricción y mayor resistencia a las grietas y al desgaste. Por ello, los fabricantes están dedicando un gran esfuerzo a la investigación de los recubrimientos. Los materiales más usados como recubrimiento son nitruro de titanio (TiN), carburo de titanio (TiC), carbo-nitruro de titanio (TiCN) y óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ). Estos recubrimientos suelen estar formados por varias capas, que combinan los anteriores materiales. El espesor total del recubrimiento oscila entre 10 y 15 micras y se fija a la herramienta mediante deposición química o física de vapor (CVD y PVD).

Entre los desarrollos más recientes de recubrimientos se encuentran los nanorecubrimientos. En los nanorecubrimientos, el espesor total de los recubrimientos varía entre 2 y 5 micras, alternando capas de materiales tenaces y duros en forma de nano-sándwiches, que minimizan las microfracturas. También se pueden añadir capas extras que eviten la oxidación y capas que actúen como lubricantes sólidos (Ref 105).

El mayor uso de las herramientas de carburo frente a las cerámicas, el CBN y el diamante también se encuentra justificado por la forma de trabajo de los talleres, y por su elevado coste. En muchos talleres, mecanizar con velocidades elevadas no aporta un beneficio sustancial, ya que los tiempos de preparación son largos, por lo que reducir el tiempo de mecanizado cortando más rápido no aporta tanto beneficio como reducir los tiempos de preparación.

#### **1.1.4. ALMACENAMIENTO, MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE DE HERRAMIENTAS.**

En un sistema productivo, las herramientas se encuentran en almacenes, siendo transportadas a las máquinas, cuando son requeridas. Los diferentes tipos de almacenes en los que se pueden encontrar las herramientas, se pueden clasificar como se indica (Ref 80):

- Almacenes centrales. Son el/los almacenes principales del sistema productivo. Su objetivo es almacenar y preparar las herramientas necesarias para un determinado periodo productivo. En ellos se realizan los montajes de herramientas requeridos por las máquinas y, tras el mecanizado, se procede a su desmontaje. Están constituidos por un conjunto de sistemas que permiten el almacenaje de las herramientas, así como los accesorios necesarios para realizar su preparación.

- Almacenes intermedios. Son los almacenes de herramientas que dan servicio a un número de máquinas durante un determinado periodo de tiempo. Estos almacenes permiten tener disponibles las herramientas cerca del lugar donde se requieren, representando un puente entre el almacén central, si existe, y los almacenes de las máquinas herramienta.
- Almacenes máquina. Son los almacenes que tienen las máquinas, permitiendo que exista un suministro continuo de herramientas durante el mecanizado. Pueden ser de distintos tipos: de disco, de tambor, torretas, de cadena, etc.

En un sistema productivo, es necesario gestionar el manejo de las herramientas, que incluye su manipulación y transporte. Las operaciones de manipulación incluyen el montaje y desmontaje de herramientas, el cambio de los filos de los elementos cortantes, la carga y descarga en los almacenes de las máquinas, su posicionamiento en las estaciones de prerreglaje, etc.

En función del grado de automatización del sistema de fabricación, las operaciones de transporte y manipulación de las herramientas se pueden realizar de forma automática, de forma manual o mediante una combinación de ambas. Las herramientas se pueden transportar de forma automatizada o manual hasta los almacenes de las máquinas. Como muestra de transporte automatizado se tiene el uso de vehículos automáticos guiados (AGV), cintas transportadoras, etc. Estos sistemas de transporte pueden abastecer a una o varias máquinas. Los transportes de las herramientas se pueden realizar mediante transportes exclusivos para el recurso herramienta o compartiendo los transportes con el resto de elementos del sistema productivo, como pueden ser las materias primas, los productos semielaborados y finales, el resto de recursos, etc. En todos estos casos, la gestión de los transportes es más compleja, ya que es necesario coordinar los transportes de herramientas con el flujo de los otros elementos.

La manipulación de las herramientas es difícil de automatizar, sobre todo en la realización de montajes y desmontajes, por lo que habitualmente se realiza de forma manual. En las operaciones de carga y descarga de herramientas en la máquina, y dependiendo de la configuración de la máquina, es posible la utilización de sistemas automáticos y robots manipuladores. Estos sistemas pueden permitir cambiar las herramientas mientras la máquina está en funcionamiento, reduciendo los tiempos de parada, y mejorando la productividad de la máquina.

La configuración del sistema productivo, en cuanto a capacidades de los almacenes de las máquinas y a la capacidad y rapidez de los transportes,

condiciona, en gran medida, las estrategias adoptadas para la asignación del recurso herramienta a las máquinas y para el flujo de herramientas. Básicamente se pueden adoptar dos estrategias para la gestión del flujo de las herramientas: considerar una gestión orientada a las piezas o considerar una gestión orientada a las herramientas (Ref 80). En la gestión orientada a las piezas, las herramientas son asignadas a las máquinas en función de los trabajos que se han asignado a la máquina. La gestión orientada a las herramientas se basa en la aplicación de la tecnología de grupos, identificando los grupos de herramientas que son comunes a una familia de piezas, de forma que piezas y herramientas son asignadas a las mismas máquinas.

Se adopte una estrategia u otra, es necesario coordinar el flujo de herramientas entre las máquinas, permitiendo que las herramientas se puedan o no compartir entre máquinas (asignación dinámica y estática). En la asignación estática, las herramientas se asignan a una máquina o conjunto de máquinas al inicio del periodo planificado, no modificando esta asignación durante dicho periodo. Bajo esta estrategia se debe disponer de un elevado inventario de herramientas y gran capacidad de los almacenes de máquinas. En la asignación dinámica de herramientas (Ref 20) se llevan las herramientas a las máquinas en los instantes que se necesitan, permitiendo que las herramientas se puedan compartir entre las distintas máquinas del sistema. Bajo esta estrategia la configuración del almacén de la máquina va cambiando durante el periodo planificado. Al permitir que las herramientas se compartan entre máquinas, se requiere un inventario menor de herramientas, pero transportes rápidos de herramientas, para no retrasar los trabajos.

### **1.1.5. TENDENCIAS EN HERRAMIENTAS.**

Las herramientas están continuamente evolucionando para adaptarse a los nuevos requerimientos de mecanizado. Esta evolución está unida a la experimentada por las máquinas herramientas, así como a la necesidad de mecanizar otros materiales: materiales más ligeros para los sectores de automoción y aeronáutico o materiales de elevada dureza para los moldes y las matrices. Por otro lado, con la creciente automatización de los sistemas productivos y la fabricación integrada, es necesario gestionar de una manera eficiente el recurso herramienta. Para ello es necesario conocer la información relevante de las herramientas, identificando en cada momento el estado de las herramientas en el sistema productivo.

Como tendencias más representativas en la evolución de las herramientas de mecanizado se pueden destacar las siguientes:

- Generalización o estandarización de los acoplamientos de las herramientas, que ha dado lugar a las herramientas modulares.
- Desarrollo de las máquinas multiproceso, que ha dado lugar a las herramientas multifuncionales.
- La investigación relacionada con los materiales de las herramientas ha permitido mecanizar materiales más duros, así como alcanzar mayor tasa de arranque de material, dando lugar al desarrollo del mecanizado a alta velocidad.
- Disminución de la escala del mecanizado. La necesidad de obtener piezas con dimensiones reducidas ha dado lugar al micromecanizado y al desarrollo de las microherramientas.
- Utilización del mecanizado en seco o del mecanizado con la mínima lubricación posible, reduciendo los costes de limpieza y de consumo de lubricantes, así como del reciclaje de dichos lubricantes.
- Control de datos asociados a las herramientas, mediante sistemas incorporados a la propia herramienta.

#### *Herramientas modulares*

Las herramientas modulares se caracterizan porque sus adaptadores disponen de un tipo de acoplamiento común. De esta forma se pueden generar distintos montajes de herramientas, combinando adaptadores de distintos tamaños y características, permitiendo el montaje de la herramienta en diferentes máquinas.

Las herramientas modulares permiten cambios rápidos, reduciendo los tiempos de parada dedicados al cambio de la herramienta. Dado que los adaptadores para los elementos cortantes son intercambiables se pueden compartir entre distintas máquinas, reduciendo el inventario de herramientas.

Los distintos fabricantes de herramientas han desarrollado sus propios sistemas de herramientas modulares. Como ejemplo de herramientas modulares tenemos el sistema Coromant-Capto de Sandvik, el KM25 y KM Widaflex de Kennametal, etc. La Fig 1-8 muestra el sistema Coromant Capto de Sandvik (Ref 93).

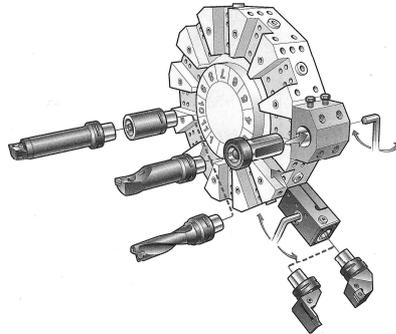


Fig 1-8. Herramientas modulares (Ref 93).

### *Herramientas multifuncionales*

Las máquinas multiproceso surgieron en la segunda mitad de los noventa. Estas máquinas combinan distintos procesos de mecanizado, como el torneado-fresado, fresado-rectificado, torneado-rectificado, pudiendo incluir operaciones de tratamientos superficiales mediante láser. Presentan una configuración multieje, que el control numérico puede controlar simultáneamente.

La principal ventaja de estas máquinas es la capacidad de mecanizar totalmente una pieza en una sola máquina. De esta forma, se reducen los tiempos totales de transporte y de preparación de los lotes, que serían superiores si éstos tuvieran que visitar varias máquinas. En ocasiones, el mecanizado de la pieza se puede realizar en un único amarre, con lo que también aumenta la precisión obtenida.

Para mejorar el rendimiento de las máquinas multiproceso, se han desarrollado herramientas multifuncionales. Por ejemplo, en el caso de torneado, una herramienta gemela a 90° se puede utilizar para torneado lateral, frontal y como barra de mandrinar (Fig 1-9). También se pueden incluir dentro de las herramientas multifuncionales, las herramientas denominadas multitorretas, donde en un único adaptador existen diferentes alojamientos que permiten montar herramientas para realizar operaciones de ranurado, roscado y torneado en general (Fig 1-9). La principal ventaja del uso de herramientas multifuncionales es el ahorro de espacio en el almacén de la máquina.

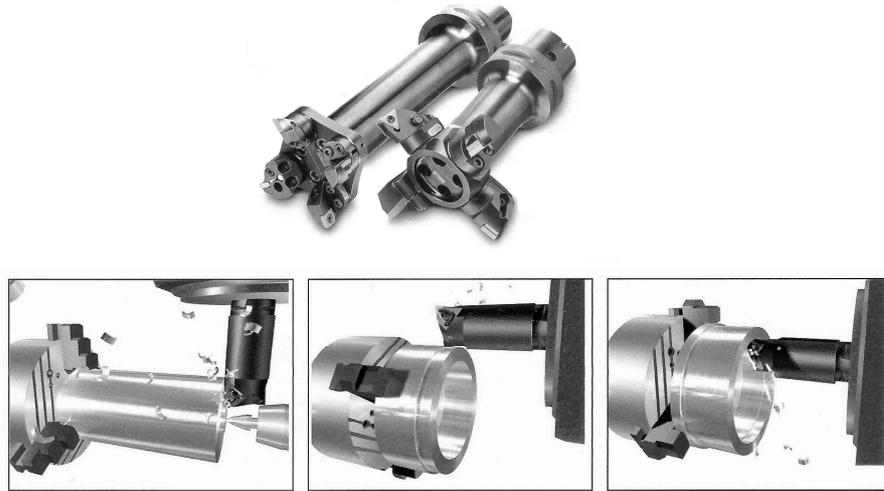


Fig 1-9. Herramientas multifuncionales (Ref 93).

### *Micromecanizado*

La microfabricación se define como la tecnología de crear formas de alta precisión, utilizando diversos materiales y con dimensiones que van desde la décima de micra hasta pocos milímetros. El micromecanizado ha adquirido gran importancia en los últimos años por el progresivo desarrollo de la miniaturización y la creciente demanda de productos de pequeño tamaño, cada vez más complejos, en el campo de la medicina y la electrónica. En el ámbito del mecanizado, los procesos se han miniaturizado, y se pueden encontrar los procesos de microfresado, microtorneado, microtaladrado o microrectificado.

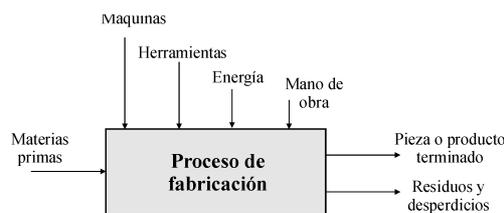
Prácticamente, todos los fabricantes de herramientas ofrecen series especializadas orientadas al micromecanizado. Esto ha sido posible gracias a los avances de la tecnología y de los materiales de las herramientas. Se pueden encontrar brocas y fresas con diámetros de décimas de milímetros e incluso con diámetros de 0,025 mm. Actualmente, las microherramientas se están empezando a utilizar en las fresadoras de alta velocidad, permitiendo generar superficies con radios de acuerdo muy pequeños. De esta forma, si estos radios de acuerdo son suficientes para cumplir con las especificaciones de la pieza, las fresadoras de alta velocidad pueden competir con las máquinas de electroerosión.

*Sistemas de almacenamiento de información en las herramientas*

Las herramientas son un recurso muy dinámico en el área de producción, debido a la gran cantidad de herramientas que se suelen utilizar, así como a la pérdida de su capacidad de corte. Los datos relativos a la herramienta se pueden almacenar en la propia herramienta, mediante dispositivos microelectrónicos. Los datos almacenados incluyen la identificación de la herramienta, sus correctores, sus condiciones de trabajo, dónde va a ser utilizada, etc. Estos datos pueden ser introducidos, actualizados o visualizados mediante equipos de lectura/edición. Estos sistemas permiten transferir la información relacionada con las herramientas al control de la máquina y a los ordenadores que gestionan la producción, y ser enviada junto con la herramienta por toda la fábrica, lo que facilita la programación y la gestión de las herramientas, ya que permite conocer su localización y su estado en tiempo real.

## 1.2. SISTEMAS DE FABRICACIÓN.

Este punto tiene como objetivo enmarcar el recurso herramienta en un sistema productivo dedicado la fabricación de piezas mediante mecanizado. Aunque la fabricación se puede abordar tanto desde un punto vista económico como tecnológico (Ref 38), según el ámbito de la tesis, nos vamos a centrar en el aspecto tecnológico. Desde este punto de vista, la fabricación se puede definir como la aplicación de procesos físicos y químicos que modifican la geometría, propiedades y apariencia de un material de partida para generar piezas o productos, así como el ensamblaje que da lugar a los productos finales. Estos procesos se llevan a cabo mediante una combinación de máquinas, energía, herramientas y mano de obra (Fig 1-10).



*Fig 1-10. Proceso de fabricación (Ref 39).*

El conjunto de personas, equipos y procedimientos, organizados para llevar a cabo las operaciones de fabricación de una empresa se denomina sistema productivo (Ref 39). Por tanto, un sistema productivo engloba no sólo a los recursos necesarios para transformar el material, sino a todas las

funciones que dan soporte a esa fabricación. Los recursos del sistema productivo incluyen las máquinas, las herramientas, los utillajes, los sistemas de manipulación de materiales, los equipos de inspección, los ordenadores que controlan la fabricación, las instalaciones, así como la organización física de todo el equipamiento, y la mano de obra.

Las funciones que dan soporte a la fabricación ayudan a las actividades que se desarrollan sobre el producto (procesado, montaje, inspección, etc.), y se realizan a priori o en paralelo a la fabricación del producto. Estas funciones se encargan de resolver los problemas técnicos y logísticos relacionados con la fabricación. En mayor o menor medida, la mayoría de los autores coinciden a la hora de definir las funciones que dan soporte a la fabricación. El modelo de Sormaz (Ref 100) contempla las siguientes cinco funciones: Diseño, Reconocimiento de elementos característicos, Planificación de procesos, Planificación de recursos y Programación. Cada una de estas funciones comprende diferentes actividades (Fig 1-11), aunque algunas de estas actividades puede requerir interacciones entre varias funciones.

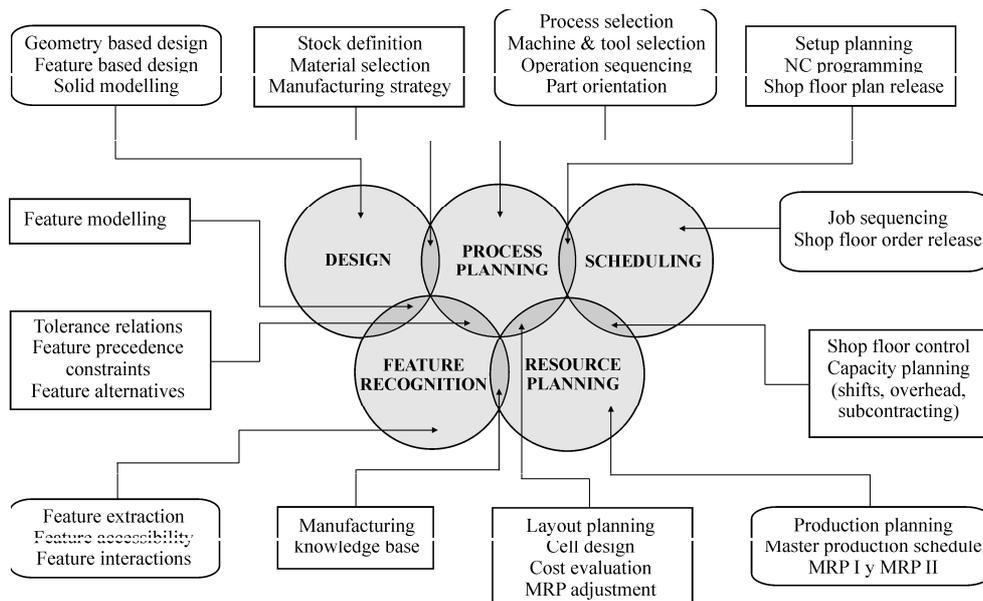


Fig 1-11. Funciones y actividades en el ciclo de desarrollo de un producto de Sormaz (Ref 100).

- Diseño. La función de diseño especifica la estructura y los componentes del nuevo producto, a partir de las necesidades

detectadas y de sus requerimientos funcionales, considerando las capacidades de los recursos de fabricación.

- Reconocimiento de elementos característicos. Esta función interpreta y convierte el modelo geométrico de la pieza en unas entidades denominadas elementos característicos. En el ámbito del mecanizado, estos elementos característicos representan los volúmenes de material a eliminar en el bruto de partida para alcanzar la forma final de la pieza.
- Planificación de procesos. Esta función genera el plan de proceso de los productos a fabricar. En el plan de proceso se especifican tanto los procesos y medios productivos necesarios, como su utilización, para garantizar que el producto cumpla con todas sus especificaciones.
- Planificación de recursos. Esta función realiza las actividades más organizativas relacionadas con la fabricación. Se encarga de la generación del programa maestro de producción, donde se especifican los productos y cantidades a fabricar junto con las fechas de fabricación previstas, y el plan de requerimientos de materiales y de capacidades. En relación al recurso herramienta, se planifica la necesidad de herramientas para la fabricación de los productos y, en base al inventario de herramientas existente, se puede proponer la adquisición de nuevas herramientas o de réplicas de las ya existentes.
- Programación. Esta función asigna los distintos recursos (máquinas, herramientas, utillajes, etc.) a los lotes a producir. Dado que las máquinas representan el recurso más crítico, tradicionalmente, en primer lugar se programan los lotes en las máquinas. Posteriormente, se programan el resto de recursos, de los cuales las herramientas son un recurso crítico, ya que en el procesado de un lote de piezas se requiere la utilización de diferentes herramientas, cuyos filos poseen un tiempo de vida limitado, siendo necesaria la gestión de sus cambios.

### **1.2.1. FUNCIONES DE FABRICACIÓN.**

Las funciones más cercanas al recurso herramienta son la planificación de procesos, la planificación de la producción y la programación de la producción. Estas funciones deciden cuándo se van a fabricar los distintos productos, ordenan y cuantifican la compra de materias primas, especifican los procesos y los medios productivos necesarios, y asignan y coordinan los recursos necesarios para su fabricación, en función de su estado en el sistema productivo.

Dependiendo del horizonte temporal, se distinguen dos niveles en la toma de decisiones. A medio plazo, y con la información del planificador de procesos, se elabora el plan maestro de producción y se establecen los órdenes de producción y el aprovisionamiento de materias primas y recursos. A corto plazo, se elabora una programación de utilización de los recursos para cumplir con los órdenes de producción, realizando un seguimiento de la evolución de dichos órdenes.

### **1.2.1.1. Planificación de procesos.**

La planificación de procesos se encarga de transformar la información de diseño en información de fabricación. La función de la planificación de procesos es determinar un plan de proceso donde se indica la secuencia de operaciones necesarias para transformar un material inicial en un producto que cumpla con las especificaciones de diseño (Ref 33, Ref 34).

El plan de proceso refleja el conjunto de recursos necesarios, y las operaciones a realizar con ellos, ordenadas según una secuencia. Un plan de proceso se puede estructurar en una secuencia de fases, donde cada una está formada por una secuencia de subfases, y finalmente cada una de ellas por una secuencia de operaciones. Se denomina fase al conjunto de operaciones realizadas dentro de una misma máquina, y que están separadas por operaciones de transporte y almacenamiento entre la máquina o fase anterior y la posterior. Una subfase contiene las operaciones realizadas con un mismo amarre o sujeción de la pieza. Cada subfase requiere de unos utillajes, su montaje y reglaje sobre la máquina, así como de la carga y descarga de las piezas. Una operación se define como la acción realizada con una herramienta, manteniendo unas determinadas trayectorias y con las mismas condiciones de trabajo (avances, profundidades y velocidades).

El conocimiento de la tecnología de las herramientas es necesario en la planificación de procesos, ya que entre sus tareas se encuentra la selección de las herramientas y las condiciones de trabajo apropiadas para realizar cada operación (Ref 79). La selección de las herramientas y de sus condiciones de corte tiene en cuenta simultáneamente factores como la geometría y el material de la pieza, las características de la máquina, etc. La selección de las condiciones de corte de la herramienta incluye tanto los parámetros de corte (velocidades y avances), como las trayectorias y pasadas realizadas por las herramientas.

Una de las posibilidades importantes de la planificación de procesos, es la generación de planes de proceso con alternativas. En estos planes se contempla la utilización de distintas máquinas, distintas secuencias de mecanizado, diferentes alternativas de herramientas, etc.

Esta tesis se basa en un planteamiento del recurso herramienta compartido por las máquinas, abordando la utilización de las alternativas de herramientas en las operaciones, generadas por la planificación de procesos. La disponibilidad de alternativas de herramientas permite seleccionar la más adecuada, en función de la utilización de las herramientas cuando se lancen los órdenes de fabricación al taller, y de los objetivos relacionados con las herramientas: minimizar transportes de herramientas, etc. La generación de alternativas de herramientas en cada operación se debe realizar mediante ordenador, ya que, de otra forma, se consume un gran tiempo en la generación de dichas alternativas.

En las últimas tendencias sobre control de sistemas distribuidos, se plantea que la selección del recurso herramienta se realice a nivel de máquina, es decir, que sea la máquina de control numérico la que decida la herramienta a utilizar en cada operación (Ref 110). Esta propuesta de gestión del recurso herramienta por la máquina se mostrará en el siguiente apartado, en el que se expone la normativa ISO 14649, conocida como el estándar STEP-NC (Ref 46).

#### *1.2.1.1.1. Normativa ISO 14649.*

En el ámbito del desarrollo y diseño del producto, se ha desarrollado la normativa ISO 10303, también conocida como STEP. Esta normativa (Ref 44) se centra en la información correspondiente al producto, permitiendo el uso de los datos y el intercambio de información a lo largo de toda la cadena de diseño y fabricación.

Actualmente, la programación y control de las máquinas requiere que los datos de las operaciones y de los elementos característicos se trasvasen a los códigos de programación, mediante el uso de funciones preparatorias (códigos G), que describen las trayectorias seguidas por las herramientas con respecto a los ejes de la máquina, en vez de describir el proceso de mecanizado en relación a la pieza (Ref 112). Aunque los fabricantes permiten la utilización de ciclos fijos para facilitar la programación, estos ciclos fijos no están estandarizados, y son específicos para cada control. Por otro lado, con este modo de programación, la única información proporcionada para la herramienta es su posición en el almacén y el corrector que se le asigna, no disponiendo de su información básica, como su tipo y su geometría.

Para solucionar estos problemas, y para descentralizar la planificación de procesos y la programación de la producción se ha desarrollado la normativa ISO 14649 (Ref 46), conocida como STEP-NC, cuyo objetivo es proporcionar un modelo de transferencia de datos entre las aplicaciones CAD/CAM y los controles numéricos. Su Modelo de Referencia de

Aplicación (ARM), que es el que se expone en la norma ISO 14649, ha sido desarrollado por el comité ISO/TC184 (industrial automation systems and integration).

En la norma 14649 se muestra la programación de las máquinas de control numérico desde un punto de vista orientado a objetos, tomando como partida los elementos característicos de mecanizado y los datos tecnológicos de las operaciones.

De acuerdo a la norma ISO 14649, un programa de control numérico especifica la secuencia de ejecución de las distintas operaciones. En cada operación se define la información de mecanizado necesaria para que una herramienta actúe sobre un elemento característico de mecanizado. Esta información incluye tanto los datos tecnológicos que detallan la operación, como la descripción de la herramienta, las trayectorias, las condiciones de trabajo, las estrategias de aproximación y retirada, etc. Esta información se trasvasa a las máquinas, que se encargan de transformarla en movimientos de ejes y en operaciones.

La Fig 1-12 compara la normativa ISO 14649 con la norma ISO 6983, que describe la programación de las máquinas mediante la utilización de códigos G y M (Ref 110).

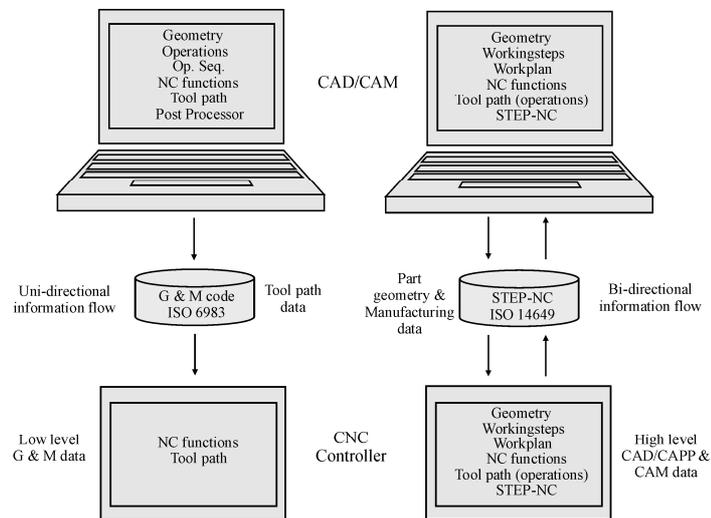


Fig 1-12. Flujo bidireccional de información utilizando STEP-NC (Ref 110).

La normativa ISO 14649 también especifica la información relativa a las herramientas de mecanizado. En cada operación se describe la herramienta adecuada. De esta forma, la información de la herramienta no es únicamente un número, tal y como sucedía con la programación de las máquinas de control numérico mediante códigos G y M.

La normativa ISO 14649 modeliza las herramientas utilizadas en los diferentes procesos. En concreto, la parte 121 describe las herramientas para torneado, mientras que la parte 111, pendiente de publicación, realizará lo mismo para las herramientas de fresado.

Estas partes de la norma muestran el sistema de información necesario para describir las herramientas, clasificando las herramientas por tipos. Por ejemplo, en la parte 121, en las herramientas de torneado, se han propuesto los siguientes tipos: torneado general, roscado, ranurado, moleteado y las especiales definidas por el usuario.

La información que se da de la herramienta en esta norma no coincide con la descripción completa de una herramienta, tal y como se muestra en un catálogo o inventario (Ref 112). Sólo se muestra la información básica de la herramienta, como sus dimensiones y el tipo de herramienta, sin indicar los adaptadores o los elementos auxiliares para realizar los montajes. Además, es posible dejar sin definir diversos atributos de la herramienta, que permiten flexibilizar su elección. Por ejemplo, en el mecanizado de un agujero es necesario definir el diámetro de la broca, pero puede no ser relevante la longitud de la broca.

Con este planteamiento, la máquina dispone de cierta flexibilidad a la hora de elegir la herramienta concreta que realizará la operación, pudiendo existir alternativas de herramientas que cumplan con los requerimientos de la operación, en relación al recurso herramienta.

### **1.2.1.2. Programación de la producción.**

La información sobre los componentes del producto (conjuntos, subconjuntos, componentes y materiales necesarios) especificados en su diseño, y de los procesos necesarios para su transformación (operaciones, máquinas, utillajes, herramientas, tiempos de preparación, etc.), que aporta el planificador de procesos, es necesaria para establecer el plan maestro de producción. Este plan maestro indica los productos a fabricar, su cantidad y plazo de entrega.

Para garantizar la viabilidad del plan maestro se realiza un plan de requerimientos de materiales y un plan de capacidades. El plan de

requerimientos de materiales (MRP) convierte el plan maestro de producción de productos finales en un plan de órdenes de producción y de compra de cada uno de los componentes y materias primas de dichos productos, teniendo en cuenta el inventario existente. El plan de requerimientos de capacidad determina los recursos necesarios (máquinas y mano de obra) para llevar a cabo el plan maestro de producción, comprobando que no se excede la capacidad del sistema productivo.

La programación implica pasar del plan maestro de producción, donde figuran las órdenes de producción a realizar a medio plazo, a la determinación concreta de cómo, dónde y cuándo se realizarán estos trabajos, es decir, una programación.

La programación es una de las tareas que más influyen en el buen funcionamiento de un sistema productivo, ya que la ejecución de los distintos trabajos implica el uso de los mismos recursos: máquinas, herramientas, transportes, etc. Los trabajos compiten unos con otros y, la programación es la encargada de asignar los distintos recursos a los trabajos para cumplir con las fechas de entrega previstas.

La asignación de los diferentes recursos a los trabajos de forma simultánea, supone resolver un problema de gran complejidad. Por ello, usualmente, el problema de la programación se ha abordado de forma separada para los diferentes recursos.

Dado que las máquinas se consideran el recurso más crítico, tradicionalmente se han programado en primer lugar los trabajos en las máquinas. De esta forma, se asignan los trabajos a las máquinas, fijando sus tiempos de inicio y finalización, de acuerdo al plan de producción establecido. Además de la información aportada por el planificador de procesos, es necesario disponer de todas las operaciones de transporte y mantenimiento, que requieren de unos tiempos de ejecución, muchas veces importantes, y que deben ser valorados para determinar la programación. Las programaciones usualmente se representan mediante un diagrama de Gantt (Fig 1-13), que muestra en ordenadas las máquinas y en abcisas los tiempos.

Tras la programación de los trabajos en las máquinas, se realiza la programación y la gestión del resto de recursos (herramientas, utillajes, etc.), para asegurar que dichos recursos se encontrarán en las máquinas, en los tiempos que son requeridos, para procesar los distintos trabajos ya programados.

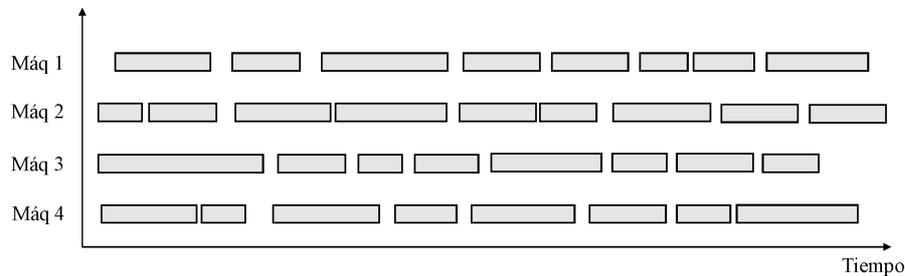


Fig 1-13. Diagrama de Gantt.

Actualmente, la mayor capacidad de los ordenadores ha hecho posible que la resolución del problema de programación se pueda realizar de forma simultánea para varios recursos. Tras plantear la resolución únicamente para el recurso máquina, el problema de programación se ha resuelto de forma conjunta para las máquinas junto con los transportes. Posteriormente, a estos dos recursos, se les han añadido otros, como las herramientas. Evidentemente, cada vez las resoluciones son más complejas, ya que, por ejemplo, en relación al recurso herramienta, hay que considerar la información relacionada con los tiempos de vida de las herramientas, la capacidad del almacén de herramienta de la máquina, los conflictos por la utilización de las herramientas en las operaciones de diferentes máquinas, etc.

La organización de los grupos de recursos en el sistema productivo, en líneas, células, etc. que se dedican a la fabricación de una determinada familia de piezas, permiten simplificar el problema de la programación. De esta forma, es posible resolver la programación para cada una de estas unidades, que trabajan con un número más reducido de máquinas, herramientas, utillajes, etc.

### 1.2.2. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN.

En la actualidad, las características del mercado demandan respuestas rápidas por parte de las empresas, a las necesidades cada vez más cambiantes de los consumidores. Las empresas deben proporcionar los productos y/o servicios adecuados para sobrevivir en un mercado competitivo, globalizado, y caracterizado por productos que tienen ciclos de vida cada vez más cortos, y que se demandan en lotes más pequeños, con una calidad aceptable y un bajo coste (Ref 54).

La continua evolución que han experimentado los sistemas de fabricación en las últimas décadas, para adaptarse a las necesidades de este mercado tan

cambiante, se muestra en la Fig 1-14. En esta evolución se han tratado de aprovechar las ventajas de la producción en masa para fabricar los productos personalizados que demanda el consumidor, llegando incluso a la fabricación de un solo producto de un tipo (one-of-a-kind-production OKP), es decir, que cada producto se produce una única vez (Ref 109). Por ello, los sistemas productivos han cambiado sus objetivos y estrategias para aumentar su flexibilidad, productividad, agilidad, calidad, la reducción del desperdicio, etc., y adaptarse a las nuevas exigencias del mercado.

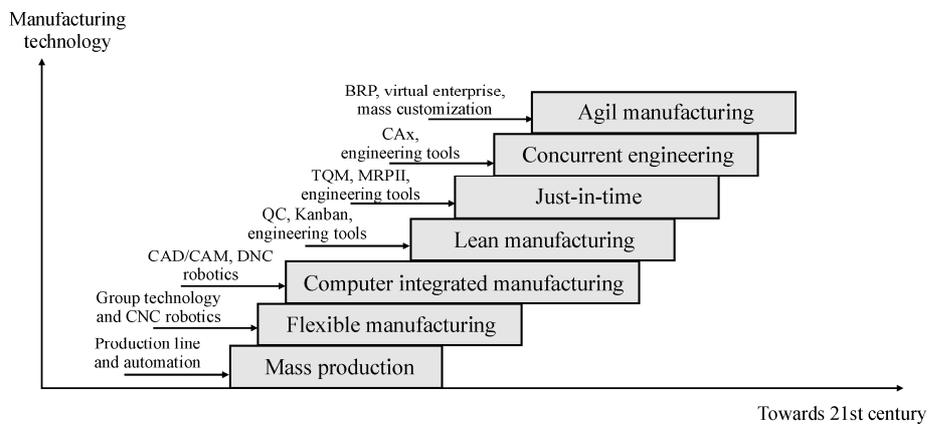


Fig 1-14. Evolución de la fabricación (Ref 16).

La fabricación ágil, que es el resultado de la evolución de los paradigmas anteriores, que se muestran en la Fig 1-14, se puede definir como un modelo de producción que integra la tecnología, los recursos humanos y la organización, a través de una infraestructura informativa y de comunicación que otorga flexibilidad, rapidez, calidad y eficiencia, y permite responder de forma deliberada, efectiva y coordinada ante cambios del entorno, para suministrar productos personalizados (Ref 16).

Esta nueva era, basada en el cambio como principal característica, ha provocado la aparición de nuevas tendencias en la gestión y la organización de las empresas, no sólo en el ámbito interno, sino también en el externo, gracias a las nuevas tecnologías de gestión del conocimiento y de la información. En este ambiente tan competitivo, las empresas se agrupan para unir sus esfuerzos y poder cumplir con los requerimientos de los clientes. Esta cooperación entre empresas ha dado lugar al paradigma de empresa virtual, que representa la unión temporal de empresas, que comparten habilidades y recursos para dar una mejor respuesta a las oportunidades de negocio existentes en el mercado, y en las que la cooperación es soportada

por las redes de ordenadores (Ref 18). Evidentemente, en este entorno de fabricación es necesaria una colaboración y sincronización de las funciones de fabricación, gestionando adecuadamente tanto las restricciones geográficas como las temporales (Ref 6).

La evolución de la fabricación para adaptarse a estos cambios ha hecho que en los últimos años aparezca el concepto de fabricación basada en Internet. La fabricación basada en Internet aprovecha los sistemas, programas, herramientas y aplicaciones basados en web, de forma que los distintos grupos de trabajo que llevan a cabo las funciones de fabricación puedan colaborar entre sí (Ref 40).

La tendencia hacia la fabricación basada en Internet está ligada con la fabricación global, la fabricación distribuida y la fabricación colaborativa (Ref 103). La fabricación global tiene como objetivo satisfacer la demanda global de bienes y servicios, a través de factorías dispersas geográficamente alrededor del mundo. El término fabricación distribuida se aplica cuando las diferentes funciones de fabricación se realizan de manera distribuida, principalmente geográficamente. Finalmente, se aplica el término de fabricación colaborativa cuando se utilizan las tecnologías de la información y comunicación para intercambiar datos, información y conocimiento entre los distintos grupos de trabajo.

Esta nueva forma de fabricar, ha hecho que las empresas tengan que migrar de las actividades tradicionales asistidas por computador (CAD, CAPP, CAM, etc.) que se separaban del funcionamiento global de la empresa, a actividades basadas en e-manufacturing, que han hecho posible que estas actividades (CAD, CAPP, CAM) se desarrollen en un entorno colaborativo (Ref 73).

Por otro lado, la disminución de los plazos de entrega a los clientes hace necesario la adopción de un enfoque concurrente, integrando el diseño del producto con su posterior fabricación y soporte. Es decir, que todos los elementos que componen el ciclo de vida del producto, desde la definición de su funcionalidad, la fabricación, el montaje, la inspección, el mantenimiento, el impacto ambiental, hasta su retirada y reciclado deben ser considerados en las primeras fases del diseño. De esta forma, es posible realizar rediseños, cuando el proyecto aún se encuentra en una fase inicial, lo que permite reducir los costes asociados.

En este entorno de fabricación colaborativa y concurrente y, teniendo en cuenta las funciones más relacionadas con las herramientas, como son la planificación de procesos y la programación de la producción, es necesario establecer una colaboración entre el CAD, el CAPP y el CAM que permita

que los diferentes equipos de trabajo puedan colaborar entre sí y reaccionar ante imprevistos de forma ágil (Fig 1-15).

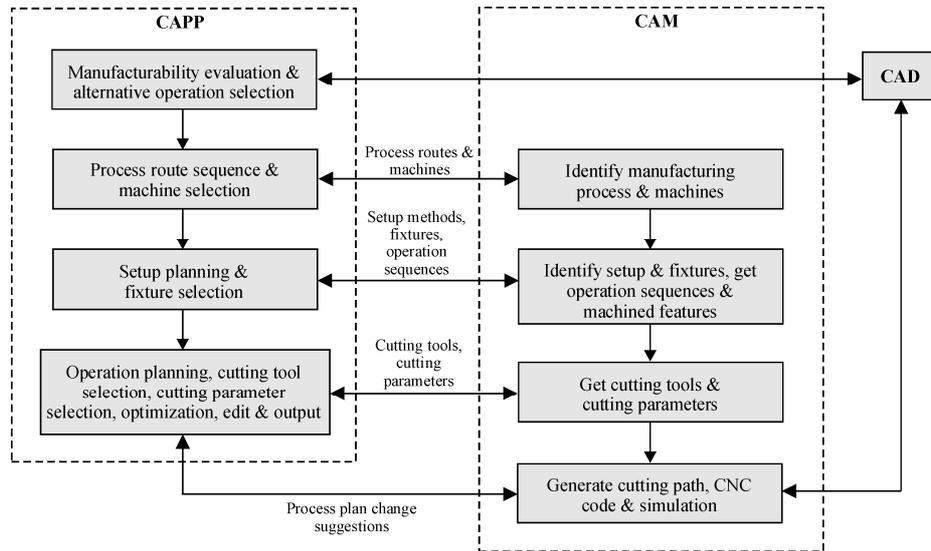


Fig 1-15. Colaboración entre el CAPP/CAM (Ref 73).

En el ámbito del CAPP, esta colaboración se puede realizar mediante grupos de trabajo y herramientas software, permitiendo a los colaboradores interactuar con el plan de proceso a medida que se está generando, así como permitir que se realicen modificaciones de los planes en función del estado del sistema productivo cuando se lance la fabricación de los productos.

Centrándonos en el CAPP, y desde el punto de vista de la tesis, es necesario que se ofrezcan alternativas en los planes de proceso, a nivel de procesos y recursos (máquinas, utillajes y herramientas). En relación a las herramientas, la generación de alternativas de herramientas en las operaciones puede suponer tanto la utilización de las herramientas existentes en el sistema productivo, como el diseño de herramientas especiales, lo que requiere una colaboración con el CAD para definir dicho diseño.

En el ámbito del CAM, en función de las alternativas proporcionadas por el planificador de procesos, los productos a fabricar y la disponibilidad de los recursos, se seleccionarán las alternativas más adecuadas, generando las programaciones de utilización de los diferentes recursos. La colaboración entre los diferentes grupos de trabajo permite reaccionar de forma ágil ante imprevistos. Cuando ha tenido lugar una incidencia en el funcionamiento del sistema productivo (como puede ser una rotura de máquina), se pueden

replantear los recursos a utilizar, seleccionando nuevas alternativas de entre los recursos disponibles, a la vez que realizando nuevas programaciones si fuese necesario.

Uno de los problemas a los que se enfrenta la planificación de procesos colaborativa es la gestión de los recursos de fabricación. Para resolver este problema, Zhou et al. (Ref 115) proponen la utilización de multiagentes, en un entorno cliente-servidor. De esta forma, cada grupo de trabajo dispone de un agente que contiene la información de los recursos de fabricación, como equipos, herramientas, materiales, utillajes, etc. (Fig 1-16). Cada planificador puede seleccionar los recursos adecuados y esta información se actualiza en el resto de agentes y en el servidor. En relación a las herramientas de mecanizado, cada agente dispone de información sobre los componentes de las herramientas, como materiales, dimensiones, etc., sobre las recomendaciones de las condiciones de corte, etc.

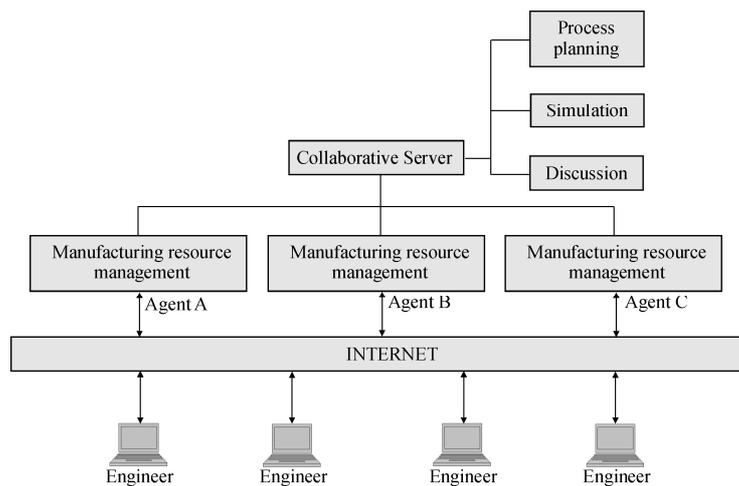


Fig 1-16. Propuesta de Zhou (Ref 115).

Xu et al. (Ref 110) han realizado algunas aplicaciones dentro de la fabricación colaborativa, relacionada con el Standard STEP-NC. En esta propuesta se ha separado la información genérica de fabricación (qué hacer) de la información específica de la máquina de control numérico (cómo hacerlo). En la Fig 1-17 se muestra una arquitectura basada en web, donde se muestra las interacciones del CAD, el CAPP y las máquinas de control numérico, utilizando el estándar STEP-NC y el lenguaje XML para representar la información en las bases de datos.

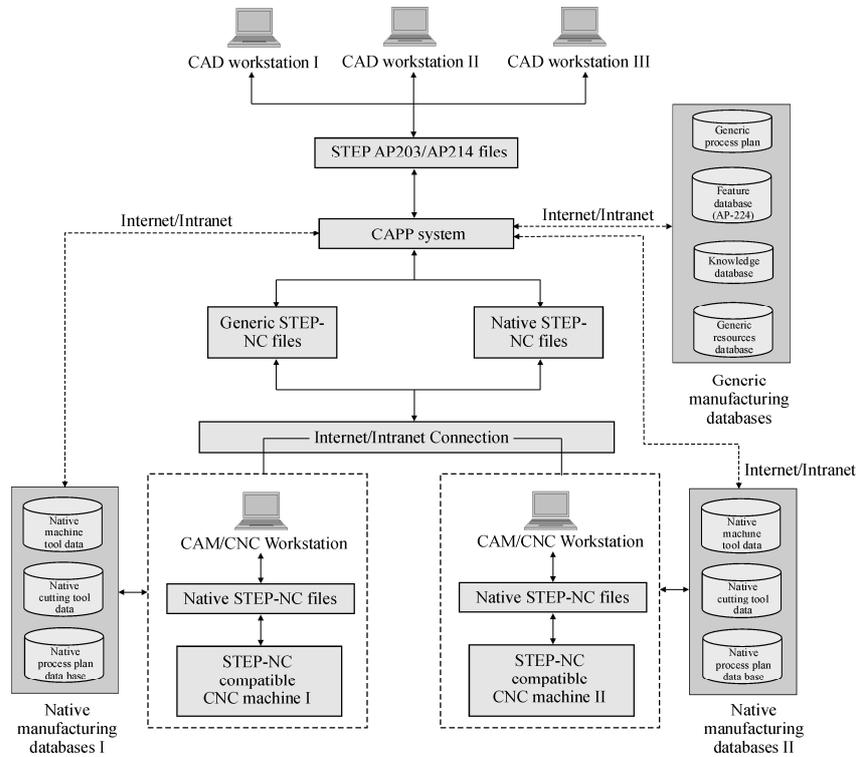


Fig 1-17. Modelo de fabricación colaborativa (Ref 110).

### 1.2.3. ORGANIZACIÓN DE LOS RECURSOS PRODUCTIVOS.

La fabricación de piezas conformadas por eliminación de material, necesita de unos recursos para transformar la materia prima en producto acabado. Estos recursos están constituidos por recursos materiales y humanos. Entre los recursos materiales se encuentran las máquinas, las herramientas, los utillajes, los sistemas de transporte y manipulación de materiales, los sistemas de almacenamiento, etc.

Las máquinas representan el recurso más crítico, por lo que su organización condiciona tanto el flujo de piezas como el flujo y la gestión del resto de recursos.

Las herramientas se utilizan en las diferentes operaciones de mecanizado para obtener la pieza. La gran cantidad de herramientas, su preparación,

montaje, transporte, cambios de filos, etc. hace que sea importante una buena gestión de este recurso para disminuir los tiempos no productivos en las máquinas. Existen entornos productivos en los que las herramientas no se encuentran asignadas a una única máquina, sino que se pueden compartir entre diferentes máquinas. En este caso, la coordinación del flujo de herramientas en el sistema productivo es un aspecto relevante de la gestión del recurso herramienta.

La organización física de los recursos en el sistema productivo se puede realizar de distintas formas, por posiciones fijas o de proyecto, por procesos o secciones homogéneas y por flujo de producto. La organización celular, que combina la organización basada en el proceso y en el producto, y se asocia con la tecnología de grupos, agrupa a un conjunto de máquinas para la fabricación de una determinada familia de piezas, teniendo como objetivo que las series cortas o medias se beneficien de las ventajas que aporta la fabricación de las series largas. Aunque este tipo de organización da buenos resultados para la fabricación de determinadas familias de piezas, cuando se producen cambios en la demanda, reorganizar las células, modificando el layout de las máquinas, para responder a las fluctuaciones del mercado, supone un gran coste y consume un gran tiempo, lo que hace que la respuesta a estos cambios no sea ágil (Ref 83).

Actualmente, más que organizar los recursos siguiendo el modelo celular, se ha planteado trabajar con lo que se ha acuñado con el nombre de célula virtual. Una célula virtual está formada por un grupo de recursos dedicados a la fabricación de una familia de piezas, aunque físicamente las máquinas que componen la célula no se encuentren juntas. Uno de los aspectos fundamentales en las células virtuales es la separación entre el layout de los recursos y la forma en la que se controlan y organizan las actividades de fabricación. En relación a la definición de una célula virtual, en la literatura se ha hecho referencia a tres tipos de recursos: las máquinas, la mano de obra y los sistemas de manipulación (Ref 78). Los recursos que forman parte de una célula virtual lo hacen mientras se fabrica una determinada familia de piezas o una única pieza. Una vez ha finalizado dicha fabricación, los recursos pueden ser asignados a diferentes células virtuales para la fabricación de otras familias. Por ello, las células virtuales aparecen y desaparecen a lo largo del tiempo, en función de los requerimientos de producción (Ref 19).

Las células virtuales se implantan sin necesidad de cambiar el layout. En orden a programar un entorno de fabricación compuesto por células virtuales, es necesario identificar las diferentes familias de productos a fabricar. Estas familias se asignarán a determinadas máquinas. Al realizar esto, las máquinas se prepararán para la fabricación de determinadas familias, con lo que los

tiempos de preparación disminuirán entre piezas pertenecientes a la misma familia. El trabajo realizado por Kankan et al. (Ref 49) estudia la programación de células virtuales considerando diferentes familias de piezas, distintos tiempos de preparación en las máquinas y la variación de la demanda.

Entre los recursos asignados a la célula virtual se encuentran las herramientas de mecanizado. Las herramientas asignadas son gestionadas para dar servicio a la célula virtual, coordinando su preparación, reglajes, transporte, etc. en función de la programación establecida para la célula. Las herramientas se asignan a la célula virtual en función de las máquinas que componen la célula, las piezas a fabricar y los requerimientos de herramientas del resto de células virtuales del sistema productivo.

### **1.3. PROGRAMACIÓN Y GESTIÓN DE HERRAMIENTAS DE MECANIZADO.**

Para garantizar que las herramientas adecuadas se encuentran disponibles, en las máquinas que las necesitan, para procesar los diferentes lotes, y en los instantes que se requieren, es necesario establecer una programación de utilización de las herramientas, así como una gestión de las tareas de más bajo nivel relacionadas con las herramientas, como preparaciones, transportes, etc. Los requerimientos que debe poseer un gestor de herramientas son (Ref 96):

- Generalidad, para adaptarse a distintos entornos productivos.
- Integración con el resto de funciones de fabricación.

La implantación de un gestor eficaz de herramientas en un sistema productivo proporciona las siguientes ventajas:

- Reduce el coste de inversión de las herramientas, ya que racionaliza el uso del conjunto de las herramientas, permitiendo una mejor utilización de las herramientas disponibles.
- Identifica las carencias de herramientas en el sistema productivo.
- Reduce los tiempos no productivos de las máquinas, debidos a la falta de herramientas.
- Permite reaccionar con mayor rapidez ante imprevistos relacionados con las herramientas.
- Mejora la flexibilidad del sistema productivo.

Para cumplir con estas características, las funciones relacionadas con las herramientas se pueden agrupar en dos niveles claramente diferenciados:

- Un nivel organizativo, encargado de asignar las herramientas a las operaciones y de realizar una programación de las herramientas, de forma que se asegure que las herramientas adecuadas estarán en las máquinas necesarias en los instantes de tiempo requeridos.
- Un nivel operativo o de taller, encargado de realizar las actividades físicas relativas a las herramientas, como son la preparación, los transportes y los reglajes, garantizando que se cumple con la programación establecida.

El mantenimiento de la información correspondiente a las herramientas es importante para una gestión eficaz de las mismas. Dado el dinamismo de este recurso, es posible distinguir dos tipos de información asociada a las herramientas: en primer lugar, información que permanece constante en periodos largos de tiempo, como el catálogo de herramientas, las instrucciones de montaje, etc; por otro lado, información que varía a corto plazo, y que está relacionada con la utilización de las herramientas en el proceso productivo, como puede ser la localización de las herramientas, las herramientas a utilizar en cada periodo de producción, el estado de las herramientas, etc. Esta última información debe ser actualizada continuamente para que el gestor trabaje adecuadamente y pueda reaccionar ante imprevistos que afecten a las herramientas, como puede ser una rotura, etc. Actualmente, la norma ISO 13399 (Cutting tool data representation and exchange) ha desarrollado las estructuras de información necesarias para describir las herramientas de mecanizado, potenciando la creación de un catálogo informático de herramientas que se pueda utilizar por los usuarios, vendedores, fabricantes, etc.

### **1.3.1. PROGRAMACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS.**

La programación de las herramientas detalla todas las actividades relativas a las herramientas en el taller, para garantizar que las herramientas estarán en las máquinas adecuadas en los tiempos requeridos. La tarea de programación de las herramientas es bastante compleja, debido al dinamismo del recurso y a que el número de herramientas utilizadas es bastante superior al de los lotes a fabricar.

La programación de las herramientas de mecanizado se puede abordar bajo dos planteamientos (Ref 10). En el primero de ellos se realiza la programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas de forma simultánea (Ref 59, Ref 85). En el segundo de ellos, se programan primero

los trabajos y posteriormente las herramientas, para cumplir con los requerimientos de los trabajos en las máquinas (Ref 82).

La programación simultánea de los trabajos y las herramientas aumenta la complejidad del problema de programación, debiendo resolver, a la vez que la programación de los trabajos, los conflictos de las herramientas. Estos conflictos aparecen, por ejemplo, cuando se requiere la utilización simultánea de la misma herramienta en operaciones que se ejecutan en diferentes máquinas.

La programación independiente de los trabajos y las herramientas supedita la programación de utilización de las herramientas en las máquinas a los requerimientos de los lotes, previamente programados. Con este planteamiento, es posible que se tengan que retrasar algunos trabajos si existe escasez del recurso. Por ejemplo, si no existen suficientes réplicas de un determinado tipo de herramienta para asignar a diferentes máquinas en los mismos instantes de tiempo.

Se adopte el planteamiento que se adopte, una vez se ha determinado la programación de utilización de las herramientas en las máquinas, para que las herramientas se encuentren en las máquinas en los tiempos requeridos, es necesario programar las tareas de más bajo nivel relacionadas con las herramientas. Estas tareas comprenden la preparación de las herramientas, los prerreglajes, los cambios de filo por desgaste, el transporte de las herramientas hasta las máquinas, su carga en el almacén de la máquina y los reglajes, así como su posterior descarga, transporte y desmontaje. Todas estas actividades se deben realizar con la antelación suficiente para no detener la producción de las máquinas.

Los cambios de filo por desgaste se determinan estimando el tiempo de duración de la herramienta trabajando con las condiciones de corte especificadas por el planificador de procesos, y conociendo la utilización anterior de la herramienta.

En la mayoría de los casos, la cantidad de herramientas requeridas para procesar varios lotes en una máquina es generalmente mayor que la capacidad del almacén de la máquina. Por lo tanto, es necesario determinar las cargas y descargas de herramientas entre la ejecución de los lotes, para que las herramientas adecuadas estén disponibles en el almacén de la máquina. En ciertos casos, no es posible cargar tantas herramientas como alojamientos tiene el almacén de herramientas, debido a las dimensiones y peso de las herramientas. Existen herramientas que por sus dimensiones no permiten cargar otras herramientas en posiciones contiguas del almacén. Por otro lado, el almacén de la máquina tiene limitado el peso total de las

herramientas que puede cargar. Debido a estas causas, el número de herramientas que pueden cargarse en el almacén de la máquina disminuye.

La función de programación, una vez conocidas las herramientas a utilizar en el mecanizado de cada lote, junto con sus instantes de cambio de filos y de carga y descarga en el almacén de la máquina, generará las órdenes de montaje y transporte necesarias para preparar y llevar las herramientas requeridas a las máquinas.

### 1.3.2. NIVEL OPERATIVO.

Las actividades relacionadas con las herramientas en el taller incluyen la ejecución de todas las tareas físicas que tienen como fin conseguir que las herramientas se encuentren en las máquinas adecuadas para realizar el mecanizado. Las herramientas son controladas desde que entran en la planta, hasta que la abandonan porque han perdido su capacidad de corte, han sido sustituidas por otras nuevas herramientas o porque ya no son necesarias para producir las piezas por cambios en la demanda. La Fig 1-18 muestra el flujo de herramientas y las tareas físicas a realizar en el taller.

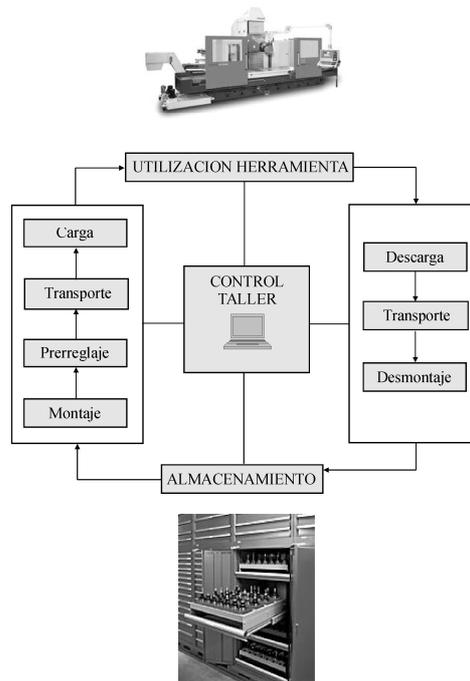


Fig 1-18. Flujo de herramientas en el taller.

Estas tareas se realizan según la programación de herramientas establecida y pueden agruparse en tres grandes grupos: preparación, transporte y monitorización.

- La preparación de las herramientas incluye las tareas de montaje de todos los componentes de la herramienta, su posterior reglaje y, tras el mecanizado, las operaciones de desmontaje y puesta a punto o cambio del filo.
- Los transportes de herramientas se encargan de llevar las herramientas a las máquinas, a las estaciones de prerreglaje y de vuelta a los almacenes.
- La monitorización consiste en el control del desgaste de la herramienta, para poder comparar este valor con las estimaciones realizadas.

En el nivel operativo, las herramientas se utilizan en las máquinas de control numérico para mecanizar los lotes de piezas. En las máquinas con controles numéricos tradicionales, los parámetros de mecanizado se seleccionan en base a las recomendaciones de los fabricantes y a la experiencia del usuario, con anterioridad al mecanizado del lote. Esta forma de proceder, hace que las condiciones de mecanizado de las herramientas sean más bien conservadoras, para evitar fallos durante el mecanizado.

En las máquinas que disponen de un control numérico adaptativo, se pueden variar las condiciones de mecanizado en tiempo real (Ref 61). Estas variaciones se realizan en función del estado del proceso de mecanizado, donde influyen los cambios de dureza del material, el desgaste de la herramienta, la cantidad de material a quitar, etc.

Los controles adaptativos permiten monitorizar diferentes variables, como la potencia consumida, la fuerza de corte, las vibraciones, etc. (Ref 25). En función de los valores de estas variables, permiten ajustar de forma automática las condiciones de corte (principalmente la velocidad de avance y la de corte) en tiempo real. Para ello, es necesario establecer la correlación entre las variables medidas con el proceso de mecanizado. Esto se suele realizar mediante la utilización de sistemas expertos, redes neuronales, etc. (Ref 1).

La utilización de controles adaptativos permite ajustar las condiciones de corte de la herramienta, lo que conduce a una mayor productividad. Por otro lado, mediante el control adaptativo es posible detectar los desgastes prematuros de la herramienta. De esta forma, se puede sustituir la herramienta antes de que falle, disminuyendo los daños en la pieza y la

posible rotura de la herramienta. La utilización de alternativas de herramientas en las operaciones permite agilizar estos cambios, lo que conlleva una disminución de los tiempos no productivos.

### **1.3.3. NORMATIVA ISO 13399.**

Como ya se ha comentado, la normativa ISO 14649 permite transmitir a la máquina las características básicas de las herramientas a utilizar en las distintas operaciones y sus condiciones de trabajo, siendo la máquina la que selecciona la herramienta adecuada de entre las disponibles.

En un sistema integrado, el sistema de información y la gestión de datos relativa a las herramientas es importante para tener una organización eficaz de las mismas. Hasta hace poco tiempo, los sistemas de información utilizados para representar las herramientas estaban orientados y configurados en función de la aplicación que los iba a utilizar. Se disponía de una base de datos para el CAD, otra para el CAPP, etc., siendo la definición de modelos de representación de las herramientas distintos en cada una de ellas. De esta forma, cuando se producía cualquier cambio se debían actualizar todas las bases de datos.

Actualmente, se ha desarrollado la normativa ISO 13399: Cutting tool data representation and exchange (Ref 45) con el propósito de proporcionar estructuras de información adecuadas para una representación informática de las herramientas de mecanizado, potenciando la creación de un catálogo electrónico de herramientas. Para ello se definen los componentes de las herramientas y sus atributos, de manera informática.

La normativa ISO 13399 no establece estándares para las herramientas de mecanizado, sino únicamente unifica la representación de la información de las herramientas, permitiendo describir las herramientas. La ventaja más importante es que esta representación facilita el uso, manipulación e intercambio de los datos de las herramientas de mecanizado mediante diferentes aplicaciones informáticas.

En esta norma las herramientas se representan como un conjunto de elementos, definiendo cada uno de los componentes y las relaciones entre ellos. Estos componentes se clasifican en elementos cortantes, portaherramientas, adaptadores y elementos de montaje.

Los elementos cortantes representan la parte de la herramienta que elimina el material de la pieza (plaquitas, elementos soldados o las partes de corte de las herramientas sólidas). Los portaherramientas representan la parte de la herramienta que soporta a uno o más elementos cortantes con filos definidos.

Los adaptadores representan las partes de la herramienta que permiten el acoplamiento del elemento cortante en la máquina. Los elementos de montaje permiten el montaje o unión entre los componentes de la herramienta de mecanizado.

La normativa ISO 14649 y la normativa ISO 13399 se complementan entre sí. Con la información básica de la herramienta proporcionada por la norma ISO 14649, se puede acceder al catálogo de herramientas generado a través de la normativa ISO 13399, seleccionando de entre las alternativas posibles, la herramienta adecuada para cada operación.



---

## **CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.**

La gestión de las herramientas de mecanizado se ha considerado un problema importante desde los últimos treinta años. Anteriormente, la gestión de herramientas no se había tratado en profundidad, ya que la fabricación por lotes del sector metal-mecánico se caracterizaba por una baja utilización de los equipos y un elevado grado de trabajo en curso (Ref 4, Ref 80), por lo que las herramientas no se consideraban un problema importante. Sin embargo, en las últimas décadas, como consecuencia del aumento del grado de automatización de los sistemas productivos y de la aparición de la fabricación integrada, han surgido numerosos estudios sobre la gestión de herramientas de mecanizado, tras constatar que ‘las herramientas pueden limitar la capacidad de procesar piezas en los sistemas productivos’ (Ref 35, Ref 55, Ref 113).

La revisión del estado del arte se va a exponer estructurada de acuerdo a los objetivos de la tesis. El objetivo con el que comenzó la tesis fue el desarrollo de una propuesta funcional para la gestión de las herramientas de mecanizado, integrada con la planificación de procesos y la programación de la producción. Por ello, se han analizado las funciones propuestas por los diferentes trabajos de la literatura, relativas a la gestión de herramientas de mecanizado. En estos trabajos, y bajo la denominación de gestión de herramientas se suele incluir tanto la programación de herramientas como la

gestión de las actividades relacionadas con las herramientas en el taller, como su preparación cambios, transportes, etc. (Ref 2, Ref 13).

En la tesis, además de la propuesta de gestión de herramientas se ha desarrollado también una propuesta de programación de herramientas. Esta propuesta está basada en la utilización de la capacidad de generación de alternativas de herramientas por la planificación de procesos asistida por ordenador, que va a permitir realizar una programación de los trabajos en las máquinas, independiente del recurso herramienta. Para ello, en un paso posterior, es necesario resolver las interferencias o incompatibilidades de las alternativas propuestas por el planificador de procesos con la programación de los trabajos, lo que da lugar a la programación de las herramientas.

En relación a la propuesta de programación de las herramientas en las máquinas, y su integración con la planificación de procesos y la programación de la producción, se va a realizar una revisión de los trabajos relacionados con este planteamiento. Por ello, se revisará la integración de la planificación de procesos y la programación y la gestión de herramientas, a través del uso de planes de proceso con alternativas. En cuanto a la programación de las herramientas, se expondrán las dos aproximaciones existentes en la literatura, la programación independiente o no simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas, y la programación simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas.

## **2.1. FUNCIONES BÁSICAS EN LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS.**

Desde un punto de vista amplio, la gestión de las herramientas incluye a todo el personal, equipos, información y estructuras relacionados con las herramientas en un sistema de fabricación, desde la gestión de sus compras hasta su utilización en el taller y posterior retirada (Ref 96).

Los primeros trabajos que abordaron la gestión de las herramientas de mecanizado se remontan a mitad de la década de los ochenta. Aunque estos trabajos son antiguos, se van a exponer, por orden cronológico, los que se consideran más relevantes, y que tratan las principales funciones o tareas que se engloban en la gestión de las herramientas.

Los trabajos relacionados con las herramientas de mecanizado se centran, fundamentalmente, en alguno de los siguientes ámbitos: la gestión de proveedores, la selección de herramientas y de sus condiciones de corte, la programación de herramientas y la gestión de herramientas en el taller.

Centrándonos en la utilización de las herramientas en el taller, uno de los primeros trabajos que definieron la gestión de herramientas es el de Mason (Ref 66). Mason definió la gestión de herramientas como la capacidad de disponer de las herramientas adecuadas, en las máquinas apropiadas, en el tiempo que se requieren, manteniendo una utilización aceptable del recurso, para cumplir con los requerimientos de los trabajos a fabricar, siendo uno de los objetivos fundamentales del gestor garantizar que no se producen retrasos en las programaciones previstas de los lotes, debido a la escasez de las herramientas.

La gestión de herramientas no consiste en la ejecución de una única función aislada en el sistema productivo, sino que engloba a un conjunto de funciones o actividades (Ref 30). Estas funciones, sus relaciones y su orden de ejecución representan la metodología y la arquitectura funcional de la gestión de herramientas.

Tradicionalmente, la gestión de herramientas se ha referido a las actividades más visibles relacionadas con el recurso, como el mantenimiento de su inventario, el transporte de las herramientas, su carga y descarga en las máquinas, etc. Sin embargo, a partir de la década de los ochenta comienzan a surgir diferentes trabajos que tratan y clasifican las funciones incluidas en la gestión de herramientas. La mayoría de estos trabajos realizan propuestas sobre la gestión de herramientas, centrándose en su uso en el taller o enlazando con otras actividades relativas a las herramientas en el sistema productivo, como pueden ser la planificación de procesos, la gestión de las compras de las herramientas, etc. Seguidamente, se comentarán los trabajos más relevantes que han tratado las funciones que se engloban en la gestión de herramientas.

De entre los primeros trabajos que realizan un estudio en profundidad sobre las herramientas, destaca el elaborado por Mason (Ref 66). Este trabajo realiza un estudio exhaustivo sobre las herramientas, identificando las siguientes funciones relacionadas con las herramientas en entornos automatizados.

- Compra de herramientas. Esta función se encarga del abastecimiento de herramientas en el sistema productivo, que se realiza a través del departamento de compras.
- Asignación y programación de herramientas. Esta función selecciona las herramientas concretas para cada operación de mecanizado, especificando sus tiempos de utilización en la máquina, y los transportes hasta la máquina. Para ello, debe conocer la variedad de productos a fabricar, el tamaño de los lotes, el plan de

proceso, la programación de los trabajos y los requerimientos de herramientas.

- Control del almacén central de herramientas. Esta función incluye todas las actividades realizadas en el almacén central de herramientas, como el control de inventario, los montajes, los desmontajes, los prerreglajes, los afilados, etc.
- Control del flujo de herramientas. Esta función incluye las actividades relacionadas con el movimiento de las herramientas en el sistema productivo.
- Monitorización. Esta función se encarga de la monitorización de las herramientas, para controlar su desgaste.
- Almacenamiento informático de datos. Esta función mantiene los datos correspondientes a las herramientas, tales como su descripción, su localización, su desgaste, etc., permitiendo, por ejemplo, el trasvase de los correctores de las herramientas a las máquinas.

Las funciones propuestas por Mason han sido adoptadas por la mayoría de los autores (Ref 69, Ref 108) en mayor o menor medida, aunque algunos autores agrupan estas funciones en distintos niveles jerárquicos o temporales (Ref 12, Ref 13, Ref 27, Ref 30, Ref 35, Ref 64, Ref 88).

En la misma época que el trabajo de Mason, apareció el trabajo de Ber y Falkenburg (Ref 12). Este trabajo presenta el diseño de un sistema de control de las herramientas, integrado en la propuesta de control jerárquica de un sistema productivo (Fig 2-1).

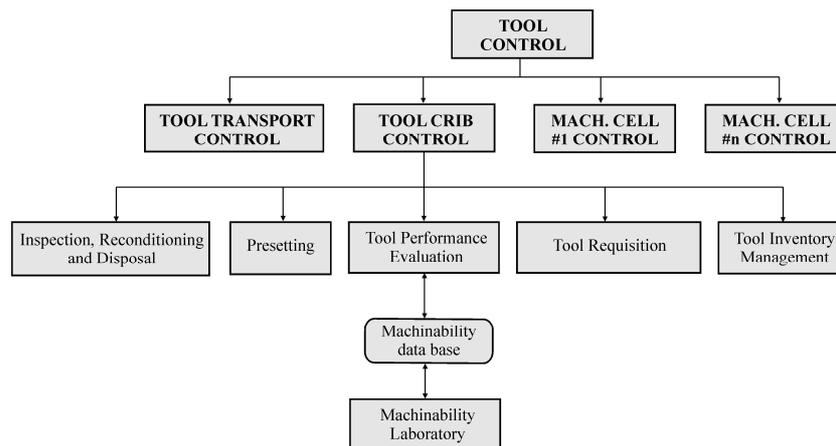


Fig 2-1. Propuesta de Ber y Falkenburg (Ref 12).

Este trabajo realiza un estudio sobre el control de las herramientas en el taller, haciendo incidencia en las actividades relacionadas con el control del almacén (tool crib control). Entre las funciones propuestas, destacan la especificación de los requerimientos de las herramientas (tool requisition) y el control de inventario (tool inventory management). La primera de ellas se encarga de determinar la cantidad de herramientas necesarias. Para ello se basa en las lotes a mecanizar y la información sobre los tiempos de vida, asignando las herramientas a las operaciones en función de la disponibilidad de herramientas. La segunda de ellas tiene como actividades principales la agrupación de las herramientas por tipos y la optimización del número de herramientas del inventario para dar servicio a los lotes, es decir, el grado de duplicidad de herramientas requerido.

Posteriormente, Eversheim et al. (Ref 27) realizaron un estudio sobre el estado del arte de las herramientas, clasificando las funciones a desarrollar en su gestión en dos grandes niveles o áreas, un nivel de planificación y control de las herramientas y un segundo nivel de taller o shop-floor. En este trabajo, se hace referencia a la necesidad de disponer de un sistema de información relativo a las herramientas, que dé soporte a las funciones que se incluyen en cada nivel (Fig 2-2). Este sistema debe ser capaz de recoger la información del taller relativa a las herramientas, mostrando en tiempo real el estado del recurso, así como de incorporar sistemas de información que modelen los recursos de fabricación, y que garanticen el intercambio de información entre las distintas aplicaciones.

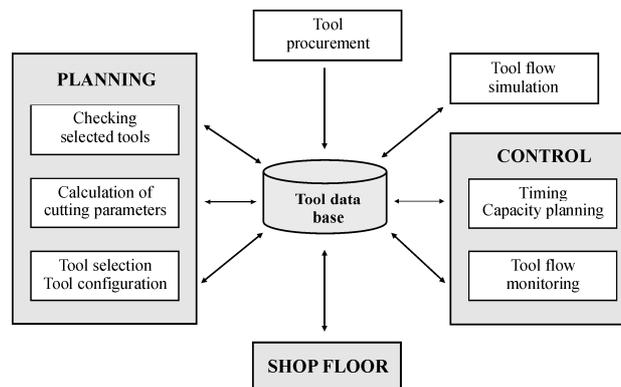


Fig 2-2. Propuesta de Eversheim et al. (Ref 27).

- El nivel de planificación y control engloba las funciones relacionadas con la planificación, el control y la programación de las herramientas. Este nivel incluye, tanto las actividades ejecutadas por

el planificador de procesos, como son la selección de herramientas y las condiciones de corte, como la planificación de requerimientos de herramientas, es decir, la asignación de las herramientas concretas a las operaciones, y su programación de utilización, para asegurar el suministro de herramientas a las máquinas.

- En el nivel de taller, se incluye las actividades físicas relacionadas con el almacenamiento, la preparación y el flujo de las herramientas, además de la función de monitorización. La programación de las herramientas realizada en el nivel anterior es la base para la ejecución de estas actividades. Ranky (Ref 87) clasificó las funciones del taller en dos grandes grupos. El primer grupo se encarga de la preparación de las herramientas, que se lleva a cabo en los almacenes de las herramientas, previamente a la fabricación (off-line). El segundo grupo engloba las actividades relacionadas con el funcionamiento en tiempo real (on-line) del sistema productivo, como el transporte, las cargas y descargas, etc. La ejecución de todas estas actividades está condicionada por el nivel de automatización existente en el sistema productivo. En este sentido, ElMaraghy (Ref 26) realizó un estudio sobre los distintos grados de automatización relacionados con los sistemas de transporte, el almacenamiento y la carga y descarga de las herramientas, como requisito para la fabricación desatendida. La Fig 2-3 muestra las actividades incluidas en el nivel de taller.

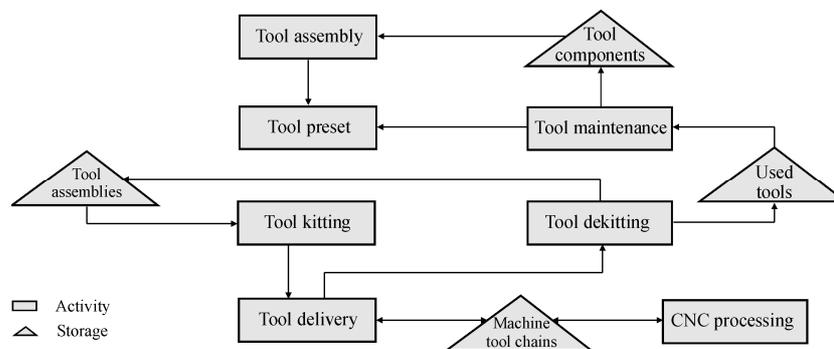


Fig 2-3. Actividades incluidas en el nivel de taller (Ref 87).

Los dos niveles propuestos por Eversheim et al. deben estar integrados, ya que tanto la asignación de las herramientas concretas a las operaciones como la programación de las herramientas son funciones complejas. Estas funciones integran los requerimientos de herramientas necesarios para la

fabricación de los lotes, que provienen de un nivel estratégico superior, con el estado del recurso herramienta en el taller (Ref 95). Esta complejidad radica en la necesidad de tener actualizada la información en tiempo real relacionada con las herramientas, como su disponibilidad, localización, tiempos de vida, etc., para así poder realizar las asignaciones y la programación (Fig 2-4). En este sentido, Maropoulos (Ref 65) realizó una revisión del estado del arte relativa a las herramientas, atendiendo tanto a los aspectos tecnológicos como de gestión, destacando la importancia de su integración para un buen funcionamiento.

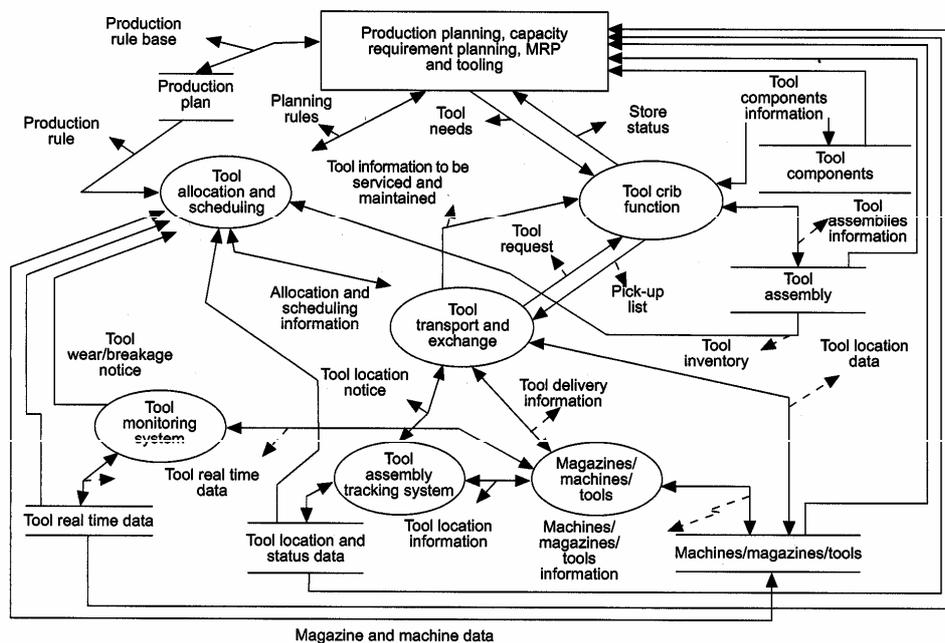


Fig 2-4. Integración de niveles (Ref 95).

Posteriormente, en la década de los noventa, destacan como trabajos más relevantes, el de Frechette (Ref 30), el de Gray et al. (Ref 35) y el de Maccharoli et al. (Ref 64). El trabajo de Frechette propone una arquitectura de control modular para un gestor de herramientas, integrado con el resto de funciones de fabricación, como la planificación de procesos y la programación de la producción, en un entorno de fabricación celular. Su propuesta considera como principales áreas en la gestión de herramientas las que se muestran en la Fig 2-5.

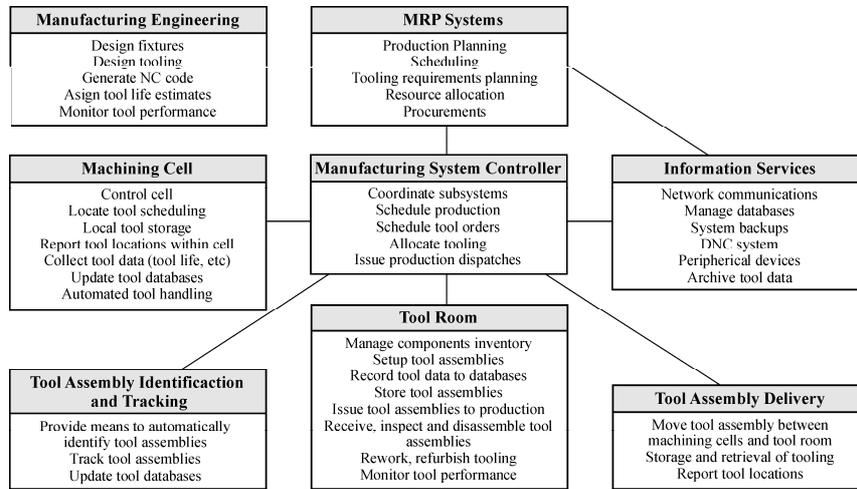


Fig 2-5. Propuesta de Frechette (Ref 30).

El módulo *Manufacturing System Controller* realiza una programación de los trabajos, asigna las herramientas concretas a las células y lanza las órdenes necesarias de preparación de las herramientas. El módulo *Machining Cell*, además de realizar las funciones que se muestran en la figura, es el encargado de reaccionar ante imprevistos. Por ello, ante desgastes prematuros o roturas de herramientas, el control busca herramientas disponibles en el sistema para sustituirlas, permitiendo la reasignación de las herramientas a diferentes trabajos. En este trabajo, al igual que en el de Rao et al. (Ref 88) se hace hincapié en la posibilidad de realizar nuevas programaciones para evitar retrasos, si las herramientas no están disponibles. Aunque en ambos módulos se asignan las herramientas a las células y dentro de las células a las operaciones, no se especifica cómo resolver los problemas inherentes a los conflictos entre las máquinas por la consecución de herramientas, si existe escasez de recurso.

El trabajo de Gray et al. (Ref 35) clasifica las funciones del sistema productivo relacionadas con las herramientas en tres niveles, nivel de herramienta, nivel de máquina y nivel de sistema productivo. Por otro lado, este trabajo plantea una estructura jerárquica que integra la planificación, la programación y el control de las máquinas, las piezas y las herramientas (Fig 2-6).

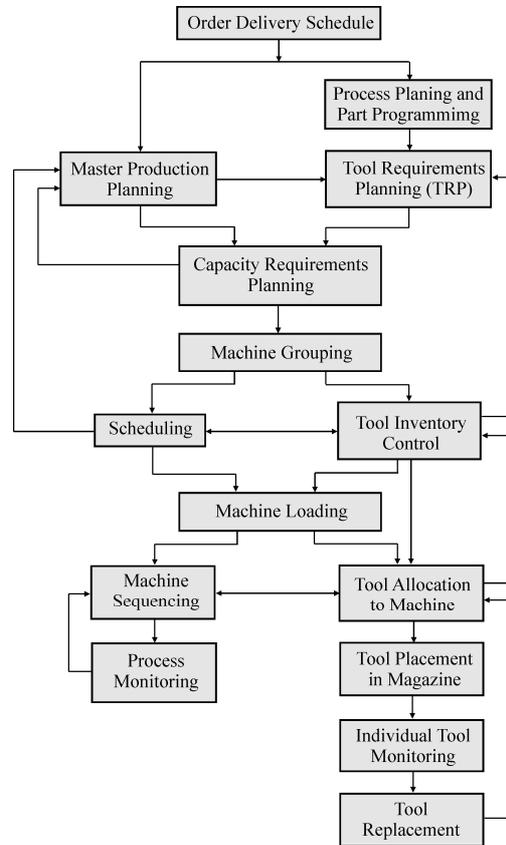


Fig 2-6. Estructura jerárquica propuesta por Gray et al. (Ref 35).

En la estructura jerárquica propuesta, se muestran las actividades relacionadas directamente con las herramientas y con otras funciones de fabricación. De esta forma, tras establecer el plan maestro de producción y el plan de procesos, se lleva a cabo la planificación de requerimientos de herramientas (TRP). Esta planificación tiene como objetivo generar los requerimientos netos de herramientas basándose en el número y tipo de las piezas a fabricar, los tipos de herramientas requeridos, los tiempos de mecanizado empleados en cada operación por cada herramienta, la estimación de sus tiempos de vida y la probabilidad de roturas prematuras.

Tras la planificación de herramientas, se asignan los trabajos a las máquinas y, posteriormente, las herramientas a las máquinas (tool allocation to machines). En la asignación de las herramientas a las máquinas hay que tener en cuenta que las herramientas se pueden utilizar en distintas máquinas durante el periodo de planificación, por lo que es necesario realizar una

programación del uso de las herramientas y sincronizarlas con la fabricación de los lotes.

Maccharoli et al. (Ref 64) consideran las funciones relacionadas con las herramientas agrupadas en tres niveles, un nivel estratégico, un nivel táctico y un nivel operacional.

- El nivel estratégico engloba la planificación de las necesidades de herramientas en un horizonte temporal largo, determinando el nivel de duplicidad de herramientas requerido, en base a los requerimientos de fabricación.
- El nivel táctico engloba la agrupación de las piezas a fabricar y la asignación de éstas a las máquinas, basándose en los requerimientos de herramientas de las piezas e intentando minimizar las herramientas comunes entre diferentes máquinas.
- El nivel operacional gestiona el uso de las herramientas en tiempo real, resolviendo los conflictos entre las máquinas por la consecución de las herramientas. En este trabajo, los conflictos que se plantean son sencillos al considerar únicamente dos máquinas.

En un trabajo más reciente, Binghai et al. (Ref 13) hacen una propuesta para la gestión de herramientas en un entorno de fabricación colaborativa. Su propuesta está basada en un sistema de decisión basado en el conocimiento, que se utiliza para resolver los problemas relacionados con el flujo de herramientas en un sistema productivo (Fig 2-7).

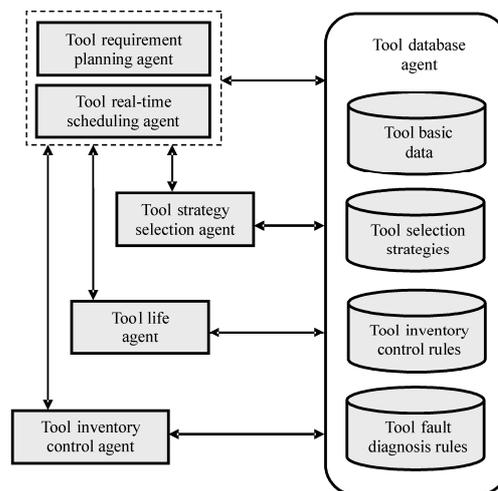


Fig 2-7. Propuesta de gestión de herramientas mediante agentes (Ref 13).

El funcionamiento del sistema está basado en una serie de módulos o agentes independientes. Cada uno de los seis módulos ejecuta una determinada función, permitiendo la comunicación entre ellos para alcanzar los objetivos propuestos en el sistema.

Básicamente, los módulos principales son la planificación de requerimientos (tool requirement planning), la programación de las herramientas (tool scheduling) y la selección de la estrategia adecuada (tool strategy selection), necesitando para su ejecución la información del resto de los módulos. La planificación de requerimientos se encarga de decidir las herramientas concretas que serán asociadas a cada operación y dónde se utilizarán. La programación de herramientas genera la secuencia y los tiempos de utilización de las herramientas. Bajo el punto de vista de los autores, el módulo de *tool strategy selection* es el más importante, ya que las decisiones tomadas en este módulo condicionan la gestión de las herramientas. En su propuesta, este módulo evalúa distintas estrategias en función de los objetivos a alcanzar, como la minimización del flujo de herramientas, la minimización de los cambios de herramientas, etc.

## **2.2. ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS.**

La gestión de las herramientas en un sistema productivo se encuentra influenciada por las estrategias adoptadas en relación a las herramientas. La organización del sistema productivo, en concreto la organización de las máquinas, el grado de automatización y las decisiones tomadas en el nivel de planificación en relación al recurso herramienta, determinan las estrategias adoptadas en la gestión de las herramientas. Como estrategias más destacadas, se encuentran las siguientes:

- Asignación estática y dinámica de herramientas.
- Flujo de piezas y de herramientas.
- Nivel de duplicidad de herramientas.
- Posicionamiento de las herramientas en el almacén de la máquina.

### **2.2.1. ASIGNACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE HERRAMIENTAS.**

La asignación de las herramientas a las máquinas se puede realizar de forma estática o dinámica (Ref 13, Ref 59). En la asignación estática, las herramientas se asignan a una máquina o conjunto de máquinas al inicio del horizonte planificado, no modificando esta asignación durante dicho periodo.

La asignación dinámica de herramientas (Ref 20) permite llevar las herramientas a las máquinas en los instantes que se necesitan, permitiendo que las herramientas se puedan compartir entre las distintas máquinas del sistema. Esta estrategia permite que la configuración del almacén de herramientas vaya cambiando continuamente en función de las necesidades de herramientas que tienen las máquinas, las cuales dependen de los trabajos programados.

La asignación estática de herramientas requiere un elevado inventario de herramientas y gran capacidad de los almacenes de las máquinas para albergar todas las herramientas necesarias en el periodo planificado. La asignación dinámica requiere disponer de sistemas rápidos de transporte de herramientas, así como de una gestión de herramientas adecuada para coordinar su flujo en el sistema productivo. Esta estrategia, en cambio necesita un inventario menor de herramientas y menor capacidad del almacén de la máquina.

### **2.2.2. FLUJO DE PIEZAS Y DE HERRAMIENTAS.**

En los sistemas de fabricación existen dos flujos principales: las piezas y las herramientas (Ref 80), siendo necesario gestionar conjuntamente el flujo de ambas.

Tradicionalmente se han considerado las piezas como flujo principal (Ref 17, Ref 51) Por ello, muchos trabajos se han centrado en el estudio de las rutas seguidas por las piezas, relegando a un segundo término los aspectos relacionados con las herramientas. Con este planteamiento, las piezas se asignan a las máquinas y, en un paso posterior, las herramientas se asignan a los almacenes de las máquinas en función de las necesidades de las operaciones de las piezas.

La evolución de las máquinas ha permitido que cada vez puedan realizar más tipos de operaciones. Por ello, cada vez se requieren menos máquinas para el procesado de las piezas. En estos entornos, al no ser tan complejo el problema de las rutas de las piezas, los estudios se centran más en los problemas relacionados con el recurso herramienta. En concreto, uno de los problemas más tratados es el de los conflictos por la utilización simultánea de las herramientas en diferentes máquinas (Ref 55, Ref 82).

### **2.2.3. NIVEL DE DUPLICIDAD DE HERRAMIENTAS.**

La duplicidad de herramientas se refiere al número de réplicas de cada herramienta que existen en el sistema productivo. La duplicidad de

herramientas facilita la coordinación entre la programación de los trabajos en las máquinas y el recurso herramienta. La duplicidad permite disponer de réplicas para satisfacer los requerimientos de las máquinas (Ref 98), pero supone un aumento del inventario de las herramientas.

Si las operaciones que requieren la misma herramienta son asignadas a la misma máquina, sólo se necesita una herramienta para mecanizarlas. En caso contrario se necesitan más réplicas. Por otro lado, las réplicas de determinadas herramientas pueden ser útiles, e incluso necesarias, cuando las herramientas tienen un elevado nivel de utilización o sus tiempos de vida son cortos. En este último caso, es interesante cargar réplicas de estas herramientas en el almacén de la máquina para disminuir los paros de la máquina debidos a los cambios de herramientas por desgaste. Sin embargo, la duplicidad de herramientas en el almacén de la máquina limita la capacidad del almacén de la máquina para albergar otros tipos de herramientas.

La decisión sobre el número de herramientas duplicadas que deben existir en el sistema productivo, normalmente enfrenta al área de producción y a compras. Desde el punto de vista de producción, una alta duplicidad de herramientas es favorable, ya que disminuye los retrasos de producción provocados por la falta de herramientas. Sin embargo, mantener un alto nivel de duplicidad de las herramientas implica inversiones importantes (Ref 58, Ref 69). Por tanto, la decisión sobre el nivel apropiado de herramientas duplicadas es un aspecto importante para ambas áreas, ya que determina el coste de inversión en herramientas y los retrasos por escasez de herramientas. Por tanto, en un sistema de fabricación, es necesario establecer cuáles son las necesidades de herramientas y el nivel de duplicidad deseado.

Los estudios existentes sobre el nivel de duplicidad de herramientas en un sistema productivo, parten de una configuración mínima de herramientas para la ejecución de los distintos trabajos. A partir de esta configuración, se va aumentando el número de réplicas de las herramientas que presentan más problemas, hasta que se consigue alcanzar un objetivo determinado, como puede ser minimizar esperas por falta de herramientas, minimizar costes, etc.

Koo et al. (Ref 53) establecen el nivel de duplicidad de herramientas en un sistema dominado por el flujo de herramientas y bajo la hipótesis de que las herramientas se pueden compartir entre las máquinas. La resolución del problema se realiza aplicando la teoría de colas. El modelo propuesto considera la vida de la herramienta y el tiempo de transporte de las herramientas entre las máquinas. El número de réplicas de las herramientas se va aumentando hasta que se minimizan los tiempos de espera por la falta de herramientas.

Braglia y Zavanella (Ref 14) determinan las réplicas necesarias de cada tipo de herramienta en un sistema productivo, utilizando algoritmos genéticos junto con técnicas de simulación, teniendo como objetivo maximizar el beneficio. Con respecto a las herramientas consideran el tiempo de vida disponible y el tiempo de cambio de filo. Este estudio muestra que si las herramientas se comparten entre máquinas a través de un almacén central, se necesitan más réplicas. En cambio, si las herramientas se comparten entre máquinas directamente, sin pasar por el almacén central, o mediante almacenes auxiliares que sirven a un número de máquinas, las réplicas necesarias disminuyen.

Kim et al. (Ref 50) determinan el número de réplicas de cada herramienta en un sistema con un transportador automático de herramientas, teniendo como objetivo minimizar el coste y considerando el tiempo de finalización de los trabajos (makespan). Para ello, se parte de una solución inicial y se van realizando iteraciones. En cada iteración, mediante algoritmos basados en heurísticos y simulaciones se aumenta el número de réplicas progresivamente, hasta que el nivel de finalización de los trabajos es satisfactorio.

#### **2.2.4. POSICIONAMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS EN EL ALMACÉN DE LA MÁQUINA.**

La ubicación de las herramientas de mecanizado en el almacén de la máquina de control numérico se puede considerar como un subproblema incluido en la asignación de las herramientas a las máquinas. Debido a las dimensiones de ciertas herramientas, cuando se cargan en el almacén de la máquina, ocupan más de una posición del almacén. Esto provoca que la capacidad del almacén disminuya. Por otro lado, el orden en el que se colocan las herramientas en el almacén es importante, ya que permite obtener una disminución de los tiempos no productivos. Esto es debido a que los tiempos de búsqueda y posicionamiento de las herramientas disminuyen. Estos tiempos de búsqueda pueden ser significativos si la máquina dispone de un gran almacén de herramientas.

El problema del posicionamiento de las herramientas en el almacén de la máquina ha sido estudiado por varios autores (Ref 9). Levitin y Rubinovitz (Ref 60) proponen un algoritmo para situar las herramientas en el almacén de la máquina, cuyo objetivo es minimizar el tiempo total de cambio de las herramientas para realizar el mecanizado, planteando el problema como el del viajante de comercio. En estudios más recientes, Dereli y Filiz (Ref 24) seleccionan la posición que ocupará la herramienta en el almacén aplicando algoritmos genéticos, suponiendo que sólo existe una réplica de cada tipo de herramienta en el almacén de la máquina. En un paso posterior, Baykasoglu y

Dereli (Ref 11) determinan las posiciones de las herramientas en el almacén de la máquina mediante la técnica simulated annealing, considerando varias réplicas de cada tipo de herramienta. Utilizan como datos de partida la lista de herramientas asignadas a un conjunto de operaciones, y las réplicas disponibles, así como el número de posiciones del almacén y el tiempo de cambio entre las distintas posiciones.

## **2.3. INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DE HERRAMIENTAS CON OTRAS FUNCIONES DE FABRICACIÓN.**

La gestión de las herramientas de mecanizado no se debe realizar aisladamente, sino que se debe integrar con otras funciones de fabricación, principalmente con la planificación de procesos y la programación de la producción. Desde la planificación de procesos se especifican las herramientas y las condiciones de mecanizado adecuadas para cada operación, mientras que la programación de la producción asigna los distintos recursos (máquinas, herramientas, etc.) a los trabajos. Por tanto, se mostrará la interacción de estas dos funciones con la gestión de herramientas, por ser las más relevantes en el ámbito de la tesis.

### **2.3.1. INTEGRACIÓN CON LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS.**

La planificación de procesos genera el plan de proceso para cada pieza a fabricar. En la mayoría de los casos, se genera un único plan de proceso. Sin embargo, estos planes simples no flexibilizan la programación de la producción ni la gestión de herramientas. Para conseguir esta flexibilidad, es importante considerar las posibilidades que puede ofrecer la planificación de procesos, en concreto, la generación de planes de proceso con alternativas. Estos planes dan alternativas a procesos y recursos (máquinas, herramientas, utillajes, etc). De todas estas posibilidades, la más importante en el ámbito de la tesis, es la generación de alternativas de herramientas en las operaciones.

La generación de planes de proceso con alternativas flexibiliza la tarea de la programación de la producción. De esta forma, se pueden utilizar las alternativas más idóneas, en función de la disponibilidad de los recursos o de los objetivos a alcanzar en la programación. Por ejemplo, en los planes de proceso con alternativas a nivel de máquina, se pueden utilizar estas alternativas para equilibrar la carga de trabajo de las máquinas durante la programación de los lotes, disminuyendo la carga de trabajo de las máquinas que tienen asignados más lotes.

Mendes et al. (Ref 70) consideran planes de proceso alternativos para el mecanizado de diferentes piezas en una única máquina. Cada uno de estos planes de proceso utiliza diferentes herramientas. El problema que se plantea es secuenciar el orden de ejecución de las piezas, con los planes adecuados y las herramientas necesarias, teniendo como objetivo maximizar el beneficio. Este problema se representa mediante un modelo de programación matemática. En relación a las herramientas considera todos sus costes, tanto de utilización como de manipulación. Este trabajo se centra en la resolución para una única máquina, no considerando los problemas relativos a las herramientas cuando hay varias máquinas, como pueden ser los conflictos entre máquinas por la consecución de herramientas.

Desde el punto de vista de la gestión de las herramientas, la utilización de alternativas de herramientas en las operaciones (Ref 32) facilitaría la asignación de las herramientas individuales a cada una de las operaciones y mejoraría la gestión del recurso. Las alternativas de herramientas permiten seleccionar de entre ellas, la herramienta concreta para el mecanizado, en función de la disponibilidad de herramientas, etc.

Entre los trabajos que tratan la gestión de herramientas, basándose en la utilización de herramientas alternativas en las operaciones, se encuentran los de Akturk y Ozkan (Ref 4) y el de Buyurgan et al. (Ref 17).

En el trabajo de Akturk y Ozkan (Ref 4) se asignan las herramientas a las operaciones con el objetivo de minimizar el coste total de fabricación. Cada operación puede ser realizada por diferentes herramientas, y de cada una de ellas existe un número determinado de réplicas. El algoritmo desarrollado calcula para cada pareja herramienta-operación el coste ocasionado por la herramienta en el mecanizado del lote, asignándole a cada operación la herramienta que proporciona un coste menor. Si hay más operaciones que demandan la herramienta, que réplicas disponibles, a algunas operaciones se les asignarán herramientas alternativas. En el cálculo del coste de la herramienta se incluyen tanto los costes relacionados con el tiempo de mecanizado de la herramienta, como los necesarios para preparar y cargar la herramienta en la máquina. Sin embargo, a este nivel, estos últimos costes se han estimado en función del tiempo de mecanizado y del tiempo de cambio. En realidad, sin saber la composición del almacén de la máquina, no se pueden conocer realmente qué costes se tienen, ya que no se sabe si la herramienta estará ya en la máquina o si hay que transportarla desde otra máquina.

Buyurgan et al. (Ref 17) proponen un heurístico para la asignación de las herramientas a las operaciones, habiendo realizado previamente una programación de los trabajos en las máquinas. Para ello cuenta con

herramientas alternativas en cada operación. Este heurístico se basa en la clasificación de las herramientas utilizando el ratio tiempo de vida frente a posiciones del almacén ocupadas por la herramienta. Este trabajo es específico para la utilización de herramientas de gran diámetro, dado que se asume que muchas herramientas ocupan varias posiciones del almacén. Para cada una de las máquinas, las herramientas se asignan a las operaciones siguiendo un proceso iterativo, seleccionando las que tienen un valor más elevado del ratio tiempo de vida frente a las posiciones ocupadas en el almacén de la máquina. Si tras la asignación inicial, alguna operación no dispone de alguna herramienta, se modifican las asignaciones utilizando las herramientas alternativas, hasta que todas las operaciones tienen asignada una herramienta.

En la última década, han aparecido una serie de trabajos que abordan la utilización de planes de proceso con alternativas en la secuencia de operaciones (Ref 52, Ref 59, Ref 67). La selección de la operación a ejecutar en tiempo real, se podría realizar en función de la disponibilidad del recurso herramienta en el sistema productivo. Koo y Tanchoco (Ref 52) se basan en estos planes y en la disponibilidad de las herramientas que requiere cada operación para generar la programación de las operaciones en tiempo real. Este mismo planteamiento es adoptado por Matta et al. (Ref 67), aunque en su propuesta no considera el tiempo de vida de las herramientas, asumiendo que no es necesario sustituirlas por desgaste en el horizonte planificado. Estos trabajos plantean seleccionar la secuencia de operaciones en función de la disponibilidad del recurso herramienta. Sin embargo, en la fabricación por lotes, no es vinculante la secuencia de operaciones, que determina la utilización de las herramientas, ya que las herramientas deben estar disponibles durante la fabricación de todo el lote.

Lee y Kim (Ref 59) proponen la programación de los trabajos en tiempo real, considerando el recurso herramienta y planes de proceso con alternativas en la secuencia de operaciones. De entre las piezas con más prioridad, se analizan las diferentes secuencias de ejecución de las operaciones. Se eligen las que presentan menos conflictos de herramientas con las piezas que ya se están procesando y, a su vez, minimizan los tiempos de espera por causa de las herramientas.

### **2.3.2. INTEGRACIÓN CON LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.**

La programación de la producción decide qué trabajos o lotes se lanzan, con qué secuencias y en qué instantes de tiempo, en un horizonte temporal determinado. Evidentemente, esta programación está supeditada a la

planificación de la producción realizada con anterioridad para un horizonte de tiempo mayor.

Los trabajos que se lanzan compiten por los recursos existentes: máquinas, herramientas, utillajes, etc., siendo necesario asignar estos recursos a cada uno de los trabajos, dado que el buen funcionamiento del sistema productivo está condicionado por el uso de sus recursos productivos.

El problema de la programación es un problema de complejidad computacional elevada (Ref 91). Además, la flexibilidad que aportan las alternativas en las máquinas y en las herramientas incrementa su complejidad (Ref 35, Ref 75). Por tanto, la ejecución de esta tarea implica la resolución de un problema extremadamente complejo por las siguientes razones:

- Existencia de gran cantidad de combinaciones. El número de combinaciones posibles que pueden proporcionar una solución al problema aumenta enormemente a medida que los trabajos, las máquinas y el resto de recursos va en aumento. De hecho, estos problemas suelen requerir un tiempo de cálculo exponencial para la obtención de la solución.
- El gran dinamismo del entorno productivo. En el funcionamiento del sistema productivo a menudo ocurren incidencias que alteran la disponibilidad de recursos o la ejecución de los trabajos, provocando que las programaciones realizadas no sean válidas, debiendo realizarse nuevas programaciones para adaptarse a estas nuevas situaciones.
- La búsqueda de una solución óptima con respecto a una medida de eficacia. Usualmente, las programaciones buscan obtener el mejor reparto de los recursos con respecto a un objetivo, como puede ser minimizar el trabajo en curso, minimizar el retraso de los trabajos, etc.
- El tiempo disponible para realizar las programaciones. Este tiempo no debe ser elevado, ya que los horizontes de programación no son muy grandes y, además, debe ser posible ir realizando reprogramaciones conforme ocurren incidencias en el sistema productivo.

La programación de los diferentes recursos del sistema productivo para satisfacer los requerimientos de los lotes, se puede resolver para cada uno de los recursos independientemente, o de forma simultánea para todos ellos. La programación independiente o no simultánea de cada uno de los recursos facilita la resolución del problema, pero es difícil obtener una solución óptima para el problema global (Ref 10). Si se considera la programación

simultánea de los recursos se pueden obtener soluciones óptimas de conjunto, pero evidentemente la complejidad de resolución del problema es mucho mayor.

Dado que las herramientas y los trabajos son los flujos más importantes en un sistema productivo, el problema de la programación se puede abordar de las dos formas siguientes.

- Programación no simultánea de los trabajos y del recurso herramienta en las máquinas.
- Programación simultánea de los trabajos con el recurso herramienta en las máquinas.

### **2.3.2.1. Programación no simultánea de los trabajos y el recurso herramienta.**

En la programación no simultánea, se realiza la asignación de los trabajos y las herramientas a las máquinas de forma independiente, no resolviendo su asignación de forma conjunta. En la literatura, nos encontramos con dos planteamientos a la hora de resolver este problema, priorizar la asignación de las herramientas o priorizar la asignación de los trabajos a las máquinas (Ref 15).

- Priorizar la asignación del recurso herramienta. En primer lugar se asignan las herramientas a las máquinas y, posteriormente, se asignan los trabajos en función de la disponibilidad de herramientas de las máquinas (Ref 56, Ref 97).
- Priorizar la asignación de los trabajos. En primer lugar, se programan los trabajos en las máquinas y, posteriormente, se asigna el recurso herramienta para cumplir con los requerimientos de los trabajos programados en las máquinas (Ref 7, Ref 92, Ref 111).

#### *2.3.2.1.1. Priorización del recurso herramienta.*

Si se prioriza el recurso herramienta, la asignación de las herramientas a las máquinas determina qué tipos de operaciones puede realizar cada una de ellas. De esta forma, los trabajos se asignarán posteriormente a las máquinas, en función de la disponibilidad de herramientas en ellas. Esta hipótesis da prioridad al recurso herramienta sobre los lotes a fabricar, lo que no es adecuado desde el punto de vista de producción, ya que los trabajos son más importantes que las herramientas.

El problema de la asignación de las herramientas a las máquinas es un aspecto importante dentro del nivel de planificación. Por ello, la gestión de herramientas ha sido definida por algunos autores como la metodología para decidir la distribución de las herramientas (tipos y número) en los almacenes de las máquinas y en los elementos auxiliares de almacenamiento de herramientas del sistema de fabricación (Ref 108). Siguiendo este planteamiento, Kusiak (Ref 56) analizó cuatro composiciones básicas de herramientas en los almacenes de las máquinas. Estas cuatro composiciones son:

- Todas las máquinas tienen las mismas herramientas. En este caso, la asignación de los trabajos a las máquinas no está condicionada por la disponibilidad de herramientas en sus almacenes. Esta configuración está pensada para sistemas productivos que fabriquen piezas de una misma familia y con poca variedad de herramientas, o que dispongan de máquinas con grandes almacenes de herramientas.
- Cada máquina dispone de un conjunto de herramientas, no existiendo herramientas comunes entre dos máquinas, y todas las réplicas de esas herramientas están en el almacén de dicha máquina.
- Cada máquina dispone de un conjunto de herramientas, no existiendo herramientas comunes entre dos máquinas, y con sólo una réplica de cada tipo de herramienta en el almacén de la máquina. El resto de réplicas de cada tipo permanecen en un almacén central, al que cada máquina puede acceder para tener disponibles más réplicas del tipo de herramientas que tiene asignado.
- Cada máquina dispone de un conjunto de herramientas pero con sólo una réplica de cada tipo de herramienta en el almacén. Cada máquina puede acceder al almacén central de herramientas, donde tiene acceso, no sólo a las réplicas de las herramientas sino al resto de herramientas. Esto facilita la posterior asignación de las piezas a las máquinas.

De las cuatro propuestas, la última es la que proporciona mayor flexibilidad, ya que en las máquinas se cargan las herramientas más utilizadas, pero permitiendo que se pueda disponer de cualquier herramienta a través del almacén de herramientas. El resto de composiciones, salvo la primera, de la que ya se han comentado sus limitaciones, merman las posibilidades de realizar operaciones en las máquinas, condicionando el flujo de piezas en el sistema. En cuanto al número de réplicas necesario, las tres primeras propuestas necesitan un elevado número de réplicas de los distintos tipos de herramientas, con lo que la inversión en este recurso es elevada. Por el contrario, la última propuesta trata de limitar el número de réplicas de herramientas necesarias.

Además de estudiar la composición de los almacenes de la máquina, existen estudios sobre la duplicación de herramientas en los almacenes de las máquinas para facilitar las rutas de las piezas. Por ejemplo, Sodhi et al. (Ref 97) realizan una propuesta de carga inicial de herramientas en las máquinas, de forma que cada una de las herramientas requeridas por las piezas a fabricar esté en al menos una máquina. Posteriormente, si existen posiciones vacías en los almacenes de las máquinas, se cargarán copias de las diferentes herramientas. Las operaciones que requieran más tiempo de procesamiento tendrán más réplicas y, para incrementar las posibles rutas de las piezas se cargarán réplicas de diferentes herramientas en otras máquinas.

#### *2.3.2.1.2. Priorización de los trabajos.*

En este grupo se enmarcan los estudios que resuelven la programación de los trabajos en las máquinas, y posteriormente asignan las herramientas a dichos trabajos. Esta aproximación es la más estudiada en la literatura, ya que da prioridad al recurso máquina sobre las herramientas.

Básicamente, existen dos formas de abordar este problema. La primera de ellas consiste en generar la programación de los trabajos en las máquinas, y posteriormente tratar el recurso herramienta (resolución global). La segunda de ellas, resuelve el problema de programación de forma jerárquica, en diferentes etapas (carga, secuenciación y temporización), resolviendo cada etapa para los trabajos en primer lugar y, posteriormente para las herramientas.

##### *2.3.2.1.2.1. Resolución global.*

Los estudios que resuelven el problema de la programación de los trabajos en las máquinas (job shop scheduling) asignan los tiempos de inicio y finalización de los trabajos a las máquinas. En los últimos cincuenta años se han desarrollado numerosos trabajos tratando de determinar una programación eficiente en el taller, englobando problemas con distintos entornos productivos, funciones objetivo, etc. (Ref 47), y aún hoy representa una parte importante de los esfuerzos de los investigadores. Este problema se encuentra dentro de los problemas más difíciles dentro de la optimización combinatoria, existiendo numerosas propuestas de algoritmos de optimización (procedimientos enumerativos y técnicas de programación matemática) y de aproximación para su resolución. Entre los algoritmos de aproximación se incluyen las técnicas de ramificación y poda, las reglas de despacho, los heurísticos, los algoritmos de búsqueda local (búsquedas iterativas, simulated annealing, tabu search), algoritmos genéticos, etc.

Una vez establecida la programación de los trabajos, las herramientas se deben asignar a las operaciones, de forma que cada operación disponga de las herramientas adecuadas, y no se reduzca la productividad de las máquinas por escasez de herramientas. Esta asignación puede resultar más o menos compleja, en función del número de herramientas existentes y, sobre todo, si se asume que las herramientas se pueden compartir entre distintas máquinas. Por ello, es posible encontrar diferentes situaciones. Si cada máquina dispone de sus propias herramientas, no es necesaria ninguna asignación. Si las herramientas se tienen que repartir entre las máquinas, hay que resolver los posibles conflictos entre las máquinas por la consecución de herramientas en un mismo instante de tiempo (Ref 36, Ref 55, Ref 82, Ref 111), asignando una réplica de la herramienta a cada máquina. Si los conflictos entre máquinas no se pueden resolver por escasez de herramientas, las únicas soluciones posibles para que los trabajos tengan las herramientas adecuadas son rehacer la programación de algunos trabajos, para que las herramientas se encuentren disponibles (Ref 57, Ref 76) o adquirir nuevas réplicas de las herramientas. Los conflictos entre máquinas serán mayores o menores en función de la programación realizada y de los requerimientos de los lotes, ya que dependiendo de la simultaneidad de las órdenes en las máquinas puede que sobren herramientas o que haya escasez del recurso herramienta.

Los trabajos que abordan este planteamiento básicamente establecen tres áreas de actuación:

- Determinar las estrategias de asignación de las herramientas concretas a las operaciones.
- Resolver los conflictos entre las máquinas por causa de las herramientas.
- Rehacer las programaciones en función de la disponibilidad de las herramientas.

Grieco et al. (Ref 36) proponen un despachador de herramientas para cumplir con los requerimientos de la programación de los trabajos. El despachador selecciona las herramientas para cada operación, en función de las peticiones de cada máquina y del tiempo en que se requieren, planificando su transporte y las cargas y descargas en el almacén de la máquina. Las peticiones de cada máquina se atienden en función de las réplicas disponibles de cada herramienta y de la utilización de las mismas. Este trabajo estudia los retrasos en los lotes cuando no es posible atender los requerimientos de herramientas de las máquinas. En esta línea, Kumar et al. (Ref 55) proponen distintas reglas para asignar las herramientas a las operaciones de las piezas ya programadas. Estas reglas establecen prioridades en la asignación de las herramientas. Entre estas reglas se encuentra la asignación de las

herramientas a la pieza que tiene el menor tiempo de procesado, la asignación de las herramientas a las piezas con menos operaciones, etc.

En el estudio de Mukhopadhyay y Sahu (Ref 76) se trata el problema de los conflictos entre máquinas por la utilización simultánea de herramientas. En este trabajo se parte de la programación de los trabajos en las máquinas. Conocidas las operaciones a realizar en cada uno de los trabajos, se asignan las herramientas a estas operaciones, teniendo como objetivos minimizar el tiempo de finalización de los trabajos (makespan) y el coste de mecanizado. Con respecto a las herramientas no considera ni herramientas alternativas, ni desgaste en el horizonte programado. Como hipótesis del estudio se consideran tiempos de mecanizado variables en las operaciones y que cada pieza se mecaniza totalmente en una única máquina. Al haberse generado la programación previamente, varias máquinas pueden requerir el mismo tipo de herramienta en los mismos instantes de tiempo. Estos conflictos se pueden resolver si existen suficientes réplicas de la herramienta. En caso de escasez de herramientas, se asignan las herramientas a las operaciones que se consideren más críticas con respecto al objetivo de minimización del tiempo de finalización de los trabajos (makespan), retrasando la ejecución del resto de operaciones en las otras máquinas. Aunque este trabajo trata el tema de conflictos entre máquinas por la consecución de herramientas, limita el número de máquinas que requieren el mismo tipo de herramienta simultáneamente, lo que facilita la resolución del problema.

Xu y Randhawa (Ref 111) estudian también los conflictos entre máquinas por la consecución de herramientas. En este trabajo, cada lote se procesa en una sola máquina. Cada vez que una máquina ha finalizado un trabajo, se le asigna uno de los que se encuentran en espera, aplicando distintas reglas de despacho. Cada uno de estos trabajos requerirá distintas herramientas. Los conflictos entre máquinas por causa de las herramientas se resuelven con la estrategia de minimización de movimientos de herramientas en el sistema productivo. Es decir, de entre las máquinas que solicitan la misma herramienta en los mismos instantes de tiempo, ésta se asignará a la máquina en la cual la herramienta recorra una menor distancia, considerando su ubicación. En esta estrategia de asignación de herramientas, la herramienta permanece en la máquina a la que ha sido asignada hasta que sea requerida por una nueva máquina, no retornando a su posición original. Las operaciones que quedan sin herramienta retrasan su ejecución hasta que la herramienta que necesiten esté disponible.

Prabaharan et al. (Ref 82) estudian la programación de los trabajos en las máquinas y las estrategias de asignación de herramientas a dichos trabajos. En su propuesta consideran que existe un almacén central de herramientas que sirve a las distintas máquinas y una única réplica de cada herramienta.

Aunque identifica los conflictos entre máquinas, estos se resuelven asignando la herramienta arbitrariamente a una de las máquinas que se disputan la herramienta, retrasando las operaciones que no tienen herramienta disponible, hasta que sea posible asignarles una herramienta.

#### 2.3.2.1.2.2. Resolución jerárquica.

Como se ha comentado, la programación de los trabajos en las máquinas es un problema complejo. Para facilitar su resolución se pueden adoptar resoluciones jerárquicas, descomponiendo el problema en tres etapas: carga, secuenciación y temporización.

- Etapa de carga. En esta etapa se asignan los trabajos a las máquinas.
- Etapa de secuenciación. En esta etapa se determina la secuencia de ejecución de los diferentes trabajos en cada máquina.
- Etapa de temporización. En esta etapa se asignan los instantes de inicio y finalización de cada uno de los trabajos en las máquinas.

Dentro de la programación no simultánea del recurso herramienta, existen estudios que abordan la etapa de carga y la de secuenciación considerando las herramientas, una vez ya se ha resuelto cada etapa para los trabajos.

Los trabajos que se enmarcan en la etapa de carga asignan las herramientas a las operaciones, una vez las operaciones han sido asignadas a las máquinas.

Atan y Pandit (Ref 8) modelizan el problema de asignación de las herramientas a las operaciones, previamente asignadas a las máquinas, mediante la técnica de programación lineal, bajo las hipótesis de que las máquinas tienen acceso a todas las herramientas necesarias y que las herramientas se pueden compartir entre las máquinas. Su objetivo consiste en minimizar el número de réplicas de herramientas utilizadas en el horizonte planificado. Para ello, el problema se descompone en subproblemas, donde en cada uno de ellos se asigna una réplica de la herramienta a las operaciones que requieren dicha herramienta. En caso de no poder atender los requerimientos de herramientas en las operaciones, se realizaría una nueva asignación de trabajos a las máquinas.

Ho y Hsieh (Ref 42) resuelven el problema de carga asignando los trabajos a las máquinas con el objetivo de equilibrar la carga de trabajo de las máquinas. Posteriormente se asignarán las herramientas a las operaciones con el objetivo de minimizar la falta de herramientas. Por ello, cada herramienta se asigna a la máquina que tenga un número mayor de operaciones que

requieran la herramienta. Una vez asignadas las herramientas, se permite compartir las herramientas entre las máquinas, para dar servicio a las operaciones que se realizan en máquinas que no dispongan de la herramienta inicialmente.

Una vez realizada la secuenciación de los lotes en las máquinas, los trabajos que se enmarcan en esta etapa determinan la secuencia de utilización de las herramientas, es decir las cargas y descargas de las herramientas en el almacén de la máquina para satisfacer los requerimientos de los trabajos previamente secuenciados.

Uno de los trabajos más importantes fue el realizado por Tang y Denardo (Ref 102), que definieron y aplicaron la estrategia de mantener en el almacén de la máquina las herramientas que se vayan a utilizar más pronto. Esta estrategia consiste en ir retirando las herramientas del almacén de la máquina cuando está lleno, siempre que se requiera una herramienta que no se encuentre en el almacén para procesar el siguiente trabajo. Para ello, se mantienen en el almacén las herramientas que van a ser utilizadas antes en el procesamiento de las siguientes lotes, retirando las que se necesitarán en una plazo mayor.

Song y Hwang (Ref 99) resuelven el problema de carga y descarga de las herramientas considerando los transportadores de herramientas. Su objetivo consiste en minimizar los movimientos del transportador de herramientas entre las máquinas y el almacén central de herramientas, considerando que el transportador de herramientas tiene una capacidad limitada y que realiza distintos recorridos. Para ello, en función de las herramientas que se necesitan y la capacidad del almacén y del transportador, establece cuándo cargar y descargar las herramientas en las máquinas. La estrategia propuesta en este artículo es una variante de la propuesta por Tang y Denardo (Ref 102), insertando la herramienta en el almacén tan pronto como sea posible, en función de la disponibilidad del transportador.

### **2.3.2.2. Programación simultánea de los trabajos y el recurso herramienta.**

Tradicionalmente, se han programado los trabajos en las máquinas y, posteriormente se ha asignado el recurso herramienta. Sin embargo, la programación de los trabajos en las máquinas sin considerar la disponibilidad de las herramientas puede provocar programaciones inviables por falta de herramientas (Ref 4), sobre todo cuando las herramientas se pueden compartir entre diferentes máquinas. Por esta razón existen estudios que abordan la programación de los trabajos en las máquinas considerando las limitaciones del recurso herramienta, como los tiempos de vida de los filos, la

disponibilidad de las herramientas, los tiempos de transporte, los tiempos de cambio, etc.

Sin embargo, la programación de los trabajos en las máquinas, conjuntamente con el recurso herramienta incrementa la complejidad de resolución del problema, ya de por sí complejo. Los trabajos que abordan este planteamiento lo resuelven bien de forma jerárquica o bien de forma global.

Los trabajos que lo resuelven de forma jerárquica, lo dividen en las tres etapas mencionadas anteriormente: etapa de carga, de secuenciación y de temporización y resuelven cada etapa independientemente o agrupan algunas de ellas, como pueden ser la secuenciación y la temporización. En cada una de estas etapas consideran conjuntamente los trabajos y las herramientas. Básicamente, en la resolución jerárquica, los trabajos de la literatura abordan las dos primeras etapas, por lo que la exposición de los trabajos se centrará en estas etapas.

Los trabajos que resuelven el problema de forma global o integral, suelen realizar simplificaciones para facilitar su resolución, como considerar un número limitado de máquinas y herramientas, o asumir que las piezas se procesan en una única máquina (Ref 85, Ref 106).

Sin embargo, no se puede perder de vista que en esta manera de abordar el problema se está poniendo al mismo nivel la asignación de los lotes a las máquinas con el recurso herramienta. Esto provoca que en ocasiones las decisiones sobre las herramientas se puedan anteponer a las decisiones sobre el recurso máquina.

#### *2.3.2.2.1. Resolución jerárquica.*

Los trabajos que resuelven la programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas, adoptando una resolución jerárquica, introducen el recurso herramienta en cada una de las etapas mencionadas. La gran mayoría de estos estudios se centran en la resolución del problema de carga, aunque también existen otros estudios que abordan la secuenciación. Esto se debe a que en algunos sistemas productivos, resolviendo el problema de carga, la programación se convierte en una función simple de llevar a cabo. En cambio, en sistemas de mayor complejidad, la secuenciación y posterior temporización son, en sí mismas, funciones complejas (Ref 86).

##### *2.3.2.2.1.1. Resolución del problema de carga.*

Tradicionalmente, y antes de considerar las herramientas como un recurso importante, en la etapa de carga sólo se asignaban los trabajos a las

máquinas. Sin embargo, Stecke (Ref 101) redefinió el problema de carga como la asignación tanto de las operaciones como de las herramientas necesarias para la fabricación de los lotes a las máquinas, teniendo en cuenta las restricciones tecnológicas y de capacidad del sistema productivo.

En la resolución integrada del problema de carga, se resolverá simultáneamente la asignación de las operaciones con sus correspondientes herramientas a las máquinas. La resolución del problema de carga se utilizará como información de partida para la posterior secuenciación y temporización. Sin embargo, utilizar esta jerarquía de resolución, sin permitir retroalimentaciones entre las diferentes etapas condicionará la solución final del problema.

La formulación del problema de carga se ha realizado mediante distintas técnicas, aunque la más extendida entre los investigadores es la que formula el problema mediante programación matemática, planteando distintos objetivos y restricciones (Ref 37). Como objetivos más utilizados se encuentran la minimización de costes, la minimización de tiempos no productivos, la carga uniforme de trabajo en las máquinas, etc. Las restricciones más utilizadas se pueden clasificar en dos tipos: restricciones de asignación y de capacidad. Las restricciones de asignación limitan la posibilidad de asignación de las operaciones a las máquinas, por ejemplo obligando a que operaciones similares se asignen a determinadas máquinas. Las restricciones de capacidad se introducen para tener en cuenta las limitaciones de los recursos. En esta categoría se incluyen la capacidad del almacén de herramientas de la máquina, la cantidad de herramientas disponibles y el tiempo de vida de las herramientas.

La complejidad de tratar conjuntamente los trabajos y las herramientas hace que se trate de simplificar el problema. En muchos de los trabajos de la literatura que abordan el problema de carga, se ha supuesto que cada una de las operaciones de una pieza se puede asignar a diferentes máquinas, junto con la herramienta requerida para su mecanizado (Ref 75, Ref 94, Ref 101, Ref 104), tratando el problema desde un punto de vista más matemático que de producción. Es decir, si una pieza necesita cuatro operaciones, cada operación se puede realizar en una máquina diferente. Evidentemente, la resolución del problema de carga con esta hipótesis hace que no existan conflictos de herramientas entre máquinas en las etapas posteriores de secuenciación y temporización, ya que todas las operaciones que requieran una misma herramienta se asignarán junto con dicha herramienta a la misma máquina.

En uno de los primeros trabajos que aparecieron, Stecke (Ref 101) formuló el problema de carga mediante un modelo de programación no

lineal, estudiando distintas funciones objetivo, como equilibrar la carga de trabajo de las máquinas o maximizar el número de operaciones consecutivas de una misma pieza en una máquina. En relación con las herramientas, en su propuesta consideró el número de posiciones ocupadas por las herramientas en el almacén de la máquina, pero no tuvo en cuenta el tiempo de vida de las herramientas, asumiendo que en el horizonte estudiado no se desgastaban.

Sarin y Chen (Ref 94) desarrollaron un modelo de programación matemática para resolver el problema de carga, teniendo como objetivo minimizar el coste total de mecanizado del conjunto de las operaciones. El coste de cada operación depende de la combinación máquina y herramienta que la generan, en concreto del tiempo necesario para el mecanizado y el debido al cambio por desgaste de la herramienta. En su modelo consideraron como restricciones relativas a las herramientas la vida de las herramientas, el número de posiciones que ocupa una herramienta en el almacén de la máquina y la capacidad del almacén de las máquinas. Sin embargo, para simplificar el problema, no se consideraron herramientas alternativas en las operaciones.

Modi y Shanker (Ref 75) desarrollaron también un modelo de programación matemática para resolver el problema de carga, teniendo como objetivo la asignación del máximo número de operaciones consecutivas de cada pieza en la misma máquina, y considerando planes alternativos. El problema se resuelve en dos pasos. En primer lugar, para cada pieza y cada uno de sus planes alternativos se asignan a las máquinas conjuntos de operaciones junto con las herramientas requeridas. En segundo lugar, de entre todos los posibles planes alternativos, se selecciona para cada pieza el plan que mejor resultado obtenga para el objetivo planteado. Este trabajo asume que, en el periodo planificado, las herramientas disponen de suficiente tiempo de vida, por lo que no considera cambios por desgaste, ni duplicidad de herramientas en los almacenes de las máquinas.

Tiwari y Vidyarthi (Ref 104) propusieron un algoritmo genético para resolver el problema de carga, teniendo como objetivo maximizar la utilización de máquinas y la productividad. Este trabajo se centra más en la asignación de las piezas a las máquinas, que en el recurso herramienta. Con respecto a las herramientas únicamente considera la capacidad del almacén de la máquina, asignando cada herramienta a una máquina, por lo que no existen conflictos entre las máquinas por la consecución de herramientas.

#### *2.3.2.2.1.2. Resolución del problema de secuenciación.*

Tradicionalmente, en esta etapa de la programación se establecía sólo la secuencia de los trabajos en cada una de las máquinas, pero más

recientemente, han aparecido estudios que resuelven el problema de la secuenciación de los trabajos considerando el recurso herramienta. Estos estudios establecen la secuencia de trabajos y las correspondientes cargas y descargas de las herramientas en las máquinas con el objetivo de minimizar los cambios de herramientas. Dada la complejidad de este problema (Ref 22), la mayoría de los trabajos que resuelven la secuenciación lo hacen para una única máquina (Ref 5, Ref 114) y, en el caso de contemplar varias máquinas (Ref 28) asumen que cada trabajo se procesa en una sola máquina y que no existe competencia por las herramientas entre las distintas máquinas.

Estos trabajos surgen porque en la mayoría de los casos la cantidad de herramientas requeridas para procesar un conjunto de piezas es generalmente mayor que la capacidad del almacén de la máquina. Por lo tanto se plantea determinar la secuencia de ejecución de los lotes en la máquina, con sus correspondientes reemplazos de herramientas, con el objetivo de minimizar el número total de cambios de herramientas entre la ejecución de los lotes o el tiempo total de cambio (Ref 5, Ref 28, Ref 41, Ref 114). El estudio de los cambios de herramientas entre los trabajos es importante cuando estos tiempos son grandes en relación a los tiempos de procesado de los trabajos o cuando los lotes son pequeños. En la resolución de este problema se han considerado distintas hipótesis, como que los tiempos de cambio de las herramientas no son iguales para todas ellas (Ref 84), que hay herramientas que ocupan más de una posición en el almacén de la máquina (Ref 68) o que las herramientas deben ser cargadas o descargadas durante el procesado de una pieza, si se asume que el almacén de la máquina no puede albergar todas las herramientas necesarias para mecanizar la pieza (Ref 92).

Crama et al. (Ref 22) y Hertz et al. (Ref 41) resuelven este problema modelizándolo como el del viajante de comercio, donde la distancia entre dos ciudades se transforma en el número de cambios de herramientas necesarios entre dos trabajos. Aplicando diferentes heurísticos, obtienen la secuencia de ejecución de trabajos que necesite menos cambios de herramientas.

Zhou et al. (Ref 114) resuelven este problema aplicando la técnica beam search. En primer lugar determinan varias secuencias de trabajos, basándose en las herramientas comunes que existen entre ellos. Una vez generadas las posibles secuencias, la selección de la secuencia óptima se realiza aplicando la estrategia propuesta por Tang y Denardo de mantener en el almacén las herramientas que se vayan a utilizar más pronto, para determinar el número de cargas y descargas de las herramientas en la secuencia de trabajos especificada.

2.3.2.2.2. *Resolución integrada.*

Estos estudios abordan la programación de los trabajos en las máquinas, conjuntamente con el recurso herramienta de forma integral, es decir, no adoptando soluciones jerárquicas del problema. Dada la complejidad del problema, se suele resolver para un número reducido de máquinas y bajo la hipótesis de que las piezas se realizan totalmente en una única máquina.

Básicamente, estos trabajos resuelven el problema de programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas globalmente, adoptando distintas estrategias relacionadas con las herramientas. Como trabajos más importantes destacan los que se exponen a continuación.

Ghosh et al. (Ref 31) estudiaron el recurso herramienta en un sistema productivo, evaluando el impacto de diferentes reglas de despacho para la asignación de los trabajos a las máquinas, junto con reglas que evalúan la disponibilidad de herramientas. En este trabajo se asume que existe competencia entre las máquinas por el recurso herramienta, lo que hace que las herramientas no siempre estén disponibles. Por ello, una vez se ha establecido un orden de ejecución de los trabajos, éste puede ser alterado en función de la disponibilidad de herramientas, aplicando diferentes reglas. Por ejemplo, una de estas reglas permite que se procese antes el trabajo que tenga todas las herramientas cargadas en la máquina. Las reglas escogidas se han evaluado mediante simulaciones. En estas simulaciones se ha modificado el nivel de disponibilidad de herramientas o competencia entre las herramientas.

Roh y Kim (Ref 90) resuelven el problema de programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas de forma integral, mediante reglas de prioridad, asumiendo que cada pieza se mecaniza en una única máquina. La asignación de las piezas a las máquinas se determina evaluando distintas variables. Entre estas variables se encuentran las fechas de entrega y el tiempo de procesado, así como variables relacionadas con las herramientas. Con respecto a las herramientas, se evalúa el número de herramientas adicionales que se necesitan en el almacén de la máquina para procesar un trabajo y la disponibilidad de herramientas, ya que la herramienta puede estar siendo utilizada por otra máquina. Sin embargo, no se consideran otros aspectos relacionados con el recurso herramienta, como pueden ser los tiempos de vida y los cambios por desgaste.

Quiroga et al. (Ref 85) resuelven conjuntamente el problema de programación de forma global mediante la técnica de programación con restricciones, utilizando distintas funciones objetivo. Este trabajo resuelve simultáneamente la asignación de las operaciones a las máquinas, la asignación de herramientas a las operaciones y la temporización. Con

respecto a las herramientas, considera alternativas de herramientas en las operaciones y el desgaste de las herramientas, pero asigna cada herramienta a una única máquina, no permitiendo su uso en otras máquinas del sistema productivo, en el horizonte de programación.

Lee y Kim (Ref 59) establecen la programación de las piezas en las máquinas atendiendo principalmente a dos criterios, la prioridad del trabajo y la disponibilidad de herramientas. Para ello, consideran planes de procesos no lineales a nivel de operación. De entre las piezas con más prioridad, se analizan las diferentes secuencias de ejecución de las operaciones y se asignan las que presenta menos conflictos de herramientas con las piezas que ya se están procesando y, a su vez, minimizan los tiempos de espera por causa de las herramientas.

Entre los estudios que abordan el planteamiento de resolución integrada debemos destacar los realizados por Akturk (Ref 4, Ref 106, Ref 107). Las propuestas de estos trabajos son similares, aunque cambian las funciones objetivo y las técnicas de resolución empleadas. Estos tres trabajos abordan la asignación y temporización de una serie de trabajos a las máquinas, considerando el recurso herramienta. En estos trabajos, el planificador de procesos genera alternativas de herramientas para cada operación junto con sus condiciones de trabajo. Con esta información, y considerando las réplicas disponibles de cada herramienta, se asigna una herramienta a cada operación, de forma que cada una de las herramientas sólo es utilizada por una operación en el horizonte programado. Si no existen suficientes réplicas de algún tipo de herramienta para satisfacer los requerimientos de todas las operaciones, se asignan herramientas alternativas. Seguidamente se resuelve la programación de los lotes en las máquinas considerando el recurso herramienta. Para ello, se da prioridad a los trabajos con menos periodos improductivos y tiempos de procesado rápidos. Estos periodos improductivos son debidos a las cargas, descargas y transportes de herramientas, y dependen del orden de ejecución de los lotes y de la ubicación de las herramientas en el sistema productivo. Al tener cada operación asignada una herramienta, y no dejar que dos operaciones utilicen la misma herramienta en el periodo programado, no se consideran los conflictos entre máquinas por causa de las herramientas.

En otros trabajos de Akturk et al. (Ref 2, Ref 3) se aborda el problema de la programación de los trabajos en una única máquina, teniendo como objetivo minimizar el tiempo total de procesado de los trabajos, considerando los cambios de las herramientas por desgaste. Akturk et al. (Ref 2) resuelve este problema fijando tanto los tiempos de procesado para cada operación como los tiempos de vida y de cambio de cada herramienta. Más recientemente, Akturk et al. (Ref 3) resuelve este mismo problema, pero aumentando su complejidad, ya que permite modificar las condiciones de

corte en cada operación, lo que implica que los tiempos de procesado y los tiempos de vida de las herramientas varían. De esta forma se pueden lograr programaciones que mejoran el objetivo buscado.

## 2.4. RESUMEN.

Este capítulo se ha dedicado a la revisión del estado del arte relacionado con la programación y la gestión de herramientas de mecanizado. Esto se ha hecho desde el punto de vista de los objetivos de la tesis. Por ello se han tratado las funciones principales que se incluyen en la gestión de herramientas, así como la integración del gestor de herramientas con las funciones de planificación de procesos y la programación de la producción. Como resumen de este capítulo se pueden destacar las siguientes ideas:

- De acuerdo a la bibliografía, las funciones básicas relacionadas con las herramientas se pueden agrupar en dos grandes grupos o niveles. En un primer grupo se encuentran las funciones de planificación y programación de utilización de las herramientas en el sistema productivo. La función de planificación contiene las tareas incluidas en la planificación de procesos, como la selección de las herramientas y sus condiciones de corte para cada operación. La función de programación de las herramientas determina la utilización de las herramientas en las máquinas, y del resto de tareas para asegurar que las herramientas se encuentran en las máquinas y en los instantes requeridos. En un segundo grupo se encuentran las tareas realizadas en el taller para cumplir con la programación de herramientas establecida. Estas tareas se dedican a los transportes, los montajes y desmontajes de herramientas, los reglajes, etc.
- En la programación de los trabajos y del recurso herramienta hay dos estrategias estudiadas en la bibliografía: la programación independiente o no simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas, y la programación simultánea de los trabajos junto con el recurso herramienta (Ref 10).
- La programación independiente de los trabajos y las herramientas, priorizando la programación de los trabajos ha sido la más estudiada en la literatura. Esta aproximación permite una resolución del problema de la programación de los recursos de forma jerárquica, dando prioridad al recurso crítico, que son las máquinas, y facilitando la resolución del problema al abordar la programación de ambos recursos de forma separada. Los trabajos realizados bajo este punto de vista se centran en la resolución de dos problemas relacionados con las herramientas: la resolución de los conflictos

entre las máquinas por la consecución de las herramientas (Ref 111) y la reprogramación de los trabajos por escasez del recurso herramienta (Ref 76).

- La programación integrada de los trabajos y las herramientas aborda el problema de forma global, programando los trabajos en las máquinas teniendo en cuenta las limitaciones del recurso herramienta, como tiempos de vida, disponibilidad de herramientas, capacidad del almacén de la máquina, etc. (Ref 4, Ref 106). Esta forma de plantear el problema pone al mismo nivel el recurso máquina y el recurso herramienta, lo que desde el punto de vista de la importancia de ambos recursos no es adecuado, ya que las máquinas son un recurso más crítico que las herramientas. Además, este planteamiento dificulta enormemente la resolución del problema, por lo que las implantaciones que se han resuelto están limitadas a sistemas productivos con pocas máquinas.

La propuesta realizada en la tesis para la programación de las herramientas de mecanizado plantea la programación no simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas, dando prioridad a los trabajos. Para independizar la programación de los trabajos del recurso herramienta se ha propuesto trabajar con alternativas de herramientas en las operaciones generadas por la planificación de procesos asistida por ordenador. Estas alternativas permiten asignar herramientas a los trabajos previamente programados en las máquinas, resolviendo los conflictos que puedan existir por el uso simultáneo de herramientas en los mismos instantes de tiempo.



---

## **CAPÍTULO 3. MODELO FUNCIONAL.**

### **3.1. INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se va a exponer la metodología y el modelo funcional propuesto para la programación y la gestión de las herramientas de mecanizado. El recurso herramienta puede ser considerado en las diferentes etapas del ciclo productivo, desde el diseño, hasta la propia fabricación de los productos. El planteamiento y ámbito de la tesis se ha ceñido al nivel más operativo de las herramientas en el taller, por lo que al referirnos al gestor de herramientas únicamente se aborda la programación y la gestión de las herramientas a este nivel.

Esta tesis aborda la integración del gestor de herramientas con la planificación de procesos y la programación de la producción. Esta integración ha dado lugar a una propuesta para la programación de las herramientas, basada en la capacidad del planificador de procesos asistido por ordenador de generar alternativas de herramientas en las operaciones de mecanizado. Disponiendo de estas alternativas, es posible resolver las incompatibilidades que surgen con el uso de las herramientas entre las distintas operaciones debido a la programación, proporcionando un conjunto de herramientas en cada operación, compatible con la programación. De esta

forma, la programación de los trabajos se puede realizar independientemente del recurso herramienta.

Este capítulo comienza con la exposición de la propuesta adoptada para la programación y gestión de herramientas, integrándola con las distintas funciones de fabricación. A continuación se presenta la metodología propuesta para el gestor de herramientas y, finalmente se desarrolla con detalle el modelo funcional propuesto, utilizando la técnica de representación funcional IDEF0.

### **3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La propuesta de programación y gestión de las herramientas de mecanizado se encuentra enmarcada dentro del funcionamiento del sistema productivo. Desde un punto de vista amplio, la función del gestor de herramientas consiste en coordinar la utilización de las herramientas en el sistema productivo, garantizando que las herramientas adecuadas se encuentren en las máquinas cuando son requeridas para ejecutar las órdenes de producción. Esta tarea puede ser bastante compleja, principalmente por tres razones:

- Existen entornos productivos en los que las herramientas no se encuentran asignadas a una única máquina, sino que se pueden compartir entre diferentes máquinas. En este caso, hay que decidir la asignación de las herramientas concretas a las operaciones de cada máquina, coordinando el flujo de herramientas en el sistema productivo.
- Los filos de los elementos cortantes de la herramienta se van desgastando progresivamente, hasta que ésta pierde su capacidad de corte, debiendo gestionar sus cambios para continuar con el mecanizado.
- Una herramienta de mecanizado está constituida por un conjunto de elementos cortantes y de adaptadores, siendo necesario gestionar todos estos elementos.

Tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, existen dos planteamientos para resolver el problema de la programación de los trabajos y las herramientas en las máquinas. El primero aborda la programación de los trabajos y las herramientas de forma secuencial o independiente, mientras que el segundo aborda la programación simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas.

En la propuesta realizada en esta tesis se ha optado por realizar una programación no simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas, priorizando la asignación de los trabajos. Este planteamiento permite una resolución del problema de la programación de los recursos de forma jerárquica, dando prioridad al recurso crítico, que son las máquinas, y facilitando la resolución del problema al abordar la programación de ambos recursos de forma separada.

Dado que la programación de los trabajos se lleva a cabo sin considerar el recurso herramienta, para que no sea necesario realizar frecuentes reprogramaciones por causa de las herramientas, el planificador de procesos asistido por ordenador propondrá alternativas de herramientas en cada una de las operaciones. Si estas alternativas tienen tiempos de mecanizado constantes para la operación, el programador de la producción puede realizar la programación de los trabajos independientemente de la alternativa de herramienta que se seleccione finalmente para el mecanizado de la operación.

La programación de los trabajos que se toma como partida, es una programación sin holguras. Es decir, no existen tiempos muertos entre la ejecución de las órdenes en las máquinas, que podrían permitir alargar la duración de algunas de ellas. De esta forma, se pretende probar la propuesta de programación y gestión de herramientas en las condiciones más restrictivas. En caso de existir holguras, se flexibilizaría la programación, siendo más sencillo realizar la posterior programación y gestión de herramientas.

Con la propuesta del programador de la producción y las alternativas proporcionadas por la planificación de procesos asistida por ordenador, el gestor de herramientas seleccionará las herramientas adecuadas para cada operación, que sean compatibles con la programación de los trabajos, realizada previamente. Dado que estas alternativas tienen tiempos de mecanizado constantes para la operación, las herramientas son intercambiables entre sí, proporcionando flexibilidad en el proceso de asignación de las herramientas concretas a las operaciones. De esta forma, se consiguen integrar las funciones de programación, de planificación de procesos y del gestor de herramientas.

### **3.2.1. PROPUESTA DE INTEGRACIÓN DEL GESTOR DE HERRAMIENTAS CON LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS Y LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.**

Como se ha mencionado, la principal característica de la propuesta del gestor de herramientas es la integración con la planificación de procesos y la programación de la producción, permitiendo que estas dos funciones se

ejecuten sin considerar las restricciones del recurso herramienta. Los problemas debidos a la restricción del recurso herramienta los resolverá, posteriormente, el gestor de herramientas, en un nivel inferior. Por ello, el gestor debe conocer las alternativas de herramientas en las operaciones y la programación de la producción realizada.

Gracias a la capacidad de generar herramientas alternativas por la planificación de procesos asistida por ordenador, es posible especificar todas las alternativas de herramientas y las condiciones de corte en cada operación de mecanizado, mientras que la programación de la producción asigna los distintos trabajos a las máquinas, estableciendo sus instantes de inicio y finalización.

La Fig 3-1 muestra la integración del gestor con dichas funciones, donde se ha incluido también la función de la planificación de la producción, encargada de generar el plan de producción, necesario para realizar la programación.

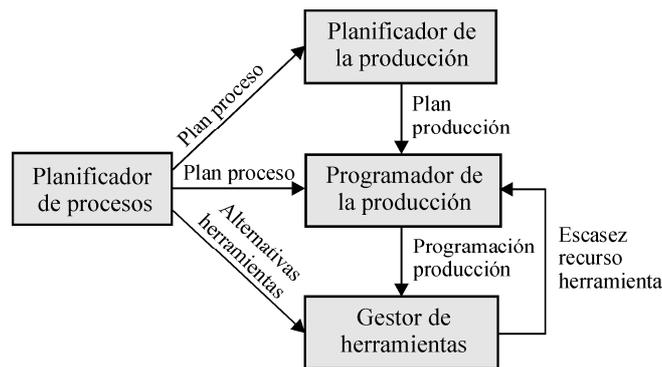


Fig 3-1. Integración del gestor de herramientas con las funciones de producción.

El planificador de la producción establece un plan de producción a medio plazo, basándose en las peticiones de los clientes y en la previsión de la demanda. En este plan se indican los productos a fabricar, su cantidad y plazo de entrega. Para establecer este plan, es necesaria la información aportada por el planificador de procesos.

El plan de producción se materializa a corto plazo mediante la programación de la producción. La programación asigna a las máquinas los distintos órdenes de producción, con unos tiempos concretos de inicio y finalización. La programación de la producción se realiza en un nivel de decisión jerárquico superior y anterior a la programación y gestión de las herramientas, considerando habitualmente sólo el recurso máquina, por ser

éste el recurso más crítico. Sin embargo, una escasez del recurso herramienta puede provocar que no se cumpla la programación. En este caso el gestor de herramientas debe realimentar al programador, indicando las desviaciones detectadas, para que éste realice las reprogramaciones oportunas.

La planificación de procesos se encarga de establecer el plan de proceso para cada pieza, decidiendo la secuencia de operaciones y los recursos necesarios (Ref 33). El concepto de operación hace referencia a una operación elemental, es decir, la realizada con una herramienta manteniendo unas determinadas trayectorias (cilindrado, copiado, etc.) y con el mismo grado de mecanizado (desbaste, semidesbaste, acabado).

El planificador de procesos selecciona la máquina o máquinas en la que se puede realizar cada uno de los trabajos. Para ello, debe conocer las características de las máquinas, como su potencia, necesaria para calcular las condiciones de corte de las herramientas, así como la capacidad del almacén de la máquina y las posibilidades de montaje de las herramientas en él.

El punto de enlace entre la planificación de procesos asistida por ordenador y la programación y gestión de herramientas es la existencia de herramientas alternativas en cada una de las operaciones. Con el término herramientas alternativas se hace referencia tanto a las herramientas que pueden ser alternativas en la operación, como a las réplicas idénticas disponibles de cada una de ellas.

La actividad de selección de herramientas para una operación de mecanizado, está abierta al conjunto de herramientas existentes en el recurso productivo, que sean capaces de realizar la operación. Es necesario por tanto aplicar algún criterio para escoger la más o las más apropiadas, para la operación. Existen dos criterios básicos, el de productividad y el económico, ambos son necesarios pero no son convergentes. Las herramientas muy productivas suelen ser caras y las herramientas económicas suelen ser poco productivas. Por lo tanto, habrá que contrapesar estos criterios de forma equilibrada o priorizar más alguno de ellos.

Sea cual sea el criterio de selección económico-productivo escogido para las herramientas, el conjunto de herramientas capaces de realizar la operación, podrán ser ordenadas en función de su idoneidad, según dicho criterio. Por lo expuesto, la herramienta más idónea no tiene porqué ser la más productiva ni la más económica, y en relación a su tiempo de mecanizado tampoco tiene porqué ser el menor de los posibles.

En este momento es importante recordar la hipótesis ya realizada de tiempo de mecanizado constante, para las herramientas alternativas de una

operación. Según lo expuesto esto no tiene porqué suceder, la herramienta óptima tendrá un tiempo y el resto no tienen porqué tener el mismo tiempo. No obstante, se puede realizar un pequeño razonamiento que prueba que sí puede haber herramientas alternativas con la misma valoración respecto al criterio económico-productivo (óptimas), y el mismo tiempo de mecanizado. Considerando la herramienta óptima, habrá varias características que si son modificadas no alterarán ni la productividad ni el coste de la herramienta, para la operación. Por ejemplo, se puede variar el ángulo de posición, la longitud de la herramienta, etc., aunque los parámetros dependerán de la operación. Si consideramos herramientas con modificaciones en dichos parámetros respecto a la óptima, tendremos posibles herramientas alternativas que tendrán la misma valoración respecto al criterio de selección, y que al ser igual de productivas requieren el mismo tiempo de mecanizado. Ciñéndonos a un ejemplo más concreto, en una operación de planeado acabado, una fresa determinada es igual de óptima que otra con doble diámetro y el mismo número de dientes, y utilizan el mismo tiempo de mecanizado para la superficie. Evidentemente, estas herramientas han de existir en el almacén del recurso productivo considerado.

Otra posibilidad reside en las herramientas cercanas al óptimo respecto al criterio económico-productivo escogido. De entre ellas, aquellas que tengan un coste y una productividad cercanos respectivamente al coste y la productividad de la herramienta óptima, podrán ser consideradas como herramientas alternativas. Esta posibilidad surge del hecho de que la productividad y el coste de una herramienta son variables, dependientes de las condiciones de corte consideradas. Por ello, al ser la productividad de estas herramientas cercana a la herramienta óptima, podremos hacer que sus tiempos de mecanizado coincidan, variando en un pequeño porcentaje las condiciones de corte.

En la selección de las herramientas, la planificación de procesos asistida por ordenador decide el primer adaptador que da soporte a los elementos cortantes (portaplaquitas, portabrocas, etc.) y los propios elementos cortantes (plaquita, broca, etc.). Dado que el principal componente de la herramienta es el primer adaptador, y que los elementos cortantes son fungibles, es decir, cada cierto tiempo deben ser sustituidos, cada herramienta puede utilizar elementos cortantes de diferentes fabricantes o características. Por ejemplo, en un taladrado se pueden seleccionar brocas de igual diámetro pero de diferente longitud. Por sencillez, y dado que el primer adaptador suele ser el fundamental, a este primer adaptador se le denominará herramienta, de aquí en adelante.

Según lo expuesto, se puede concretar que el planificador de procesos inicialmente decide las alternativas de herramientas sin considerar los

adaptadores de acoplamiento con las máquinas. El gestor de herramientas será el encargado de seleccionar el resto de adaptadores que permiten el acoplamiento de la herramienta a la máquina, coordinando así la utilización global de este recurso.

Las alternativas de herramientas en las operaciones permiten establecer la utilización del recurso herramienta, o programación de herramientas, compatible con la programación de la producción. En la programación, como ya se ha comentado, habitualmente sólo se tiene en cuenta el recurso más crítico, es decir, las máquinas. Por ello, no es posible mantener todas las alternativas de herramientas proporcionadas por el planificador de procesos, durante la ejecución de la producción. Esto se debe a que se presenta un importante problema de utilización simultánea de las mismas, por ejemplo, cuando una herramienta es requerida por distintas máquinas en los mismos instantes de tiempo. Esta situación implica que muchas de las herramientas alternativas consideradas son incompatibles con la programación. Por ello, se deben resolver las incompatibilidades o interferencias entre las herramientas, de forma que cada operación disponga de un conjunto de herramientas compatible con la programación.

La existencia de alternativas de herramientas en las operaciones permite flexibilizar la gestión de herramientas de mecanizado. Una vez resueltas las interferencias, las alternativas de herramientas permiten al gestor una mejor planificación de los cambios de herramientas por desgaste, así como alternativas para reaccionar ante imprevistos surgidos durante el funcionamiento del sistema productivo.

### **3.2.2. METODOLOGIA PROPUESTA PARA EL GESTOR DE HERRAMIENTAS.**

La metodología propuesta para el gestor de herramientas establece las tareas necesarias para la programación y la gestión del recurso herramienta, así como su orden de ejecución.

La programación y gestión de las herramientas se realizará para periodos de tiempo que se denominan horizontes de trabajo. Cada uno de estos periodos temporales incluye, por lo general, varias órdenes de producción en cada una de las máquinas, donde cada orden muestra la fabricación de un lote de piezas.

Las previsiones del gestor se realizan con antelación a la ejecución del horizonte, permitiendo que se lleven a cabo las funciones que se proponen en la metodología. Es decir, en cada horizonte, el gestor de herramientas realiza las previsiones para el horizonte siguiente.

La Fig 3-2 muestra una programación de órdenes representada mediante un diagrama de Gantt. En ordenadas se muestran las máquinas y en abscisas el tiempo, indicando los diferentes horizontes de trabajo. El tiempo entre órdenes se dedica al montaje y al reglaje de los utillajes y las herramientas. El tiempo programado en cada una de las órdenes contiene todas las tareas necesarias para el procesado de un lote de piezas en la máquina, incluyendo los tiempos de fabricación, los de carga y descarga de piezas y los relacionados con las herramientas, como los de cambio de filos desgastados. Con respecto a las herramientas, el programador de la producción debe estimar los tiempos de cambio de filos, las cargas, descargas, y reglajes de herramientas necesarios durante la ejecución de cada lote.

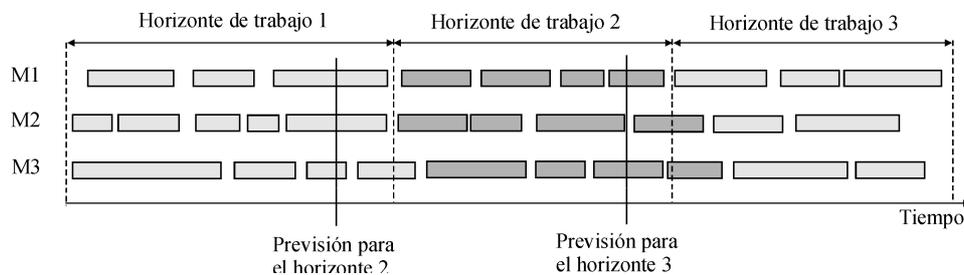


Fig 3-2. Horizontes de trabajo.

El gestor puede informar al programador de la producción sobre la escasez del recurso herramienta para cumplir con dicha programación, y sobre la validez de los tiempos previstos para las herramientas, pudiendo solicitar una reprogramación de los trabajos por causa del recurso herramienta.

Antes de exponer la metodología propuesta para la programación y gestión de herramientas, es necesario explicar cómo se van a representar gráficamente las operaciones de mecanizado en las órdenes de producción. Como se ha comentado, una orden incluye todas las tareas necesarias para fabricar un lote de piezas. Entre estas tareas se incluye el mecanizado de cada una de las piezas del lote, los cambios de piezas, la carga y descarga de herramientas, los reglajes, etc. Desde el punto de vista de la programación y la gestión de las herramientas, lo más importante son las alternativas de herramientas que se utilizarán en cada operación de mecanizado. Por ello, aunque no sea una representación temporal de lo que sucede en la orden de fabricación, sino para facilitar la comprensión de la exposición, se mostrarán únicamente las operaciones que se ejecutan en cada orden, tal y como se indica en la Fig 3-3. Estas operaciones se realizarán en cada una de las piezas

que componen el lote. Por ello, las herramientas serán requeridas durante toda la ejecución de la orden. Los cambios de filos por desgaste o los reglajes de herramientas se efectuarán, cuando sean necesarios, entre el mecanizado de dos piezas del lote.

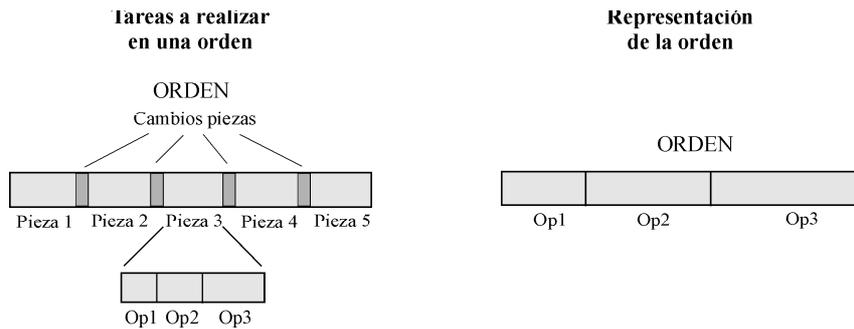


Fig 3-3. Orden de fabricación.

La metodología propuesta para la programación y la gestión de las herramientas de mecanizado implica la ejecución secuencial de cuatro funciones (Ref 71). Entre estas funciones pueden existir realimentaciones, para resolver problemas puntuales, que se mostrarán durante la exposición del modelo funcional. La Fig 3-4 muestra estas cuatro funciones.

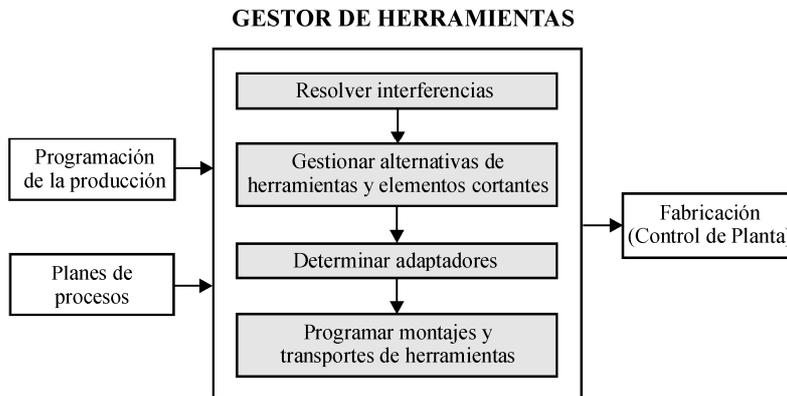


Fig 3-4. Metodología propuesta para el gestor de herramientas.

*Resolver interferencias*

Esta función realiza la programación de las herramientas, asignando las herramientas a las operaciones previamente programadas en las máquinas. La selección de las posibles alternativas de herramientas en cada operación por el planificador de procesos asistido por ordenador, provoca incompatibilidades o interferencias con la programación de la producción, ya que no se ha tenido en cuenta la interacción del recurso herramienta. A la incompatibilidad asociada a una herramienta se le va a denominar interferencia. Evidentemente, la extensión temporal de la interferencia se limita al horizonte que se está analizando.

Las interferencias surgen porque una herramienta no puede ser utilizada simultáneamente en varias operaciones. Un ejemplo de interferencia se debe a la rivalidad existente entre las máquinas por la consecución de herramientas. En este caso, una misma herramienta es requerida por distintas máquinas en órdenes que se solapan en el tiempo, o aún cuando los órdenes no se solapan en el tiempo, si no es posible transportar y preparar las herramientas entre dichas órdenes.

Un ejemplo sencillo de interferencias se muestra en la Fig 3-5. En este ejemplo se identifican las alternativas de herramientas en las operaciones mediante números (1, 2, 3, 4 y 5), así como las interferencias generadas por las herramientas 1 y 2. En lo sucesivo, las alternativas de herramientas y las interferencias se van a representar de esta forma.

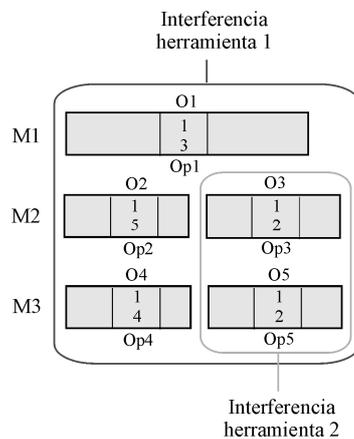


Fig 3-5. Ejemplo de interferencias de herramientas.

Estas interferencias se resuelven, reduciendo el número de alternativas de herramientas en las operaciones. La resolución de interferencias es un

problema complejo, por el gran número de interferencias que se presentan y por el solapamiento que se produce entre ellas. En la Fig 3-6, todas las herramientas que aparecen presentan interferencias, excepto la 7, 8, 21, 22, 23, 24, 27 y 28. Por claridad de la figura sólo se han representado algunas de las interferencias.

Una vez resueltas las interferencias, cada operación tiene asignadas diversas alternativas de herramientas, sin que existan interferencias entre ellas. Estas alternativas de herramientas facilitan la posterior gestión del recurso.

La propuesta de resolución de las interferencias que se plantea consiste en resolver las interferencias una a una, según su criticidad, para garantizar una solución al problema (Ref 72). Para evaluar la criticidad de cada una de las interferencias se cuantifican determinados parámetros, como son el número de máquinas que requieren simultáneamente la herramienta, el número de alternativas de herramientas en las operaciones, etc. Por otro lado, esta función detecta la escasez del recurso para cumplir con la programación establecida cuando, por ejemplo, existen tres máquinas que requieren una misma alternativa de herramienta simultáneamente, pero sólo existen dos herramientas disponibles.

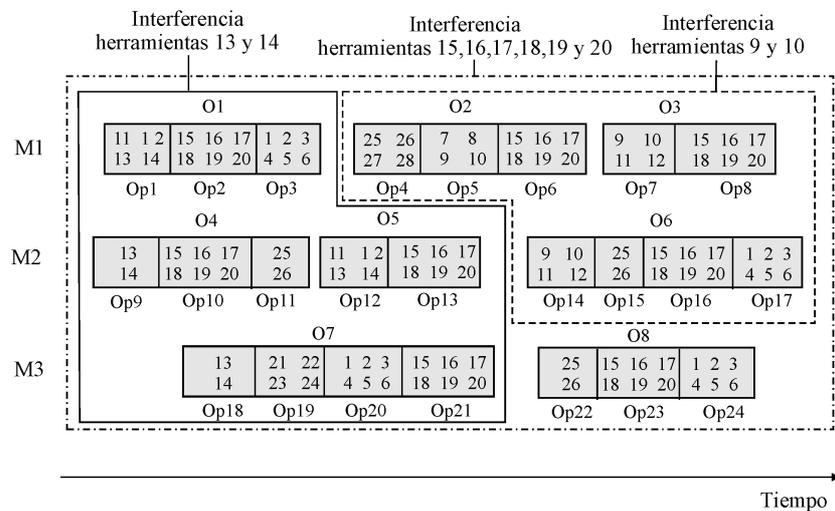


Fig 3-6. Interferencias en el horizonte de trabajo.

### Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes

Esta función selecciona las herramientas a utilizar en cada una de las operaciones, de entre las alternativas existentes. Especifica la estrategia de

cambio de sus filos, y los instantes y tiempos de paro debidos a dichos cambios y a los reglajes de producción. Para ello, se basa fundamentalmente en las alternativas de herramientas disponibles en las operaciones tras la resolución de las interferencias.

Como esta función gestiona las alternativas de herramientas y sus cambios, se encarga de informar al programador si las previsiones de los tiempos relacionados con las herramientas en la orden de fabricación son correctas. Dado que esta función dispone de las alternativas de herramientas en cada operación, es la candidata a reaccionar ante las incidencias ocurridas en el sistema productivo. Estas incidencias, como puede ser una rotura, disminuyen el número de herramientas disponibles. De esta forma, se puede trabajar con las alternativas de herramientas que quedan disponibles tras las incidencias.

#### *Determinar adaptadores*

La carga de las herramientas en las máquinas necesita de adaptadores de acoplamiento, como conos ISO, acoplamientos VDI, adaptadores intermedios, etc. Esta función es la encargada de coordinar el uso de estos elementos entre las distintas alternativas de herramientas, detectando la escasez de adaptadores en determinados instantes de tiempo.

#### *Programar montajes y transportes de herramientas*

Esta función establece una programación de las actividades relacionadas con las herramientas en el taller, necesarias para tener preparadas las herramientas en las máquinas y en los instantes que se requieren. Estas actividades incluyen tanto los transportes como las tareas de preparación de las herramientas (montajes, desmontajes, prerreglajes, etc.).

### **3.2.3. APORTACIONES DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.**

La metodología propuesta para el gestor de herramientas presenta como punto más destacable e integrador, trabajar con alternativas de herramientas en las operaciones de mecanizado. Estas alternativas permiten realizar la programación de herramientas, gestionar los cambios de los filos de los elementos cortantes y reaccionar ante las incidencias producidas en el entorno productivo relativas a las herramientas.

- Las alternativas proporcionadas por el planificador de procesos permiten que la programación de herramientas o resolución de interferencias sea posible, ya que usualmente se dispone de alternativas suficientes para asignar al menos una alternativa de

herramienta a cada una de las operaciones de mecanizado. En la resolución de las interferencias, la existencia de alternativas de herramientas da una visión global del recurso herramienta, necesario para satisfacer los requerimientos de los trabajos, permitiendo alcanzar los objetivos marcados en la resolución de las interferencias. Como objetivos se pueden señalar la minimización de los transportes de herramientas o la asignación de más herramientas a las operaciones que tienen más necesidad de herramientas, por ejemplo, porque tienen una frecuencia de cambio de filos mayor.

- La propuesta de gestión de los filos de los elementos cortantes también está basada en la existencia de alternativas de herramientas. Las alternativas de herramientas permiten minimizar los paros de producción, ya que cuando los filos de una herramienta se desgastan, se pueden utilizar herramientas alternativas para continuar con el mecanizado.
- Las alternativas de herramientas facilitan la reacción del gestor ante incidencias ocurridas durante el funcionamiento del sistema productivo relacionadas con las herramientas, como roturas de herramientas. Estas incidencias se traducen en una disminución de las alternativas de herramientas. Si tras la incidencia se dispone de alternativas de herramientas en la operación, se realiza una nueva asignación de herramientas a las operaciones y una nueva gestión de los filos de los elementos cortantes, hasta que las herramientas afectadas estén disponibles. De esta forma, las alternativas de herramientas permiten al gestor una cierta independencia con respecto a las incidencias, no interaccionando con otras funciones, como la programación de la producción, salvo en el caso de escasez del recurso.

### **3.3. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL.**

La descripción del modelo funcional propuesto se va a realizar mediante la técnica de modelado IDEF0, que permite una descripción gradual hasta el nivel de detalle deseado. En el siguiente punto, se expondrá la técnica de modelado IDEF0.

#### **3.3.1. MODELO IDEF0.**

Las técnicas de modelado IDEF (Ref 77) son herramientas de trabajo que proporcionan tanto la posibilidad de análisis de los sistemas de fabricación, como las comunicaciones entre el personal encargado de éstos. Estas técnicas IDEF surgieron del programa de Fabricación Asistida por Ordenador

Integrada (ICAM) de U.S.A. En concreto, la técnica IDEF0 está especializada en la creación de modelos funcionales, entendiendo un modelo funcional como una representación estructurada de las funciones, actividades o procesos a realizar dentro del sistema modelado.

La técnica IDEF0 es muy útil para definir los requerimientos y especificar las funciones a realizar por un nuevo sistema. Esto facilita la implementación acorde con los requerimientos y funciones especificados mediante IDEF0. Es importante señalar que esta técnica es válida para cualquier tipo de sistema.

La aplicación de IDEF0 a un sistema se materializa en la obtención de un modelo funcional compuesto por una serie de diagramas, texto y glosario, todos ellos relacionados entre sí. Los componentes principales utilizados en este modelado son las funciones (representadas en los diagramas por cajas) y los datos u objetos que relacionan esas funciones (representadas por flechas).

IDEF0, como lenguaje de modelado funcional, presenta las siguientes características:

- Simplicidad.
- Coherente, estando ampliamente probado.
- Es una técnica muy comprensiva, gracias a su representación gráfica detallada.
- Facilita la comunicación por su exposición jerárquica.
- Puede ser generado por una gran variedad de herramientas gráficas de ordenador.

Un sistema está compuesto de unas partes dependientes o independientes entre sí, que trabajan conjuntamente para la consecución de una función útil. El modelo de un sistema representa sus distintos componentes. Cada una de esas partes que componen el sistema es una combinación de elementos, como personas, información, software, procesos, equipamientos, productos, etc. El modelo del sistema describe qué realiza el mismo, quién lo controla, sobre qué cosas actúa, qué medios utiliza y qué produce.

La aplicación de la técnica IDEF0 de modelado funcional, basada en una combinación de gráficos y texto, da como resultado un modelo compuesto de una serie jerárquica de diagramas, que gradualmente muestran un mayor detalle de las funciones y sus relaciones dentro del sistema. Se utilizan tres tipos de diagramas: gráficos, texto y glosario. Los diagramas gráficos definen las funciones y sus relaciones mediante una sintaxis y semántica de cajas y

flechas, mientras que los diagramas de texto y glosario aportan información adicional para los primeros.

### 3.3.1.1. Sintaxis y Semántica.

La sintaxis de un lenguaje define todos sus componentes y las reglas para definir sus relaciones. Los componentes sintácticos de IDEF0 son: cajas, flechas, reglas y diagramas (Fig 3-7). Las cajas representan funciones, definidas como actividades, procesos o transformaciones. Las flechas representan los datos u objetos relacionados por las funciones. Las reglas definen cómo se utilizan cada uno de los componentes, y los diagramas aportan el formato para presentar el modelo verbal y gráficamente.

Cada caja representa una función, posee un nombre que la describe, y un número en su interior utilizado para identificar la caja con el texto asociado.

Las flechas utilizadas no representan, como tradicionalmente ocurre en los diagramas de flujo una secuencia, sino un paso o transmisión de datos u objetos entre las funciones que relacionan.

Mientras que la sintaxis hace referencia a los componentes, la semántica nos muestra el significado de cada uno de estos componentes sintácticos ayudando a su interpretación correcta.

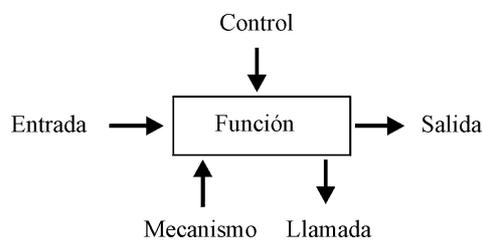


Fig 3-7. Componentes sintácticos de un diagrama IDEF0.

Como ya se ha indicado cada caja representa una función que se relaciona con otras mediante datos u objetos, representados mediante flechas. El tipo de relación entre las cajas, representado por las flechas, tiene un significado diferente según los lados de las cajas que conectan las flechas:

- Las flechas que entran por la parte izquierda de la caja representan las entradas. Las entradas son los datos u objetos que son transformados o consumidos por la función para producir las salidas.

- Las flechas que entran por la parte superior son los datos u objetos de control. Éstos especifican las condiciones requeridas para que la función produzca las salidas correctas.
- Las salidas están representadas mediante las flechas que salen por el lado derecho de la caja, siendo el resultado de la actividad de la función.
- Las flechas conectadas por la parte inferior de la caja representan los mecanismos. Si entran en la caja identifican los medios utilizados que dan soporte para la ejecución de la función, mientras que si salen de la caja son flechas de llamada. Éstas se utilizan cuando una función está desarrollada con más detalle en otro diagrama, y permiten compartir detalles entre modelos y entre partes de un mismo modelo.

### 3.3.1.2. Diagramas IDEF0.

Un modelo IDEF0 está compuesto por un diagrama gráfico, un texto y un glosario todos ellos relacionados entre sí. El diagrama gráfico es el componente más importante de un modelo, formado por cajas, flechas, etc., donde cada caja, que representa una función, se descompone en diagramas más detallados hasta llegar al nivel de detalle suficiente para los objetivos perseguidos (Fig 3-8).

El diagrama de más alto nivel posee la información más general o abstracta. Cada modelo parte de un diagrama de este tipo, que representa el sistema como una sola caja y sus flechas. Este diagrama se denomina A-0. Puesto que una sola caja representa todo el sistema, es muy general, mostrando el alcance o propósito del modelo, así como su punto de vista. Esta función representada por el diagrama A-0 se descompone en subfunciones o funciones más específicas mediante la creación de su diagrama hijo, del que a su vez cada una de sus funciones puede ser desarrollada en otros diagramas y así sucesivamente.

El hecho de que cada caja de un diagrama hijo pueda ser detallada hace que éste sea también un diagrama padre. Esto se indica mediante un código escrito en la esquina inferior derecha de la caja padre que apunta a su diagrama hijo.

Los diagramas pueden tener asociado un texto estructurado que permita destacar las características, flujos, etc. Esta información clarifica el significado de los puntos o aspectos que se consideren más significativos.

De la misma forma en el glosario se definen las abreviaturas, palabras y frases utilizadas en los diagramas gráficos para la correcta interpretación de éstos.

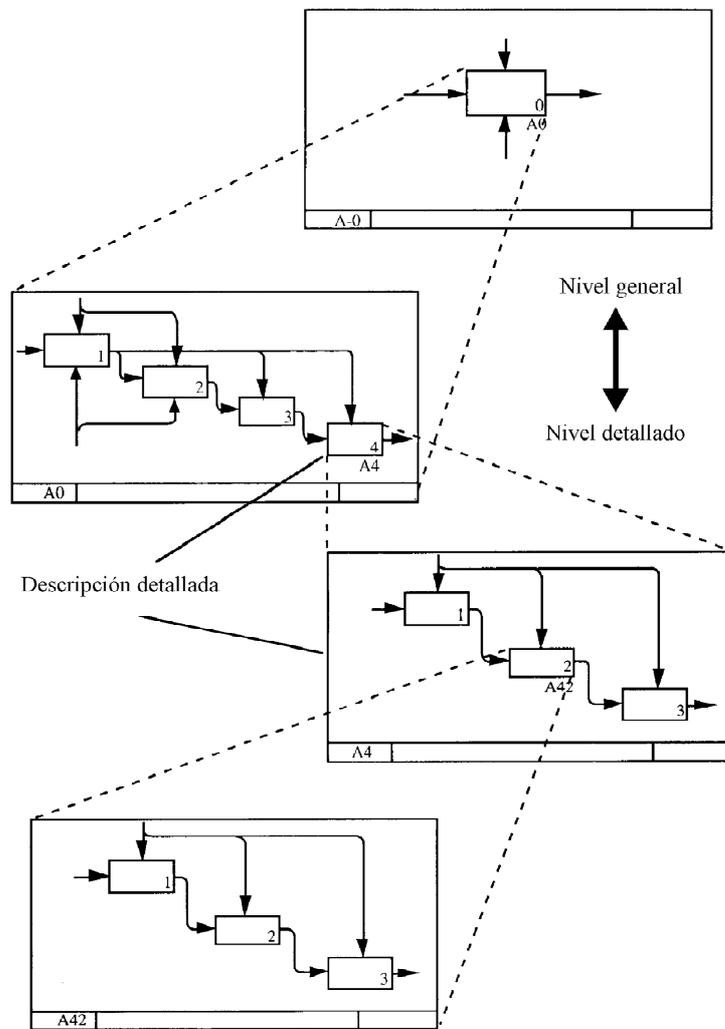


Fig 3-8. Estructuración jerárquica de los diagramas IDEF0.

### 3.3.2. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA PROPUESTA DEL GESTOR.

A continuación se describe el modelo funcional propuesto para la programación y gestión de herramientas de mecanizado según IDEF0,

partiendo desde un diagrama principal, donde se enmarca la fabricación, hasta las funciones que son objeto de la tesis.

El alcance de la tesis únicamente abarca la programación y la gestión de herramientas de mecanizado en el nivel más operativo. Sin embargo, se ha considerado necesario establecer un marco genérico para ubicar dicha programación y gestión con el resto de funciones de fabricación, en un entorno productivo dedicado a la fabricación por lotes mediante mecanizado.

Los dos primeros diagramas del modelo IDEF se han centrado en enmarcar el gestor de herramientas en este entorno. Dado que en la propuesta de la tesis se plantea un gestor de herramientas integrado con la planificación de procesos y la programación de la producción, estos diagramas muestran estas interacciones. La propuesta funcional del gestor de herramientas muestra las funciones e informaciones principales. Como consecuencia de la propuesta de gestión, se ha desarrollado una propuesta para la programación de herramientas, que se expone en los diagramas inferiores. La descomposición en diagramas de la propuesta funcional se muestra a continuación.

- A0: Fabricar
  - A1: Diseñar producto
  - A2: Generar planes de proceso
  - A3: Planificar producción
  - A4: Producir
    - A41: Programar producción
    - A42: Gestionar herramientas
      - A421: Determinar horizontes de trabajo
      - A422: Resolver interferencias
        - A4221: Detectar y analizar interferencias
        - A4222: Seleccionar interferencia a compatibilizar
        - A4223: Eliminar interferencia
          - A42231: Determinar posibles soluciones de la interferencia
          - A42232: Caracterizar posibles soluciones de la interferencia
          - A42233: Seleccionar solución de la interferencia
      - A423: Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes
      - A424: Determinar adaptadores
      - A425: Programar montajes y transportes de herramientas
    - A43: Gestionar otros recursos
    - A44: Fabricar piezas
    - A45: Monitorización

Según la jerarquía empleada por la técnica de modelado IDEF0, se expone en primer lugar el diagrama A-0, que representa un sistema de fabricación como única función desde el punto de vista más general. Seguidamente, se

pasa a los niveles inferiores, concretamente al nivel A0, en el que se muestran las principales funciones implicadas en la fabricación. Dentro de este nivel, se desarrolla únicamente la función Producir (A4), donde se muestra la ubicación del gestor de herramientas en el entorno productivo. Sin embargo, sólo se detallarán las funciones y los subniveles pertenecientes al diagrama A42, que corresponden a la propuesta del gestor de herramientas (Fig 3-9).

El diagrama A42 y sus correspondientes subniveles muestran la propuesta realizada para el gestor de herramientas: Determinar horizonte de trabajo (A421), Resolver interferencias (A422), Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423), Determinar adaptadores (A424) y Programar montajes y transportes de herramientas (A425). Aunque se muestra la propuesta funcional completa para el gestor de herramientas, la tesis se ha centrado en la programación de herramientas o resolución de las interferencias, porque se trata del punto clave que sustenta la propuesta general. Por ello, en la descripción de la función Resolver interferencias (A422) aparece un nuevo diagrama IDEF0, denominado Eliminar interferencia (A4223) que describe los pasos a seguir para eliminar dichas interferencias.

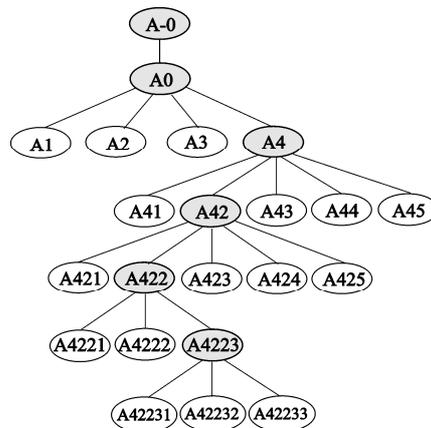


Fig 3-9. Organización jerárquica del modelo IDEF0 propuesto.

### 3.3.2.1. Sistema de fabricación (A-0).

El diagrama A-0 representa el nivel superior o general de un sistema que tiene por objetivo la fabricación de piezas mecánicas mediante mecanizado, representado desde el punto de vista del gestor de herramientas de mecanizado. Consta de una sola función denominada Fabricar, e incluye un gran número de actividades, cuyo objetivo es conseguir la fabricación de

distintos productos o piezas. Entre el conjunto de estas actividades destacan el diseño del producto, la generación de los planes de proceso, la planificación de la producción y la propia producción. La descripción del contexto se muestra en la Fig 3-10.

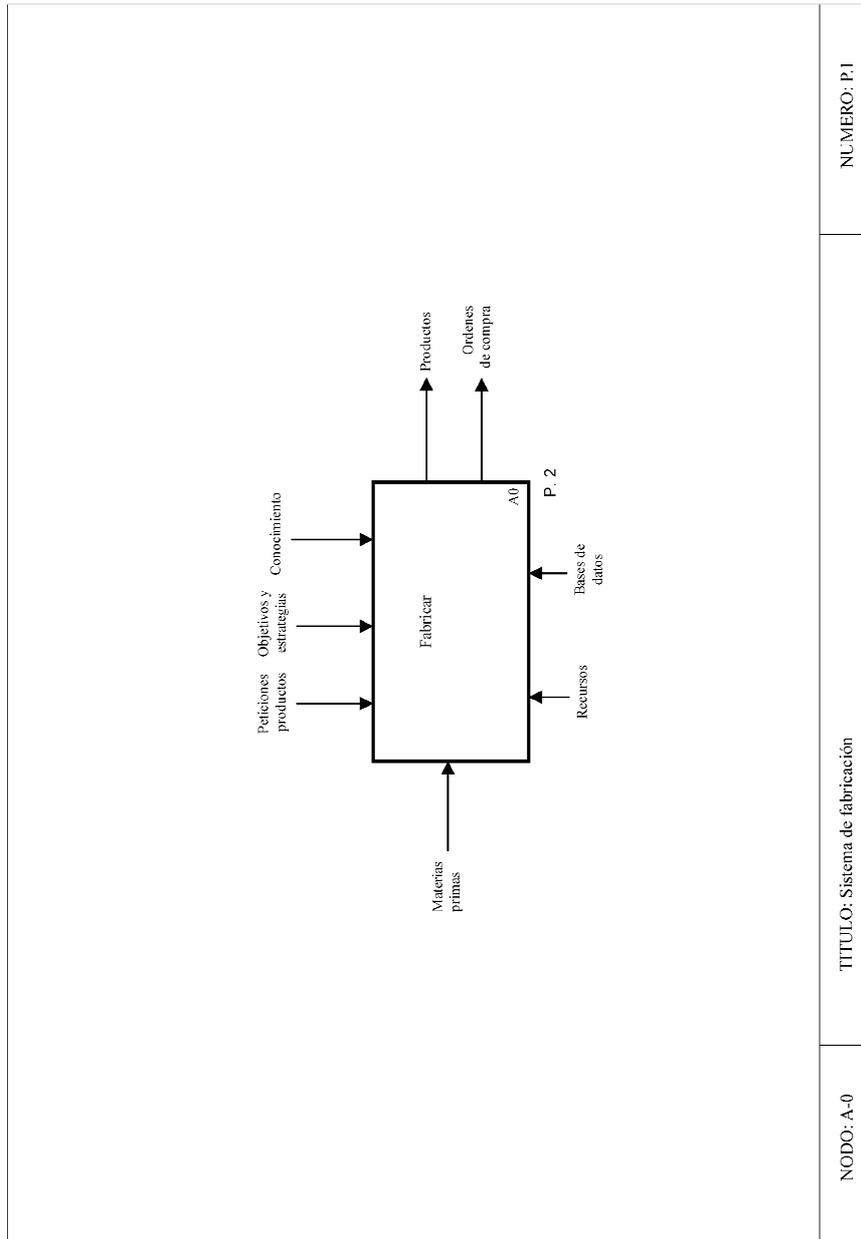


Fig 3-10. Contexto de un sistema de fabricación.

Datos de entrada:

- Materias primas. Describe las materias primas o productos semielaborados que son transformados durante el proceso de fabricación.

Datos de control:

- Peticiones productos. Conjunto de peticiones a las que tiene que dar servicio el sistema productivo. Estas peticiones pueden provenir de pedidos en firme realizados por clientes o de órdenes de fabricación lanzadas contra almacén, para cubrir las previsiones de demanda. Cada una de estas peticiones contiene las especificaciones necesarias de diseño, calidad, tamaño de lote, fechas de entrega, etc.
- Objetivos y estrategias. Muestra los objetivos que la empresa pretende conseguir. Entre estos objetivos se pueden encontrar maximizar el beneficio, fabricar un producto con elevada calidad, etc. Estos objetivos se materializan mediante distintas estrategias, que se deciden en un nivel superior de carácter más organizativo.
- Conocimiento. Muestra el conocimiento o “saber hacer” relativo a las funciones del sistema. Este conocimiento puede ser aportado mediante bases de conocimiento, por los trabajadores, etc.

Mecanismos:

- Recursos. Representa los recursos necesarios para la fabricación de las piezas, como son las máquinas, las herramientas, los utillajes, etc.
- Bases de datos. Contiene información descriptiva de los recursos productivos del sistema: máquinas, almacenes, transportes, herramientas, utillajes, etc.

Datos de salida:

- Productos. Salida principal de la función, que muestra las piezas y los productos fabricados.
- Órdenes de compra. Órdenes de compra lanzadas a los distintos proveedores, en las que se indican la cantidad de materias primas y recursos consumibles y no consumibles (como máquinas, utillajes, herramientas) necesarios para la fabricación.

### **3.3.2.2. Fabricar (A0).**

El diagrama A0 representa el primer nivel de detalle del sistema de fabricación y en él se describen las principales funciones implicadas en la fabricación. En la Fig 3-11 se muestra el diagrama IDEF0 para este sistema, que incluye las siguientes funciones:

- Diseñar producto (A1).
- Generar planes de proceso (A2).
- Planificar producción (A3).
- Producir (A4).

#### 3.3.2.2.1. *Diseñar producto (A1).*

Esta función define el producto a fabricar, especificando sus características funcionales y físicas, basándose en los requerimientos establecidos para el producto. Para ello, necesita información tanto de las capacidades de fabricación, como de requerimientos legales, de calidad, etc. Esta función se realimenta con la de planificación de procesos que, en caso de imposibilidad de fabricar la pieza con el diseño establecido, propone rediseños, para ajustarse a las capacidades de fabricación.

Datos de control:

- Requerimientos producto. Contiene las necesidades o especificaciones referentes al producto a fabricar.
- Objetivos y estrategias. Objetivos y estrategias por los que se guía la empresa a la hora de diseñar el producto (economía, nivel de calidad, etc.).
- Rediseño. Solicitud por parte del planificador de procesos de modificaciones en la pieza, por incapacidad de los procesos y recursos disponibles.

Mecanismos:

- Capacidades fabricación. Describe las capacidades de realizar distintas formas con determinadas calidades, con los medios productivos disponibles.

Datos de salida:

- Especificaciones diseño. Descripción del producto a fabricar.

#### 3.3.2.2.2. *Generar planes de proceso (A2).*

Función que establece los planes de procesos para fabricar cada uno de los productos, de forma que estos cumplan con todas sus especificaciones. Cada plan determina con detalle los procesos y medios productivos necesarios, así como su utilización, basándose en la disponibilidad de los recursos. Si no existen recursos y capacidades adecuadas, informa a la función de diseño, para rehacer los diseños y, si es imposible el rediseño, plantea la necesidad de adquirir nuevos recursos.

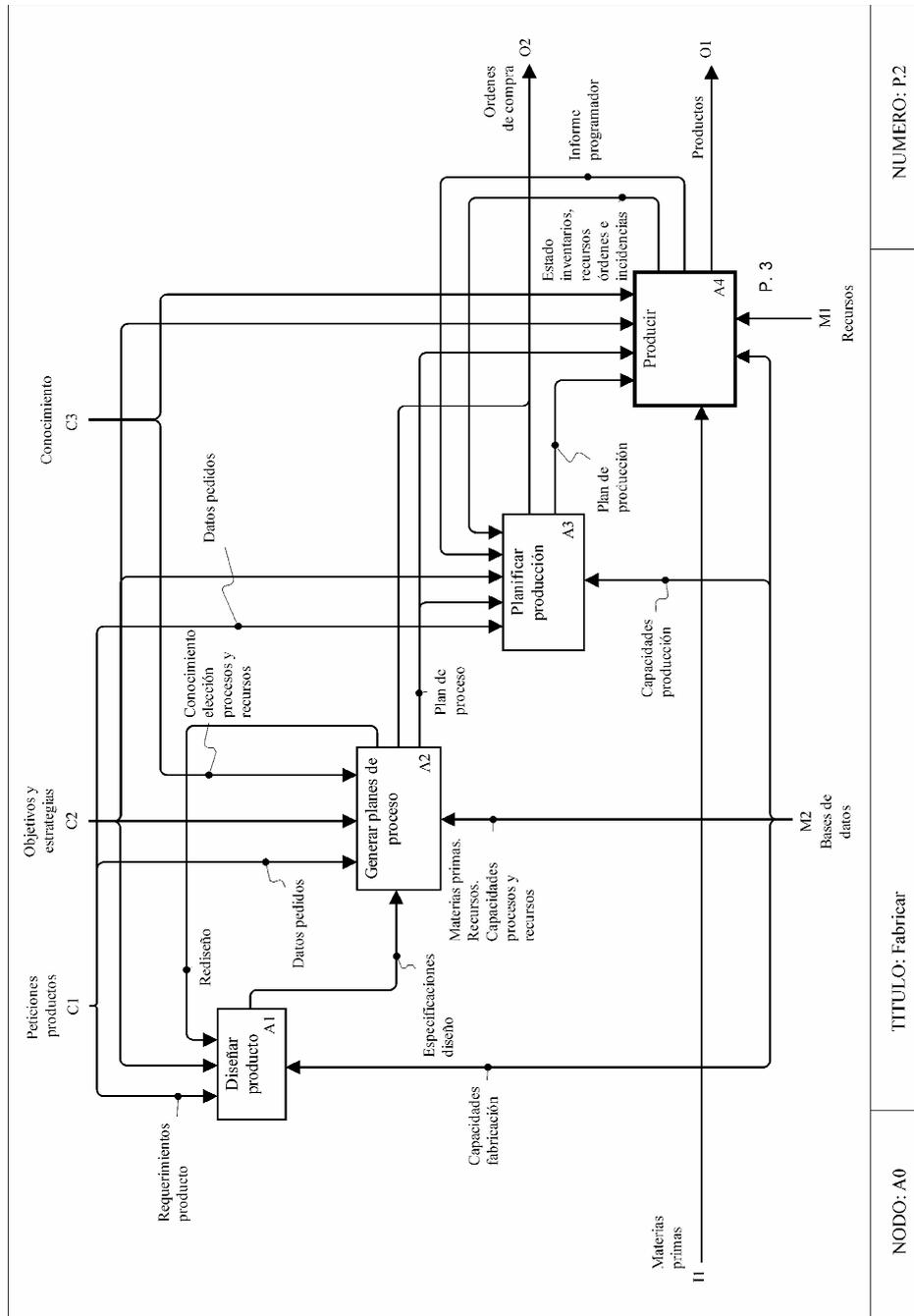


Fig 3-11. Primer nivel funcional de un sistema de fabricación.

La planificación de procesos puede generar planes de procesos con alternativas. Las alternativas a nivel de máquinas facilitan la programación de la producción, mientras que las alternativas de herramientas en las operaciones permiten flexibilizar la programación y gestión de herramientas.

En relación a las herramientas, según la metodología expuesta para el gestor de herramientas, la planificación de procesos selecciona las alternativas de herramientas capaces de efectuar cada operación, en base a unos criterios de selección determinados (economía, productividad, etc.). Para cada una de las operaciones, especificará sus condiciones de trabajo (velocidades, avances, profundidades y trayectorias) y sus costes.

Datos de entrada:

- Especificaciones diseño. Descripción de las piezas a fabricar.

Datos de control:

- Datos pedidos. Información que detalla el tipo y número de piezas de cada lote a fabricar, su frecuencia de fabricación, así como una aproximación de los costes y los tiempos de fabricación requeridos por el cliente.
- Objetivos y estrategias. Objetivos y estrategias por los que se guía la empresa a la hora de generar el plan de proceso, como economía, rapidez, utilización uniforme de recursos, etc.
- Conocimiento elección procesos y recursos. Conocimiento que hace referencia a la elección de los procesos y recursos adecuados, que puede provenir de los trabajadores, de bases de conocimiento, etc.

Mecanismos:

- Materias primas. Recursos. Capacidades procesos y recursos. Esta información representa los materiales disponibles y su estado de suministro, así como los datos relativos a los recursos disponibles y las capacidades tecnológicas de máquinas, operaciones, utillajes, herramientas, etc.

Datos de salida:

- Plan de proceso. Descripción detallada del plan de fabricación de cada pieza. Contiene los datos relativos a procesos, operaciones, máquinas, utillajes, herramientas, condiciones de trabajo, tiempos, costes, etc.
- Rediseño. Informe que indica la imposibilidad de fabricar algún elemento o parte de las piezas según el diseño propuesto, debido a la falta de capacidad de los procesos y los recursos disponibles.
- Órdenes de compra. Insuficiencia de los recursos existentes para fabricar los productos, debiendo plantearse la adquisición de nuevos recursos, como máquinas, herramientas, etc.

### 3.3.2.2.3. Planificar producción (A3).

Esta función decide qué productos se han de fabricar y/o subcontratar, estableciendo un plan de producción a seguir durante un periodo medio de tiempo (semanas o meses), basándose en las fechas de entrega previstas para los distintos productos. En este plan se indican los productos a fabricar, su cantidad y plazo de fabricación, siendo necesario un estudio de utilización de recursos para garantizar la viabilidad del plan. Establecer el plan de producción requiere información sobre los componentes del producto (conjuntos, subconjuntos, componentes y materiales necesarios) y de los procesos y recursos necesarios para su transformación (operaciones, máquinas, utillajes, herramientas, tiempos de preparación, etc.).

Como desglose del plan de producción se establecen las necesidades de materias primas y recursos que serán consumidos por la fabricación, así como los requerimientos de equipos, como máquinas, que pueden ser necesarios si se decide aumentar la capacidad de producción.

En relación a los recursos, si el programador de la producción advierte que reiteradamente sus programaciones no son viables por causa de algún recurso, como pueden ser las herramientas, el planificador estudiará la posibilidad de adquirir nuevos recursos para cumplir con las programaciones de la producción.

El plan de producción puede modificarse dependiendo del funcionamiento del sistema productivo, por ejemplo cuando las órdenes de fabricación presentan graves retrasos por incidencias ocurridas en producción, como puede ser la rotura de una máquina.

Datos de control:

- Datos pedidos. Muestra el tipo y número de piezas que componen cada lote, así como las fechas de entrega requeridas para cada uno.
- Plan de proceso. Contiene los recursos y tiempos necesarios para la fabricación de cada producto.
- Informe programador. Informe donde se indican los problemas detectados de forma reiterada para el cumplimiento de las programaciones, debido principalmente a la escasez de recursos, como pueden ser las herramientas.
- Objetivos y estrategias. Objetivos por los que se guía la empresa en la generación del plan de producción, como puede ser priorizar los pedidos de determinados clientes.

- Estado inventario, recursos, órdenes e incidencias. Informe mandado desde producción, donde se refleja el estado de la fabricación, el estado de los recursos, los niveles de inventario y las incidencias ocurridas.

Mecanismos:

- Capacidades producción. Muestra la capacidad de producción del sistema.

Datos de salida:

- Plan de producción. Plan donde se indican los productos a fabricar, su cantidad y plazo de fabricación, en un periodo de tiempo.
- Órdenes de compra. Especifica las compras a realizar de materias primas y de recursos consumidos por la fabricación, así como la adquisición de nuevos equipos para cumplir con el plan de producción.

#### 3.3.2.2.4. *Producir (A4).*

Esta función ejecuta el plan de producción establecido por el planificador de la producción, controlando todos los recursos productivos y el flujo de materiales, y teniendo como objetivo transformar los materiales en bruto en productos semielaborados o acabados.

La transformación del plan de producción en productos requiere una programación de utilización de los distintos recursos productivos (máquinas, herramientas, utillajes, etc.). Esta programación de los recursos se realizará en dos fases. En primer lugar, y dado que las máquinas representan un recurso crítico, se asignarán los trabajos a las máquinas, estableciendo sus instantes de entrada y salida. En segundo lugar, se programarán y gestionarán los recursos productivos que no se consideran críticos, como son las herramientas y los utillajes, para que se encuentren preparados a tiempo y no detengan el proceso de producción. Estos recursos se asignarán a los trabajos ya programados en las máquinas. Evidentemente, la gestión de los recursos, que no se consideran críticos, permite reducir los tiempos no productivos generados cuando estos recursos no están disponibles en el lugar e instantes requeridos.

Esta función informa sobre el estado de las órdenes fabricación, los recursos consumidos, etc., así como de las incidencias producidas que pueden provocar desviaciones con respecto a las previsiones realizadas.

Datos de entrada:

- Materias primas. Describe las materias primas o productos semielaborados que serán transformados durante el proceso de producción.

Datos de control:

- Plan de producción. Plan donde se indican los productos a fabricar, su cantidad y plazo de fabricación, en un periodo de tiempo.
- Plan de proceso. Contiene la secuencia de máquinas y operaciones de cada producto, así como los recursos necesarios, y los tiempos y costes estimados para su fabricación.
- Objetivos y estrategias. Muestra las estrategias y objetivos por los que se rige el proceso de producción, como el grado de utilización de los recursos, la minimización del trabajo en curso, etc.
- Conocimiento. Conocimiento que hace referencia a las actividades del proceso de producción.

Mecanismos:

- Recursos. Representa los recursos necesarios en el proceso de fabricación: máquinas, herramientas, utillajes, transportes, etc.
- Bases de datos. Información descriptiva de los recursos productivos: máquinas, almacenes, transportes, herramientas, utillajes, etc.

Datos de salida:

- Productos. Muestra las piezas y los productos fabricados.
- Informe programador. Informe donde se indican los problemas detectados para el cumplimiento de las programaciones, debido principalmente a la escasez reiterada de recursos, como pueden ser las herramientas.
- Estado inventarios, recursos, órdenes e incidencias. Muestra el estado de la fabricación, los recursos consumidos, los niveles de inventario y las incidencias ocurridas.

### **3.3.2.3. Producir (A4).**

Como se ha mencionado, esta función tiene como objetivo la transformación de las materias primas en productos semielaborados o finales. En la propuesta para esta función se contemplan las actividades que se especifican en la Fig 3-12:

- Programar producción (A41). Función encargada de la programación de los trabajos o lotes en las máquinas.
- Gestionar herramientas (A42). Función que realiza la programación y gestión de herramientas de mecanizado para cumplir con la programación de los lotes en las máquinas.

- Gestionar otros recursos (A43). Realiza la programación y la gestión del resto de recursos, como los utillajes, los transportes de piezas, los equipos de medida y la mano de obra, para cumplir con la programación de los lotes en las máquinas.
- Fabricar piezas (A44). Función que se encarga de la transformación de las materias primas en productos acabados.
- Monitorización (A45). Función encargada de recoger los datos de fabricación, que muestran la evolución de la fabricación y el estado de los recursos productivos.

#### 3.3.2.3.1. Programar producción (A41).

Esta función transforma el plan de producción en órdenes de producción, asignando dichas órdenes a las máquinas, y fijando sus tiempos de inicio y finalización. Para ello, el programador debe conocer los planes de proceso de cada producto, los tiempos de transporte de piezas entre máquinas, los tiempos de preparación de las máquinas por cambios de lote, así como los tiempos relacionados con el resto de recursos. En el caso de las herramientas, debe estimar los tiempos de carga y descarga de las herramientas, los tiempos de cambio de filos, de reglajes, etc. Tras la estimación de todos los tiempos necesarios para procesar cada orden, el programador selecciona el procedimiento o algoritmo adecuado para la generación de la programación, de acuerdo a los objetivos que se pretendan alcanzar.

Una vez generada la programación, y antes de proceder a su lanzamiento, el gestor de herramientas (A42) debe evaluar si la programación es viable con respecto al recurso herramienta. Si existe escasez del recurso, o no es posible ajustarse a los tiempos previstos para las tareas relacionadas con las herramientas en las órdenes programadas, se solicitará una reprogramación. Del mismo modo que se evalúa la viabilidad de la programación con respecto al recurso herramienta, se debe hacer también con respecto al resto de recursos, como los utillajes.

Una vez lanzada la programación, el programador debe ser informado sobre posibles desviaciones, realizando reprogramaciones si fuese necesario. La información para realizar estas reprogramaciones proviene de la monitorización del sistema productivo, que recoge las desviaciones detectadas entre las fechas programadas y las fechas reales obtenidas. Además, el programador debe informar al planificador de la producción sobre las programaciones ejecutadas, detectando si existe escasez de algún recurso que de forma continuada genere problemas al programador, como pueden ser las herramientas. De esta forma, si las programaciones no se

cumplen de forma reiterada, se debería plantear la necesidad de adquirir nuevas herramientas para paliar la escasez del recurso.

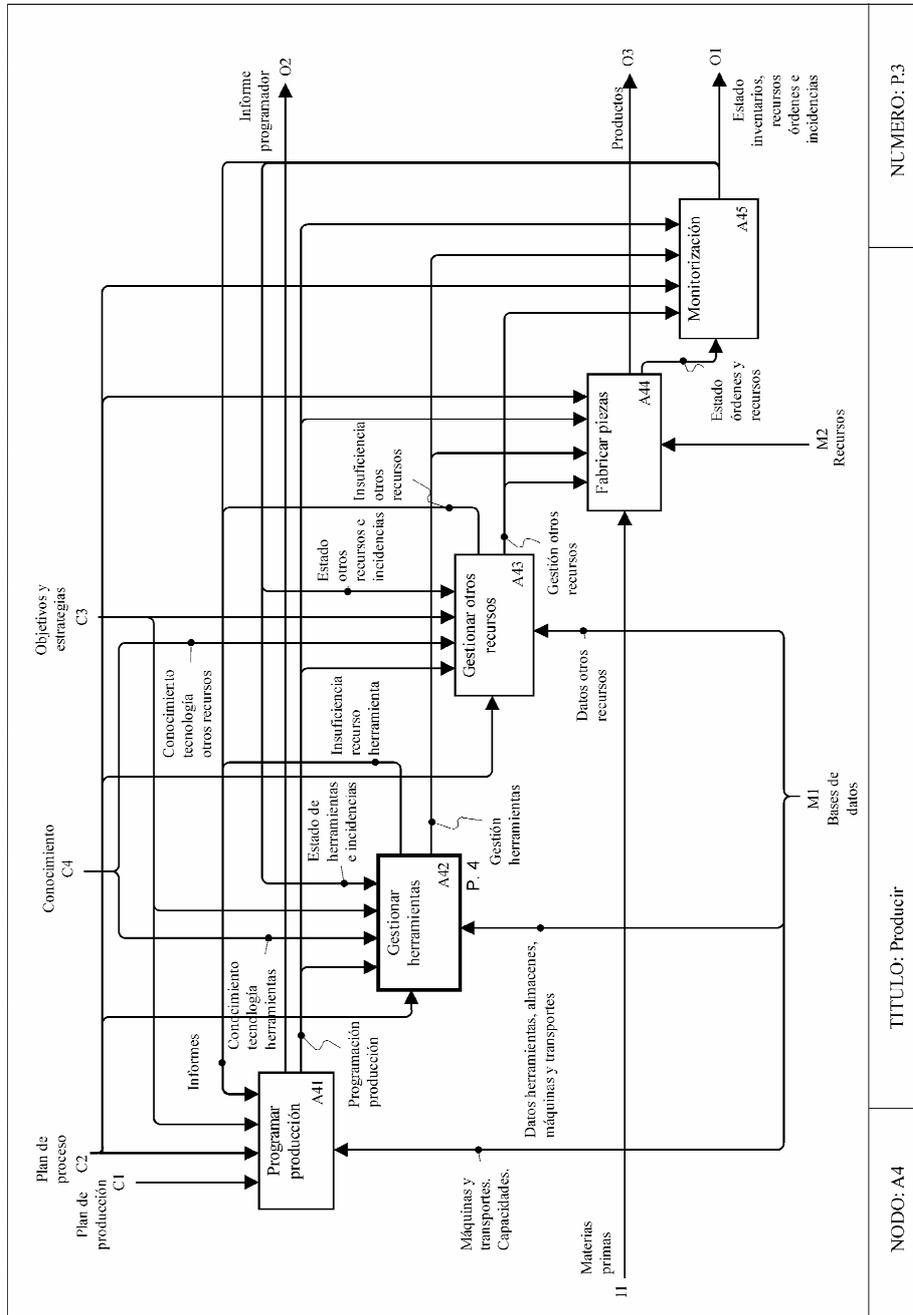


Fig 3-12. Modelo funcional propuesto para la función Producir (A4).

Datos de control:

- Plan de producción. Indica los productos a fabricar, su cantidad y plazo de fabricación.
- Plan de proceso. Contiene la secuencia de máquinas, utillajes, herramientas y demás recursos necesarios, las operaciones a realizar en cada producto y los tiempos de fabricación de cada una de ellas.
- Objetivos y estrategias. Indica las estrategias que se siguen al establecer la programación: cumplir con las fechas de entrega, minimizar el trabajo en curso, etc.
- Informes. Estos informes se generan previamente al lanzamiento de la programación y durante la ejecución de las órdenes. Los informes generados previamente provienen del gestor de herramientas o del resto de recursos, que muestran la imposibilidad de cumplir con la programación. Los informes generados durante la ejecución de las distintas órdenes notifican al programador en tiempo real el estado de la fabricación, para que éste conozca los retrasos y tome la decisión de reprogramar si fuese necesario.

Mecanismos:

- Máquinas y transportes. Capacidades. Datos sobre las máquinas y los transportes del sistema productivo y de sus capacidades (tiempos de preparación de las máquinas, tiempos y capacidades de los transportes de piezas).

Datos de salida:

- Programación producción. Describe la programación de la producción, es decir, la asignación de las órdenes de fabricación a cada máquina, junto con sus tiempos de inicio y finalización previstos.
- Informe programador. Informe donde se indican los problemas detectados reiteradamente para el cumplimiento de las programaciones, debido principalmente a la escasez de recursos, como pueden ser las herramientas.

#### 3.3.2.3.2. Gestionar herramientas (A42).

Esta función engloba la programación y la gestión de las herramientas de mecanizado en el sistema productivo. Su objetivo es coordinar su utilización, asegurando que las herramientas adecuadas se encuentren en los lugares e instantes requeridos para realizar las operaciones de mecanizado.

Debido a la metodología propuesta, que parte de la programación de los trabajos en las máquinas y de las alternativas de herramientas en las operaciones propuestas por la planificación de procesos, su principal tarea consiste en resolver las interferencias generadas por las herramientas, de

forma que cada operación disponga de un conjunto de alternativas de herramientas compatibles con la programación de los trabajos, lo que da lugar a una programación de herramientas. Una vez resueltas las interferencias entre herramientas, y basándose en las alternativas de herramientas compatibles en cada operación, esta función coordina los cambios de los filos de los elementos cortantes, completa los adaptadores para que las herramientas se puedan montar en las máquinas, y finalmente realiza una programación de los montajes y de los transportes de las herramientas. Además, y como punto importante de la propuesta, las alternativas de herramientas permiten que el gestor pueda reaccionar ante incidencias relacionadas con las herramientas en el sistema productivo.

Esta función realimenta al programador de la producción, mostrando la posible insuficiencia del recurso herramienta para cumplir con la programación de los trabajos. El incumplimiento de las programaciones tiene lugar cuando tras resolver las interferencias, alguna operación no dispone de ninguna herramienta por escasez del recurso. En relación a las herramientas, pueden existir pequeños retrasos, habituales en producción, debido a la preparación o a los transportes de las herramientas, pero que no tienen gran relevancia, y no suelen necesitar modificar las programaciones establecidas.

Datos de entrada:

- Plan de proceso. Especifica las alternativas de herramientas en cada operación, junto con sus condiciones de trabajo, así como los tiempos de ejecución de la operación y su coste.

Datos de control:

- Programación producción. Contiene la programación de las órdenes de fabricación.
- Objetivos y estrategias. Establece los objetivos y estrategias seguidas en la programación y gestión de las herramientas: minimizar los transportes de herramientas, lo que fomenta la estabilidad de las herramientas en las máquinas, minimizar el número de herramientas utilizadas, etc.
- Conocimiento tecnología herramientas. Hace referencia al tiempo de vida de la herramienta, a la realización de montajes, etc.
- Estado de herramientas e incidencias. Aporta el estado de las herramientas en el sistema productivo, e informa de las incidencias relacionadas con las herramientas, como pueden ser las roturas.

Mecanismos:

- Datos herramientas, almacenes, máquinas y transportes. Describe los datos de estos recursos necesarios para la programación y gestión de las herramientas.

Datos de salida:

- Gestión de herramientas. Especifica las herramientas asignadas a cada una de las operaciones de mecanizado, con sus instantes y tiempos de utilización, y una programación detallada sobre las actividades de preparación, cambios de filos, reglajes y transporte de las herramientas.
- Insuficiencia recurso herramienta. Informe describiendo la imposibilidad de cumplir con la programación de los trabajos por causa del recurso herramienta.

#### 3.3.2.3.3. Gestionar otros recursos (A43).

De forma paralela a la función Gestionar herramientas (A42) se ha propuesto esta función, que agrupa la programación y gestión del resto de recursos, distintos a las herramientas. Por tanto, esta función coordina la utilización del resto de recursos en el sistema productivo, asegurando que están disponibles cuando son requeridos. Entre estos recursos se incluyen los utillajes, los equipos de medida, los transportes de piezas y la mano de obra. En el caso de los utillajes, el plan de proceso proporciona la información de los elementos requeridos del inventario, que garantizan tanto la localización como el amarre de la pieza. Los transportes de piezas y la mano de obra se gestionan en base a los requerimientos de la programación de los lotes en las máquinas. Los equipos de medida tienen como misión comprobar el grado de cumplimiento de las piezas fabricadas con respecto a sus especificaciones.

Esta función, además, está encargada de informar al programador de la producción de posibles desviaciones y de reaccionar ante imprevistos relacionados con estos recursos durante la fabricación.

Datos de entrada:

- Plan de proceso. Describe los utillajes necesarios y los equipos de medida a utilizar en la verificación del producto.

Datos de control:

- Programación producción. Contiene la programación de las órdenes de fabricación.
- Objetivos y estrategias. Objetivos y estrategias adoptadas para estos recursos.
- Conocimiento tecnología otros recursos. Conocimiento relativo a la tecnología y gestión de estos otros recursos.
- Estado de otros recursos e incidencias. Aporta el estado de estos recursos en el sistema productivo y las incidencias relacionadas con ellos.

Mecanismos:

- Datos otros recursos. Describe los datos de estos recursos desde el punto de vista de su programación y gestión.

Datos de salida:

- Gestión otros recursos. Especifica los recursos necesarios, su programación y su gestión para la fabricación de los distintos productos.
- Insuficiencia otros recursos. Informe manifestando la imposibilidad de cumplir con la programación de la producción por causa de estos recursos.

#### 3.3.2.3.4. *Fabricar piezas (A44).*

Esta función es la responsable de la fabricación de los distintos productos, de acuerdo a la programación establecida. Para ello, se realizan distintas operaciones sobre un material de partida, que modifican su geometría, propiedades y apariencia, para conformar las piezas o productos, mediante una combinación de recursos, como son las máquinas, las herramientas, los utillajes y la mano de obra.

Durante el procesado de las piezas, se debe recoger información del estado del taller en tiempo real. Estos datos deben mostrar tanto el progreso de las órdenes a ejecutar como el estado de los recursos utilizados en la fabricación, y pueden ser recogidos de forma manual o automatizada. Esta información puede provenir de los controles de las máquinas, de los transportes, o introducida mediante terminales repartidos por la planta. Esta información es el dato fundamental de entrada para la próxima función: Monitorización (A45).

Datos de entrada:

- Materias primas. Muestra las materias primas que serán transformadas en productos.

Datos de control:

- Programación producción. Programación de las órdenes de fabricación.
- Gestión de herramientas. Especifica las herramientas a utilizar y su programación y gestión, garantizando que se encuentran disponibles cuando son requeridas.
- Gestión otros recursos. Especifica los utillajes, los equipos de medición, los transportes de piezas y la mano de obra necesaria y su programación y gestión, de forma que se encuentren disponibles cuando se requieran.
- Plan de proceso. Especifica los recursos y las operaciones requeridas para la fabricación de cada pieza.

Mecanismos:

- Recursos. Muestra los recursos necesarios para la fabricación de los distintos productos.

Datos de salida:

- Productos. Productos obtenidos tras las distintas etapas de fabricación.
- Estado órdenes y recursos. Datos sobre el progreso de las órdenes y el estado de los recursos de fabricación en tiempo real.

#### 3.3.2.3.5. Monitorización (A45).

Función que supervisa el estado de los recursos y el progreso de las órdenes, basándose en los datos obtenidos de la propia fabricación. Estos datos son analizados y comparados con los programados, permitiendo realimentar a las distintas funciones para que puedan tomar acciones correctivas. En concreto, estos datos se envían al programador indicando las desviaciones con respecto a la programación prevista, al gestor de herramientas y al resto de recursos, indicando el estado de los recursos y las incidencias ocurridas relacionadas con cada uno de ellos. En un nivel superior se envían al planificador de la producción, para que los utilice en la elaboración de los planes de producción y genere las órdenes de compra necesarias.

Datos de entrada:

- Estado órdenes y recursos. Muestra el progreso de las órdenes y el estado de los recursos.

Datos de control:

- Programación producción. Programación de las órdenes de fabricación.
- Plan de proceso. Especifica los recursos y las operaciones requeridas para la fabricación de cada pieza.
- Gestión de herramientas. Especifica tanto las herramientas a utilizar como su programación y gestión, para que se encuentren disponibles cuando se requieran.
- Gestión otros recursos. Especifica el resto de recursos a utilizar, y su programación y gestión, para que se encuentren disponibles cuando se requieran.

Datos de salida:

- Estado inventarios, recursos, órdenes e incidencias. Informe mandado a diferentes funciones, donde se refleja el estado de la fabricación, el estado de los recursos, los niveles de inventario y las incidencias ocurridas.

### **3.3.2.4. Gestionar herramientas (A42).**

El diagrama A42 representa el primer nivel de detalle de la programación y gestión de las herramientas, e incluye las cuatro funciones propuestas en la metodología (Fig 3-13). Además de estas cuatro funciones se ha añadido otra función, para especificar el horizonte temporal donde se llevará a cabo la programación y gestión de las herramientas. Estas funciones son:

- Determinar horizontes de trabajo (A421).
- Resolver interferencias (A422).
- Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423).
- Determinar adaptadores (A424).
- Programar montajes y transportes de herramientas (A425).

#### *3.3.2.4.1. Determinar horizontes de trabajo (A421).*

Esta función determina los periodos de tiempo para los que se realiza la previsión de herramientas, para cumplir con los requerimientos de la programación de la producción. Estos periodos de tiempo, que se denominarán horizontes de trabajo, son de duración variable. Tal y como se ha comentado, antes de que finalice un horizonte, se realiza la previsión de herramientas para el siguiente horizonte, y así sucesivamente. En esta previsión, se llevan a cabo las cuatro funciones que se han incluido en la metodología y que se exponen a continuación.

Siguiendo la jerarquía expuesta, la planificación de la producción se lleva a cabo en un periodo medio de tiempo (semanas o meses), mientras que la programación se suele realizar en periodos de tiempo más pequeños (días o semanas). Los mismos periodos de tiempo en los que se realiza la programación de la producción pueden utilizarse como horizontes de trabajo, o dividirse en periodos más pequeños, para facilitar la labor del gestor.

Cada horizonte de trabajo está compuesto por un número determinado de órdenes en cada máquina. Dado que hay que determinar un instante de finalización del horizonte, habrá máquinas en las que en ese instante se esté realizando una orden. Como es necesario enlazar los horizontes, hay que determinar qué sucede con las órdenes que se parten. Para establecer la programación y gestión de herramientas, cada orden se incluye en el horizonte en el que comienza su ejecución, aunque finalice en un horizonte posterior. En cuanto al tamaño del horizonte, evidentemente, los horizontes grandes flexibilizan la gestión de las herramientas, ya que permiten coordinar

su utilización a lo largo del tiempo. Dado que al menos se debe coordinar la utilización de las herramientas en una orden con la siguiente, el tamaño mínimo de órdenes que debe contener un horizonte en cada máquina debe ser de dos.

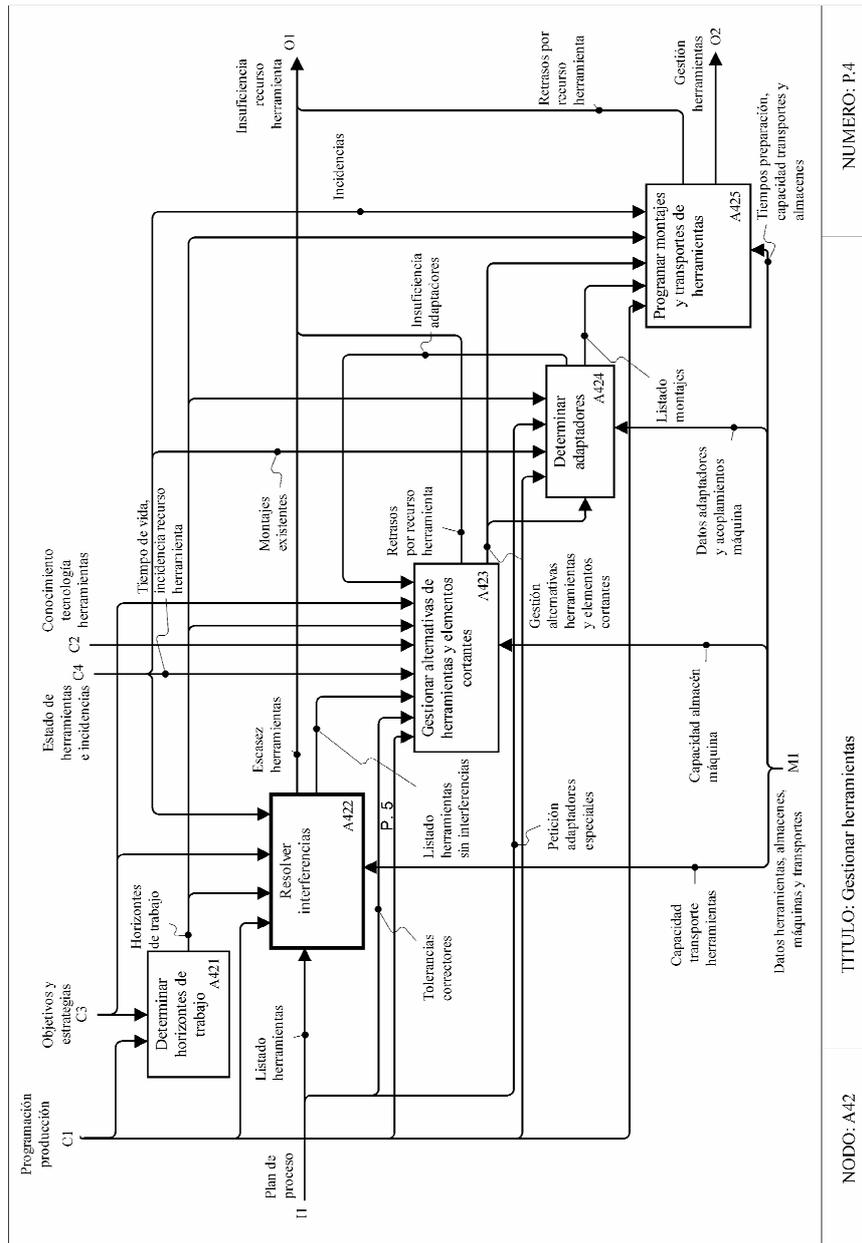


Fig 3-13. Modelo funcional propuesto para la gestión de herramientas (A42).

La utilización de horizontes de trabajo implica el enlace de los diferentes horizontes, al abordar el problema de la programación de herramientas y su gestión. Por ello, tanto al inicio de un horizonte, como al final del mismo, se deben tener en cuenta el horizonte anterior y posterior, respectivamente. Esto se explicará con más detalle en las funciones *Detectar y analizar interferencias (A4221)* y *Caracterizar posibles soluciones de la interferencia (A42233)*.

Datos de control:

- Programación producción. Especifica la programación de las órdenes de fabricación.
- Objetivos y estrategias. Los horizontes de trabajo se pueden seleccionar según distintas estrategias, por ejemplo, haciéndolos coincidir con uno o varios turnos de trabajo.

Datos de salida:

- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se realizará la previsión de programación y gestión de herramientas.

#### 3.3.2.4.2. Resolver interferencias (A422).

Esta función realiza la programación de las herramientas, asignándolas a los trabajos programados en las máquinas. Antes de la finalización del horizonte actual, resuelve las interferencias para el horizonte siguiente, y así sucesivamente. Esta función proporciona un conjunto de alternativas de herramientas en cada operación, compatibles con la programación. Si no es posible resolver las interferencias, por escasez del recurso herramienta, se informa al programador.

El problema de las interferencias es muy amplio y complejo, ya que se han considerado todas las alternativas de herramientas en cada operación, como alternativas iniciales. Para obtener una solución, se propone una resolución iterativa del problema, resolviendo cada interferencia individualmente.

Uno de los objetivos de la resolución de interferencias es minimizar los transportes de herramientas entre máquinas, de forma que se fomente la estabilidad de las herramientas en los almacenes de las máquinas, durante periodos de tiempo más o menos largos.

Aunque las interferencias se van a resolver individualmente, se establecen dos objetivos globales en la búsqueda de la solución a través de las sucesivas iteraciones. El primer objetivo consiste en asegurar que el problema finalmente tiene solución, es decir, que cada operación dispone de al menos

una alternativa de herramienta capaz de realizar el mecanizado. El segundo objetivo consiste en realizar un reparto uniforme de las herramientas, considerando las necesidades de cada operación, asignando más alternativas a las operaciones que tienen más necesidad de herramientas. Estas necesidades se valorarán en función de la frecuencia de cambios de los fillos consumidos.

Datos de entrada:

- Listado herramientas. Especifica las alternativas de herramientas en cada operación de mecanizado, junto con su tiempo de mecanizado, la frecuencia de cambio de los fillos y su coste.

Datos de control:

- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se resolverán las interferencias.
- Programación producción. Especifica la programación de las órdenes de fabricación.
- Objetivos y estrategias. Estrategias y objetivos seguidos para resolver las interferencias, como minimizar el número de transportes de herramientas, asignar más herramientas a las operaciones que tienen más necesidad de herramientas, etc.
- Estado de herramientas e incidencias. Información sobre el estado de las herramientas y las incidencias relacionadas con ellas en el sistema productivo.

Mecanismos:

- Capacidad transporte herramientas. Datos de los tiempos y capacidades de los transportes de herramientas entre las máquinas y los almacenes.

Datos de salida:

- Listado herramientas sin interferencias. Listado donde se muestran las alternativas de herramientas sin interferencias en cada operación, en el horizonte estudiado.
- Escasez herramientas. Informe mandado al programador de la producción donde se indican las operaciones que colisionan en la utilización de las mismas herramientas, mostrando el déficit de este recurso.

#### 3.3.2.4.3. *Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423).*

Esta función selecciona las alternativas de herramientas que se utilizarán en cada operación, de entre las alternativas que dispone la operación, una vez se han resuelto las interferencias. Además, esta función gestiona los paros tanto por cambios de los fillos de los elementos cortantes, como por reglajes. Para ello, esta función decide las estrategias de cambio de los fillos de las

distintas herramientas y su sincronización, con el objetivo de minimizar los paros de producción, especificando los instantes y tiempos de cambio. Al disponer de las alternativas de herramientas en las operaciones, esta función es la encargada de reaccionar ante las incidencias que pueden ocurrir durante el funcionamiento del sistema productivo, relacionadas con las herramientas.

En la exposición de la función se van a tratar dos puntos fundamentales: la determinación de las estrategias de cambio junto con la selección de las herramientas a utilizar en cada operación, y la actuación de la función frente a la falta de adaptadores y las incidencias ocurridas durante el funcionamiento del sistema productivo.

#### *Estrategias de cambio y selección de herramientas*

En primer lugar, esta función determina las estrategias de cambio en las operaciones que requieren herramientas que necesitan cambios de filo para el mecanizado del lote, y el número de alternativas de herramientas a utilizar en cada operación. Las estrategias de cambio que se consideran son las tres siguientes:

- Duplicar la herramienta en el almacén de la máquina. Tras la resolución de las interferencias cada operación dispone de un conjunto de alternativas de herramientas. Esta estrategia hace referencia a la carga de varias de estas alternativas, pertenecientes a una operación, en el almacén de la máquina.
- Sustituir la herramienta por otra con filos no desgastados. Esta estrategia se refiere a tener preparada una herramienta de entre las alternativas de la operación, que puede sustituir a una herramienta que esté cargada en el almacén de la máquina, capaz de realizar la operación. De esta forma, una vez la herramienta del almacén de la máquina tiene ya los filos desgastados, se puede proseguir con la fabricación del lote con esta nueva herramienta. Con esta estrategia, la herramienta no se encuentra en el almacén de la máquina, por lo que suelen requerir un operario para realizar la sustitución.
- Cambiar los filos de la herramienta. Esta estrategia hace referencia al cambio de los filos de la herramienta, una vez éstos están desgastados. Con esta estrategia, también es necesaria la intervención del operario para el cambio de filos.

El procedimiento propuesto para las estrategias de cambio reserva un alojamiento del almacén de la máquina para una herramienta de cada operación y, posteriormente se reservan más alojamientos para las herramientas de las operaciones que más lo necesiten, hasta agotar la

capacidad del almacén de la máquina. Las dos primeras estrategias (duplicación y sustitución) están basadas en la existencia de alternativas de herramientas en las operaciones. La estrategia de duplicación de la herramienta en el almacén de la máquina será la primera a aplicar, seguida de la estrategia de sustitución y, finalmente de la de cambios de filos. Con las dos primeras estrategias se consigue tener herramientas preparadas para sustituir a la herramienta con filos desgastados y, de esta forma disminuir los tiempos no productivos de la máquina.

Las operaciones que duplicarán sus herramientas en el almacén serán aquellas que tengan alternativas de herramientas, necesiten más de un filo para la ejecución del lote y tengan una frecuencia de cambios mayor. La estrategia de duplicación se aplicará hasta que el almacén de herramientas de la máquina esté lleno. Una vez que el almacén de herramientas de la máquina tiene todas sus posiciones reservadas, se aplica la estrategia de sustitución a las operaciones que aún dispongan de alternativas de herramientas.

En segundo lugar, una vez determinadas las estrategias de cambio, y conocido el número de alternativas a utilizar en cada operación, de entre las herramientas disponibles se seleccionarán las más adecuadas, teniendo un objetivo global de optimización en el conjunto del horizonte, como puede ser la minimización del número total de herramientas.

En tercer lugar, conocidas las herramientas a utilizar y sus estrategias de cambio, se determinarán los instantes de paro por cambios de filo y por reglajes. Evidentemente, estos paros dependen de las estrategias seleccionadas para cada una de las operaciones. Esos paros se tratarán de sincronizar, unificando las tareas de cambio de los filos en el horizonte de trabajo y, por consiguiente, disminuyendo el número de veces que los operarios son requeridos para estas tareas. Una vez determinados los instantes de paro, se estimarán los tiempos necesarios de paro por cargas, descargas, cambios de filo, etc.

Los instantes de parada por cambio de filos se especifican en función del número de piezas que puede realizar la herramienta antes de agotar su tiempo de vida. Por otro lado, los reglajes se suelen realizar antes de empezar la fabricación del lote, cada vez que se utiliza una nueva herramienta, y durante la fabricación del lote, para mantener la precisión dimensional en las piezas. La información necesaria para establecer los reglajes durante la fabricación proviene del planificador de procesos, que establece las tolerancias de los correctores necesarios en las herramientas para las distintas operaciones de acabado, en función de la precisión dimensional requerida. El ángulo de incidencia de la herramienta y el desgaste alcanzado en dicha cara influyen en la variación del corrector.

Finalmente, y con el objetivo de minimizar los paros de producción, esta función puede especificar la posición de las herramientas en los alojamientos del almacén de la máquina, de forma que se minimicen los tiempos de búsqueda y carga de la herramienta entre las operaciones de mecanizado.

*Reacción ante la escasez de adaptadores y las incidencias*

Además de realizar la gestión de las alternativas de herramientas y de los filos de los elementos cortantes, esta función es la encargada de resolver los problemas que se pueden generar en la función *Determinar adaptadores (A424)*, y de reaccionar ante las incidencias de las herramientas ocurridas durante el funcionamiento del sistema productivo.

El planificador de procesos únicamente ha seleccionado los elementos cortantes y el primer adaptador que sustenta a dichos elementos cortantes, siendo necesario completar los montajes. Por ello, hay que considerar si existen suficientes adaptadores para realizar todos los montajes de herramientas. Esta información viene dada a través de la función *Determinar adaptadores (A424)*, que indica las alternativas de herramientas que colisionan en la consecución de adaptadores. Si la escasez de adaptadores es generalizada, quiere decir que se han propuesto excesivas alternativas de herramientas en las operaciones, por lo que esta función (A423) reducirá el número de alternativas de herramientas a utilizar. Esta reducción podría provocar que no se cumplan las programaciones, informando de los retrasos al programador. Si la escasez de adaptadores es puntual, y no es posible reducir el número de alternativas de herramientas, se debe pedir una reprogramación de los trabajos.

En la discriminación de montajes, para decidir qué montajes se realizarán y cuáles se descartarán por escasez de adaptadores se seguirán los criterios ya descritos: se asegurará que cada operación dispone al menos de una herramienta y, posteriormente, se asignarán más herramientas a las operaciones que tengan más necesidad de herramientas, evaluando esta necesidad en función de la frecuencia de cambio de filos.

Dado que las incidencias o perturbaciones en el sistema productivo disminuyen el número de alternativas disponibles de herramientas, esta función actúa de la siguiente manera. Debido a la metodología propuesta, que trabaja con alternativas de herramientas, la existencia de alternativas de herramientas en las operaciones puede ser suficiente para contrarrestar la incidencia, no siendo necesaria ninguna actuación especial. Por tanto, esta función puede decidir utilizar otras alternativas de herramientas asignadas previamente a la operación, tras la resolución de interferencias. Esta solución implica rehacer la asignación de herramientas y la gestión de paros, debiendo

solicitar los adaptadores y transportes necesarios. Si la incidencia fuese grave, es decir, dejase a alguna operación sin herramienta, se debería informar al programador de los retrasos previstos hasta que la herramienta estuviera otra vez disponible.

Datos de control:

- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se gestionarán las alternativas de herramientas y los elementos cortantes.
- Listado herramientas sin interferencias. Herramientas disponibles en cada operación que no presentan interferencias en el horizonte a evaluar.
- Programación producción. Especifica la programación de las órdenes de fabricación, mostrando los tiempos previstos para las tareas relacionadas con las herramientas en el procesado de cada lote.
- Objetivos y estrategias. Determina los objetivos y estrategias a seguir en la gestión de las alternativas de herramientas y de los elementos cortantes, como minimizar el número de herramientas a utilizar en el horizonte o minimizar los paros de producción relacionados con el recurso herramienta.
- Tiempo de vida, incidencia recurso herramienta. Información que muestra en tiempo real el estado de las herramientas en el sistema productivo, como el tiempo de vida restante de los fillos o las incidencias ocurridas relacionadas con las herramientas, como pueden ser las roturas de herramientas.
- Tolerancias correctores. Información que proviene del plan de proceso, y que muestra, en cada operación, las tolerancias permitidas en los correctores de las herramientas, para garantizar la precisión dimensional.
- Conocimiento tecnología herramientas. Datos del tiempo de vida de la herramienta con unas condiciones de corte determinadas y para una determinada calidad y material de la pieza.
- Insuficiencia adaptadores. Muestra las herramientas que colisionan por la consecución de adaptadores para su montaje en la máquina.

Mecanismos:

- Capacidad almacén máquina. Datos relativos al almacén de herramientas de la máquina, como el número de alojamientos y las restricciones de peso y de tamaño del conjunto de las herramientas a montar en el almacén.

Datos de salida:

- Gestión alternativas herramientas y elementos cortantes. Salida principal de la función que muestra las herramientas a utilizar en cada operación, especificando los instantes y tiempos de parada por cambio de los fillos y por reglajes.

- Retrasos por recurso herramienta. Informa de los pequeños retrasos debidos a la gestión de las alternativas de herramientas y de sus elementos cortantes, con respecto a la estimación realizada por el programador.

#### 3.3.2.4.4. *Determinar adaptadores (A424).*

Esta función selecciona los adaptadores intermedios y/o finales necesarios para completar los montajes de las alternativas de herramientas en cada operación. En la mayoría de los casos, el criterio utilizado para la generación de los montajes es seleccionar el mínimo número de adaptadores y la mínima longitud del montaje. En determinadas operaciones, se requieren unas características especiales del montaje de la herramienta, como por ejemplo en los mecanizados profundos. En estos casos, la información sobre las dimensiones del montaje debe venir especificada en el plan de proceso.

Dado que el número de adaptadores es finito, esta función gestiona la utilización de los adaptadores en las distintas herramientas, valorando si existen suficientes adaptadores para completar todos los montajes de herramientas. Para cada elemento o adaptador se estudian sus requerimientos a lo largo del tiempo, en función de la demanda de las órdenes programadas, comparándolos con los elementos disponibles en el inventario.

A modo de ejemplo, la Fig 3-14 muestra la necesidad del cono ISO 40 en un pequeño horizonte. En la parte superior de la figura se muestran los requerimientos que tiene cada una de las órdenes de este tipo de adaptador. Por ejemplo, la orden O1 requiere de dos adaptadores. En la parte inferior de la figura se muestra en una gráfica el número de conos ISO disponibles (7 conos) y las necesidades a lo largo del tiempo de este adaptador. Estas necesidades se van modificando en el horizonte de trabajo, en función de las órdenes que se ejecutan en cada máquina.

En la asignación de los adaptadores a los diferentes montajes, se parte de los montajes ya existentes en el sistema productivo, disminuyendo, de esta forma, el tiempo destinado a la preparación de las herramientas. Posteriormente se procede a la generación de montajes que no se encuentren disponibles en el sistema productivo.

En caso de escasez de adaptadores, se informa a la función *Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423)* para que decida qué alternativas de herramientas se eliminarán.

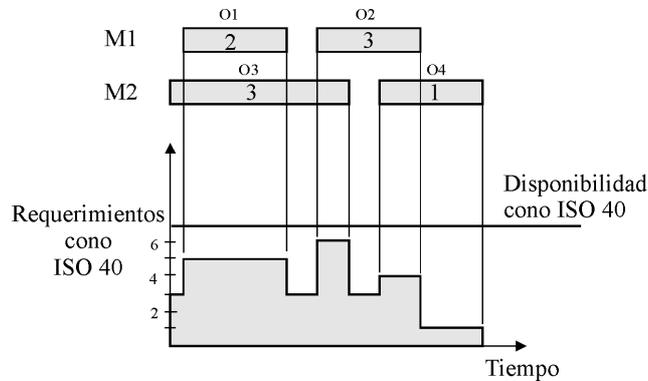


Fig 3-14. Demanda de adaptadores.

Datos de entrada:

- Gestión alternativas herramientas y elementos cortantes. Alternativas de herramientas en cada operación, que se deben completar con los correspondientes adaptadores intermedios y/o finales.

Datos de control:

- Programación producción. Especifica la programación de las órdenes de fabricación.
- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos para los que se van a determinar los adaptadores intermedios y/o finales.
- Petición adaptadores especiales. Información que proviene del plan de proceso donde se indica qué herramientas necesitan un montaje especial.
- Montajes existentes. Describe los montajes de herramientas totales o parciales existentes en el sistema productivo.

Mecanismos:

- Datos adaptadores y acoplamientos máquina. Muestra el inventario de cada uno de los adaptadores. Describe las características de estos adaptadores (tipos de acoplamiento, dimensiones, etc.), y de los acoplamientos de los alojamientos del almacén de herramientas de la máquina.

Datos de salida:

- Listado montajes. Salida principal de la función, donde se recogen todos los componentes (elementos cortantes y adaptadores) que forman parte de cada una de las herramientas a utilizar en el siguiente horizonte de trabajo, para el que se está realizando la previsión.

- Insuficiencia adaptadores. Muestra las herramientas que colisionan por la consecución de adaptadores para su montaje en los almacenes de las máquinas.

#### 3.3.2.4.5. Programar montajes y transportes de herramientas (A425).

Esta función establece la programación de las actividades de bajo nivel relacionadas con las herramientas en el taller, garantizando que se cumplen los instantes y tiempos de cambio especificados por la función *Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A423)*. Para ello, establece la programación de las tareas de montaje y desmontaje de las herramientas, de los reglajes y de los transportes. Esta programación se lleva a cabo considerando la disponibilidad de los adaptadores y repartiendo las tareas de montaje a lo largo del tiempo, garantizando que los montajes se encuentran preparados a tiempo para que puedan ser transportados a los lugares requeridos.

En producción suelen existir pequeños retrasos debidos a la preparación o al transporte de las herramientas hasta la máquina. Estos retrasos no presentan importancia a nivel de producción y no son tenidos en cuenta. Sin embargo, sí que es necesario tener en cuenta las incidencias relacionadas con las herramientas en el sistema productivo. Ante una incidencia que impide la utilización de una herramienta, la función *Gestionar alternativas de herramienta y elementos cortantes (A423)* puede decidir trabajar con otras alternativas de herramientas existentes en la operación. Esta decisión implica solicitar adaptadores para la generación del montaje y su posterior transporte, debiendo realizar una reprogramación de las tareas de programación y transporte de las herramientas. Si esta reprogramación implica un retraso importante sobre los tiempos previstos para la gestión del recurso herramienta, se debe informar al programador de la producción.

Datos de control:

- Listado montajes. Contiene todos los elementos (adaptadores y elementos cortantes) necesarios para realizar los montajes de herramientas.
- Gestión alternativas herramientas y elementos cortantes. Muestra los instantes y tiempos de utilización de cada montaje.
- Programación producción. Muestra la programación de las órdenes de fabricación.
- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se realizará la programación de las actividades de bajo nivel de las herramientas.

- Incidencias. Incidencias ocurridas que afectan a las actividades de montaje y transporte de las herramientas.

Mecanismos:

- Tiempos preparación, capacidad transportes y almacenes. Especifica los tiempos necesarios para la realización de las actividades de bajo nivel relacionadas con las herramientas, como montajes, desmontajes, etc. Además especifica los tiempos y capacidad de los transportes, así como la capacidad de los almacenes auxiliares de herramientas, si los hay.

Datos de salida:

- Gestión de herramientas. Salida principal del gestor de herramientas que especifica las herramientas asignadas a cada una de las operaciones de mecanizado, con sus instantes y tiempos de utilización, y una programación detallada sobre las actividades de preparación y transporte de las herramientas.
- Retrasos por recurso herramienta. Retrasos debidos a incidencias ocurridas durante el funcionamiento del sistema productivo, relacionadas con los montajes y los transportes de herramientas.

### **3.3.2.5. Resolver interferencias (A422).**

Esta función determina la programación de las herramientas. Para ello, resuelve cada una de las interferencias generadas por las herramientas en el horizonte de trabajo, obteniendo un conjunto de herramientas sin interferencias en cada operación. Como en este capítulo se expone el modelo funcional propuesto para el gestor, únicamente se van a describir las funciones que engloba de forma general. En el siguiente capítulo se expondrán con más detalle los algoritmos propuestos para la resolución de las interferencias de las herramientas.

La estrategia propuesta para resolver las interferencias consiste en solucionarlas una a una, siguiendo un proceso iterativo. En la resolución de cada interferencia, las alternativas de herramientas se eliminan de algunas operaciones. Por tanto, las alternativas de herramientas en las operaciones se modifica en cada iteración, y el problema se trasforma en uno nuevo, cada vez que se resuelve una interferencia. Este proceso iterativo finaliza cuando ya no existen interferencias en el horizonte de trabajo. En cada iteración se realizarán las funciones que se muestran en la Fig 3-15.

El problema de interferencias es complejo en la primera iteración, porque es necesario evaluar la posibilidad de interferencia de todas las herramientas. En el resto de iteraciones, el problema es más sencillo, ya que de iteración a iteración sólo se modifican algunas alternativas de herramientas en

determinadas operaciones, con lo que se parte de la información de la anterior iteración. Estas modificaciones se producen porque en la resolución de cada interferencia se elimina la herramienta que genera la interferencia como alternativa en algunas operaciones.

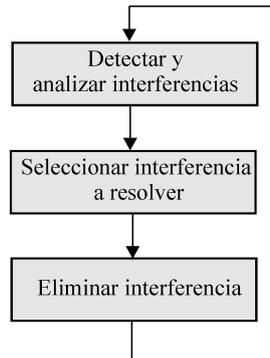


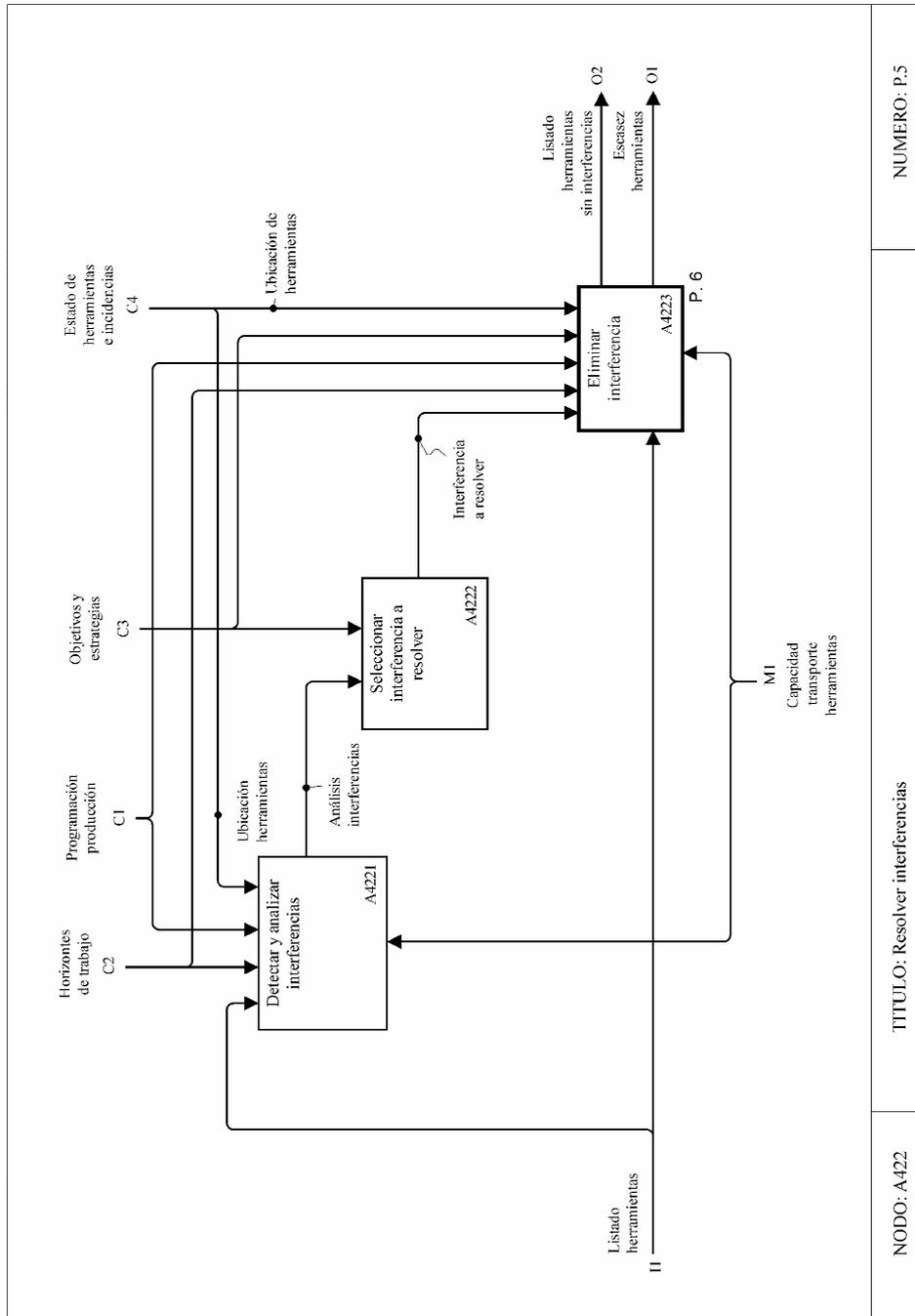
Fig 3-15. Funciones propuestas para la resolución de interferencias en cada iteración.

El modelo funcional propuesto para la función Resolver interferencias (A422) se subdivide en las tres subfunciones que se muestran en la Fig 3-16:

- Detectar y analizar interferencias (A4221). Esta función identifica y analiza cada una de las interferencias que existen en el horizonte de trabajo para el que se está realizando la resolución de interferencias.
- Seleccionar interferencia a resolver (A4222). Función que selecciona la interferencia que será resuelta en cada iteración, de entre todas las interferencias existentes en el horizonte de trabajo.
- Eliminar interferencia (A4223). Esta función elimina cada una de las interferencias en el horizonte de trabajo, modificando las alternativas de herramientas en las operaciones. Cada interferencia se elimina en una iteración.

#### 3.3.2.5.1. Detectar y analizar interferencias (A4221).

Esta función identifica y analiza las interferencias del horizonte de trabajo, basándose en las alternativas de herramientas disponibles en cada operación, en la programación de la producción y en el estado del sistema productivo. Esta detección y análisis se realiza en cada una de las iteraciones.



NUMERO: P.5

TITULO: Resolver interferencias

NODO: A422

Fig 3-16. Modelo funcional propuesto para la función Resolver interferencias (A422).

En primer lugar, esta función estudia para cada una de las herramientas, si tienen interferencia en el horizonte de trabajo. En caso afirmativo, identifica las órdenes y operaciones implicadas. En la identificación de cada interferencia, esta función utiliza la información que proviene de tanto de la programación de la producción, en concreto, los tiempos de inicio y finalización de cada orden, como de los tiempos de transporte de herramientas entre máquinas.

En el ejemplo propuesto en la Fig 3-17 se muestra la interferencia de la herramienta 1. En cada operación sólo se muestra la herramienta 1, pero no el resto de alternativas de herramientas en las operaciones.

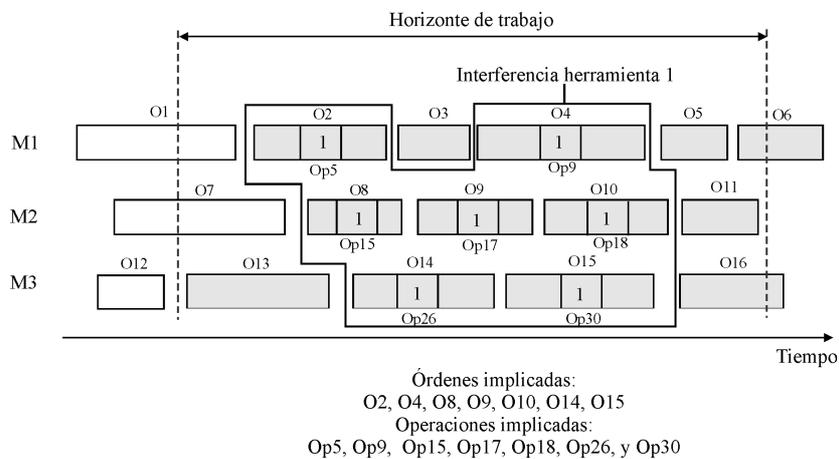


Fig 3-17. Identificación de interferencias.

Con respecto a la detección de las interferencias, hay que tener en cuenta que en el horizonte de trabajo, no todas las órdenes comienzan al mismo tiempo, pudiendo existir órdenes del horizonte anterior que solapan su ejecución con las órdenes del horizonte actual. En este caso, y como enlace entre los distintos horizontes, las herramientas que están siendo utilizadas en órdenes pertenecientes al horizonte anterior no podrán ser consideradas como alternativas hasta que finalice la ejecución de dichas órdenes. Por ello, se deben eliminar como alternativas en las operaciones afectadas, antes de comenzar la detección de las interferencias.

La Fig 3-18 muestra el enlace entre horizontes de trabajo. Como la Op1 está utilizando la herramienta 1, esta alternativa debe ser eliminada de las operaciones Op3 y Op5, pudiendo ser utilizada como alternativa en la Op7 y la Op8.

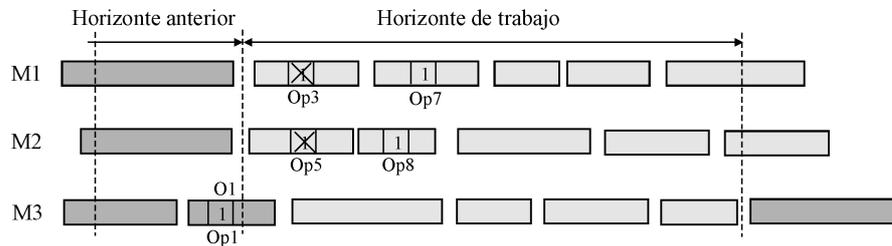


Fig 3-18. Enlace horizontes de trabajo.

En segundo lugar, cada interferencia se analiza para seleccionar la interferencia que se resolverá en cada iteración. Este análisis se realiza mediante unos índices que evalúan distintos aspectos de la misma, como son: el número de máquinas involucradas en la interferencia, el número medio y mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones, el número de veces que cada una de las máquinas solicita la herramienta, el coste unitario de la herramienta en la operación y el tiempo de mecanizado de cada operación en el lote. Estos índices se expondrán con más detalle en el capítulo cuatro.

Datos de control:

- Programación producción. Muestra la programación de las órdenes.
- Listado herramientas. Alternativas de herramientas en cada operación, especificando la frecuencia de cambio de los filos, el tiempo de mecanizado y su coste.
- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se detectan y analizan las interferencias.
- Ubicación de herramientas. Indica la disponibilidad y ubicación de las herramientas al inicio del horizonte que se va a evaluar.

Mecanismos:

- Capacidad transporte de herramientas. Datos relativos a los tiempos y capacidades de los transportes de las herramientas entre máquinas y entre máquinas y almacenes.

Datos de salida:

- Análisis interferencias. Proporciona el análisis de cada una de las interferencias existentes en el horizonte de trabajo que se está analizando.

### 3.3.2.5.2. Seleccionar interferencia a resolver (A4222).

Esta función selecciona la interferencia a resolver en cada iteración, basándose en el análisis de interferencias realizado por la función A4221.

Las interferencias se resuelven comenzando por las más críticas. De esta forma se intenta garantizar que el problema tendrá solución, siempre que exista recurso sobrado. Es decir, que todas las operaciones tendrán al menos una herramienta sin interferencia en el horizonte.

En primer lugar, hay que eliminar los casos críticos. Un caso crítico aparece cuando existen operaciones en la interferencia que tienen, como única alternativa, la propia herramienta que provoca la interferencia. Ante esta situación, el problema sólo tiene solución si se asigna la herramienta a esas operaciones, eliminándola como alternativa del resto de operaciones de la interferencia incompatibles con esta asignación. Estas situaciones se suelen presentar cuando ya se han realizado varias iteraciones y, por consiguiente, el número de alternativas de herramientas en las operaciones ha disminuido. Tras la resolución del caso crítico, la interferencia de la herramienta puede desaparecer, disminuir su importancia o dejar el problema de resolución de interferencias sin solución.

En la Fig 3-19 se muestra la resolución de un caso crítico. La herramienta 1 aparece como única alternativa en la operación Op3, por lo que se debe eliminar como alternativa en la Op12 para resolver el caso crítico. Tras la resolución del caso crítico, aunque aún existe interferencia de la herramienta 1 en el horizonte de trabajo, la interferencia afecta a menos operaciones que antes.

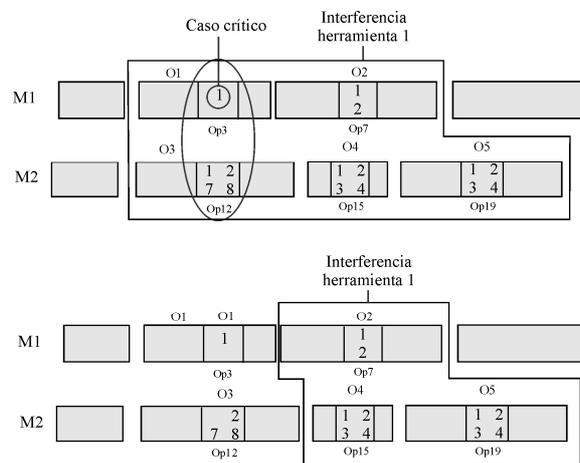


Fig 3-19. Ejemplo resolución caso crítico.

Si no existen casos críticos, o una vez ya se han resuelto éstos, se selecciona como interferencia a resolver aquella que presenta más problemas en el horizonte de trabajo. Cada interferencia ha sido analizada en función de distintos aspectos mediante índices por la anterior función (A4221). Sin embargo, para seleccionar la interferencia a resolver, es necesario comparar los valores de los índices en cada una de las interferencias, y ponderarlos en función de su relevancia. De esta forma se determina la importancia de cada interferencia con respecto a las demás interferencias en el horizonte de trabajo. Este análisis se muestra con más detalle en el capítulo cuatro.

Datos de control:

- Análisis interferencia. Análisis de todas las interferencias existentes el horizonte de trabajo.
- Objetivos y estrategias. Estrategias seguidas en la selección de la interferencia a resolver, como dar prioridad a las interferencias que presentan más problemas por escasez del recurso.

Datos de salida:

- Interferencia a resolver. Identifica la interferencia que será resuelta.

#### 3.3.2.5.3. *Eliminar interferencia (A4223).*

Esta función resuelve cada una de las de interferencias generadas en el horizonte de trabajo, indicando las operaciones donde permanece la herramienta.

Para realizar esto, en primer lugar, establece las posibles alternativas o soluciones de la interferencia. Estas soluciones representan las posibles opciones existentes para resolver la interferencia. En segundo lugar, caracteriza cada una de estas soluciones, evaluando tanto la necesidad que tienen sus operaciones de herramientas como los transportes necesarios en cada solución. En tercer lugar, y basándose en la caracterización de las soluciones, selecciona la solución utilizada para resolver la interferencia.

Si no es posible encontrar una solución a la interferencia porque alguna operación se queda sin herramienta, se informa al programador de la producción sobre la incapacidad de resolver el problema de interferencias, debido a la escasez del recurso.

Datos de entrada:

- Listado herramientas. Alternativas de herramientas en cada operación, especificando la frecuencia de cambio de los filos, el tiempo de mecanizado y su coste.

Datos de control:

- Programación producción. Contiene la programación de las órdenes.
- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se van a resolver las interferencias.
- Interferencia a resolver. Identifica la interferencia a resolver.
- Ubicación herramientas. Ubicación de las herramientas al inicio del horizonte a evaluar.
- Objetivos y estrategias. Objetivos seguidos en la eliminación de la interferencia, como son minimizar los transportes de herramientas y asignar más herramientas a las operaciones que tengan más necesidad de herramientas.

Mecanismos:

- Capacidad transporte de herramientas. Datos sobre los tiempos y la capacidad de los transportes de herramientas.

Datos de salida:

- Listado herramientas sin interferencias. Muestra el conjunto de herramientas sin interferencias en cada una de las operaciones, conforme se van resolviendo las interferencias en el horizonte de trabajo.
- Escasez herramientas. Informe que indica en qué operaciones no hay herramienta, debido a una escasez del recurso.

### **3.3.2.6. Eliminar interferencia (A4223).**

Esta función resuelve las interferencias generadas por las herramientas en el horizonte de trabajo. En cada iteración resuelve la interferencia que ha sido seleccionada por la función previa (A4222). Esta función se subdivide en las tres funciones que se muestran en la Fig 3-20:

- Determinar posibles soluciones de la interferencia (A42231). Esta función identifica las posibles opciones para resolver la interferencia.
- Caracterizar posibles soluciones de la interferencia (A42232). Esta función evalúa las posibles soluciones, basándose en las necesidades de herramientas que tienen las operaciones y en los transportes requeridos de herramientas.
- Seleccionar solución de la interferencia (A42233). Esta función elige la solución más adecuada, aunando los parámetros evaluados en la anterior función.

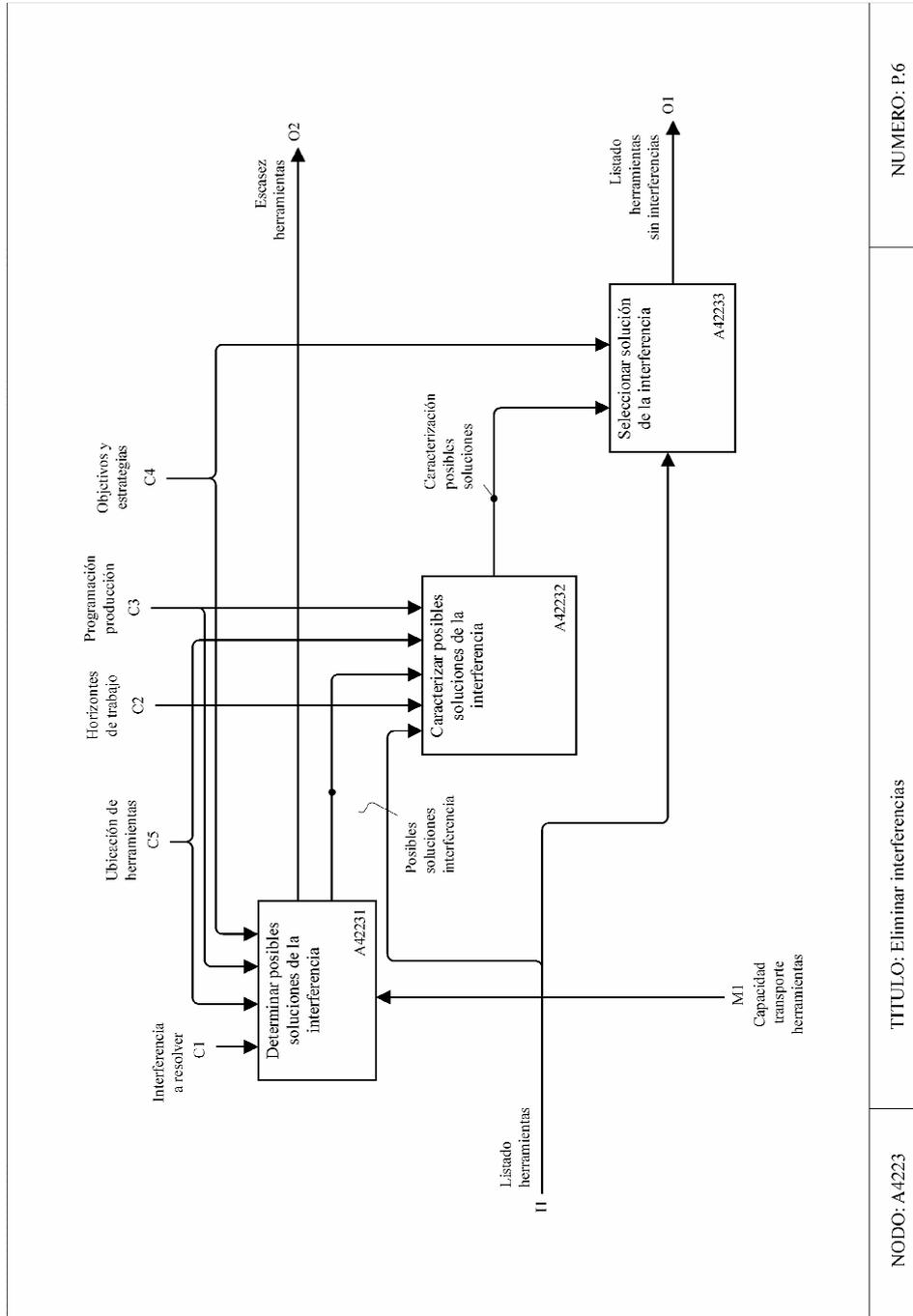


Fig 3-20. Modelo funcional propuesto para la función Eliminar interferencias (A4223).

### 3.3.2.6.1. Determinar posibles soluciones de la interferencia (A42231).

Esta función genera las posibles opciones o soluciones para resolver la interferencia. Cada solución está formada por un conjunto de operaciones en las que puede permanecer la herramienta sin causar interferencias. Las posibles opciones de resolución se generan mediante un algoritmo basado en combinatoria.

Las operaciones donde permanecerá la herramienta pueden pertenecer a distintas máquinas, requiriendo por lo tanto un determinado número de transportes de herramientas entre ellas. Dado que un objetivo importante en producción es tratar de minimizar los transportes de herramientas, fomentando la estabilidad de las herramientas en las máquinas, cada posible solución de la interferencia limitará el número de transportes de herramientas. Esto se explicará con más detalle en el capítulo cuatro.

En la figura Fig 3-21 se muestra la interferencia generada por la herramienta 3, y las tres posibles soluciones de dicha interferencia, obtenidas mediante combinatoria entre las operaciones que requieren la herramienta. De las tres posibilidades se muestra la resolución de la interferencia para una de ellas (Op1-Op10).

Como se ha comentado, los casos críticos se van a resolver previamente a las interferencias. En la generación de la solución para el caso crítico, puede ser que alguna operación se quede sin alternativa de herramienta, por lo que el problema de resolución de interferencias no tiene solución, debiendo informar de la escasez del recurso.

Datos de control:

- Interferencia a resolver. Aporta los datos de las órdenes y las operaciones implicadas en la interferencia a resolver.
- Ubicación de herramientas. Ubicación de las herramientas al inicio del horizonte para el que se van a resolver las interferencias.
- Programación de la producción. Muestra la programación de las órdenes de fabricación.
- Objetivos y estrategias. Determina los objetivos y estrategias a seguir para generar las posibles soluciones, como la especificación del máximo número de transportes de herramientas permitidos entre operaciones.

Mecanismos:

- Capacidad transporte herramientas. Especifica los tiempos y capacidades de los transportes de herramientas entre máquinas y entre almacenes y máquinas.

Datos de salida:

- Posibles soluciones interferencia. Conjuntos de operaciones donde puede permanecer la herramienta sin causar interferencias.
- Escasez herramientas. Informe indicando en qué operaciones no existe ninguna alternativa de herramienta, por escasez del recurso.

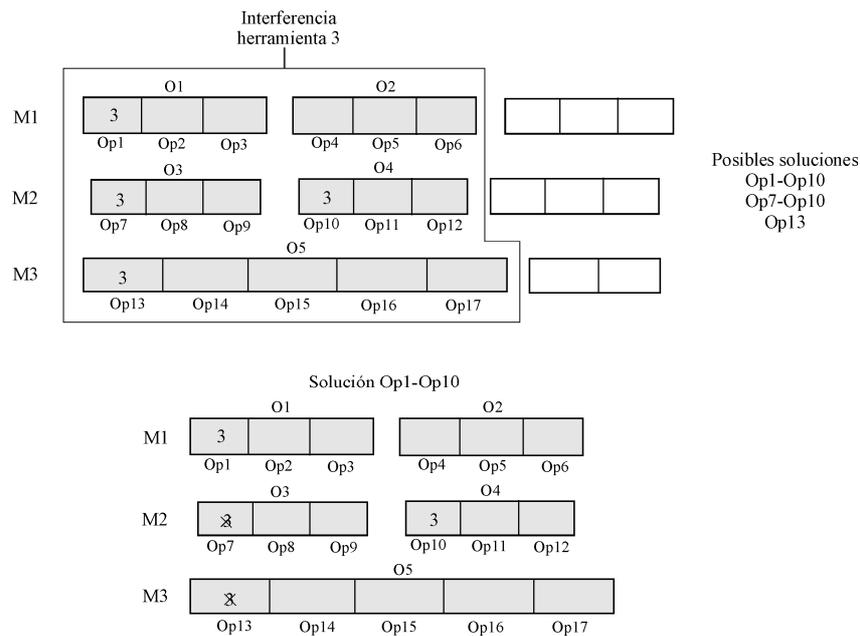


Fig 3-21. Posibles soluciones de la interferencia

3.3.2.6.2. Caracterizar posibles soluciones de la interferencia (A42232).

Función que caracteriza o evalúa cada una de las posibles soluciones de la interferencia, en base a los objetivos planteados para la resolución del problema.

La caracterización de cada solución se basa en el análisis de los datos de las órdenes y las operaciones de la solución. En concreto, se van a evaluar las alternativas de herramientas existentes en cada operación, la frecuencia de cambio de filos y los transportes de herramientas requeridos en cada posible solución. Tomando como base esta caracterización, se seleccionará posteriormente la solución más adecuada para eliminar la interferencia.

Uno de los objetivos en los que se basa la resolución de las interferencias es la asignación de las herramientas a las operaciones que tengan una mayor necesidad de herramientas. Por ello, en cada posible solución de la interferencia, se analizarán las alternativas de herramienta existentes en las operaciones, detectando qué operaciones no disponen de alternativas de herramientas sin interferencias en el horizonte, la frecuencia de cambio de los filos de la herramienta en la ejecución del lote y en qué casos la eliminación de la herramienta provoca una situación desfavorable. Un ejemplo de situación desfavorable aparece cuando se deja a una operación con una única alternativa de herramienta que presenta una interferencia no resuelta en el horizonte de trabajo, es decir, que se genera un caso crítico para la siguiente iteración. Por ello, se debe evitar seleccionar una solución de la interferencia que dé lugar a esta situación.

Desde el punto de vista de producción, es importante minimizar los transportes de herramientas, ya que éstos pueden provocar retrasos en la producción. Un número elevado de transportes implica más cargas y descargas de herramientas en las máquinas, nuevos reglajes, etc. Aunque las posibles soluciones de la interferencia ya se han generado considerando un número máximo de transportes entre sus operaciones, es posible que sean necesarios transportes adicionales por enlace entre los horizontes de trabajo, es decir, por la ubicación de la herramienta al inicio del horizonte que se está evaluando y al inicio del horizonte posterior, lo que aumentaría el número de transportes necesarios.

Datos de control:

- Posibles soluciones interferencia. Conjunto de soluciones que pueden resolver la interferencia.
- Listado herramientas. Alternativas de herramientas en cada operación, especificando la frecuencia de cambio de los filos, el tiempo de mecanizado y su coste.
- Programación de la producción. Contiene la programación de las órdenes de fabricación.
- Horizontes de trabajo. Cada uno de los periodos de tiempo para los que se va realizando la resolución de interferencias.
- Ubicación de herramientas. Indica la ubicación de las herramientas al inicio del horizonte de trabajo.

Datos de salida:

- Caracterización posibles soluciones. Evaluación de cada una de las posibles soluciones de la interferencia. Esta evaluación se basa en la necesidad de

herramientas de las operaciones y en el número de transportes de herramientas requeridos.

#### 3.3.2.6.3. *Seleccionar solución de la interferencia (A42233).*

Esta función selecciona, de entre las posibles soluciones de la interferencia, la solución que resolverá la interferencia. Esto implica que se toma la decisión de dejar la herramienta en unas operaciones y eliminarlas de otras para evitar la interferencia.

La selección de la solución de la interferencia se basa en la caracterización realizada por la anterior función (A42232). El criterio de selección de la solución aúna tanto los criterios de necesidad de herramientas en las operaciones como los transportes necesarios en cada solución.

Datos de entrada:

- Listado herramientas. Alternativas de herramientas en cada operación.

Datos de control:

- Caracterización posibles soluciones. Evaluación de las posibles soluciones de la interferencia.
- Objetivos y estrategias. Determinan la prioridad que se dará a los criterios de necesidad de herramientas y transportes en la selección de la solución.

Datos de salida:

- Listado herramientas sin interferencias. Muestra el conjunto de herramientas sin interferencias en cada una de las operaciones, conforme se van resolviendo las interferencias para un determinado horizonte de trabajo.

### **3.4. RESUMEN DE LA PROPUESTA PARA EL MODELO FUNCIONAL.**

El planteamiento y la propuesta funcional para el gestor de herramientas desarrollada en esta tesis se centra en el nivel más operativo de un sistema productivo, es decir, en la programación y la gestión de herramientas en el taller. En la propuesta funcional realizada para el gestor de herramientas de mecanizado, cabe destacar un alto grado de generalidad y flexibilidad, así como la integración con el resto de funciones de fabricación.

- En primer lugar, y como punto principal de la metodología propuesta para el gestor, cabe destacar la interacción entre la planificación de procesos, la programación de la producción y el gestor de herramientas. Esta interacción ha dado lugar a una propuesta de programación de las herramientas, basada en la

capacidad de la planificación de procesos asistida por ordenador de proporcionar alternativas de herramientas en las operaciones. Estas alternativas serán utilizadas para resolver las incompatibilidades entre las distintas operaciones por la programación de los trabajos, proporcionando un conjunto de herramientas en cada operación compatible con la programación de la producción.

- La metodología propuesta permite independizar la programación de los trabajos en las máquinas del recurso herramienta. Por ello, en un nivel superior se lleva a cabo la programación de la producción y seguidamente se asignan las herramientas a las operaciones, de forma que sean compatibles con la programación.
- La metodología propuesta permite independizar las funciones de la planificación de procesos y de la programación de la producción. Para ello, el planificador proporciona alternativas de herramientas con la tecnología más adecuada, realizando una selección entre las mejores herramientas que pueden realizar la operación, atendiendo a los criterios de productividad y economía, de forma que las alternativas propuestas tengan tiempos de mecanizado constantes para la ejecución de la operación. Por ello, las herramientas son intercambiables entre sí en una misma operación, proporcionando flexibilidad en el proceso de asignación de las herramientas concretas a las operaciones.
- La existencia de alternativas de herramientas en las operaciones mejora la gestión de las herramientas. Estas alternativas no sólo se utilizan para resolver las incompatibilidades entre operaciones por el recurso herramienta con la programación de la producción, sino que flexibilizan la propia gestión de herramientas. Por ello, el gestor de herramientas, utiliza las alternativas para gestionar los cambios de las herramientas por desgaste de sus filos. Además, las alternativas permiten al gestor una cierta independencia con respecto a las incidencias, proporcionando opciones que permiten continuar con el mecanizado, cuando alguna herramienta no está disponible.
- La propuesta realizada para el gestor de herramientas es general, pudiendo ser aplicada a entornos productivos estructurados de distintas formas. Esta propuesta no se limita únicamente al recurso herramienta, sino que puede extenderse al resto de recursos, como son los utillajes, la mano de obra, etc. La gestión de estos recursos, como en el caso de las herramientas, se encuentra supeditada a la asignación de los trabajos realizada previamente a las máquinas, por lo que la metodología propuesta es válida para dichos recursos.

- En la resolución de las interferencias, las alternativas de herramientas que provienen del planificador de procesos son tratadas de forma general e independiente de la tecnología del recurso. Esto permite independizar esta función con respecto a la descripción de las herramientas.
- La propuesta funcional establece una gran modularidad, realizando una descomposición de las distintas tareas del gestor de herramientas. Estas tareas se estructuran en diferentes niveles, planteando una jerarquía que va desde las tareas de planificación y programación hasta las que se ejecutan en tiempo real, permitiendo realimentaciones entre ellas.

---

## **CAPÍTULO 4. PROGRAMACIÓN DE HERRAMIENTAS.**

En este capítulo se expone con detalle la propuesta realizada para la programación de las herramientas, así como la verificación de la viabilidad de la propuesta planteada.

La programación de las herramientas desarrollada en la tesis tiene como objetivo asignar las alternativas de herramientas a los trabajos u órdenes de fabricación, previamente programados en las máquinas, en un determinado periodo de tiempo u horizonte de trabajo. Una vez resuelto este problema, se realizará la secuenciación y temporización de utilización de las alternativas de herramientas en cada una de las operaciones. Con esta información, y en una etapa posterior, se determinarán los tiempos de preparación y transporte de las herramientas para cumplir con la programación.

La programación de herramientas que se trata en este capítulo corresponde con la función Resolver Interferencias (A422) de la propuesta funcional realizada para el gestor de herramientas. Esta función es la más compleja e importante de la propuesta funcional, ya que proporciona la integración del gestor de herramientas con la planificación de procesos y la programación de los trabajos. Como se ha expuesto en el modelo funcional, partiendo de las alternativas de herramientas generadas por la planificación de procesos asistida por ordenador, esta función resuelve las interferencias de las

herramientas, de forma que cada operación disponga de un conjunto de herramientas compatibles con la programación de la producción.

El problema de la programación de las herramientas es complejo por dos motivos. En primer lugar, porque se consideran todas las alternativas de herramientas como alternativas iniciales en las operaciones, lo que da lugar a un elevado número de interferencias. En segundo lugar, porque las interferencias se solapan entre sí, es decir, en cada instante de tiempo pueden existir varias interferencias a la vez, y conforme el horizonte avanza, aparecen nuevas interferencias y desaparecen otras.

En la resolución del problema de programación, es decir, la asignación de las herramientas a las operaciones ya programadas en las máquinas, es necesario definir los requerimientos u objetivos en los que se basará dicha asignación. Uno de los objetivos que se pretende alcanzar consiste en minimizar los transportes de herramientas, fomentando la estabilidad de las herramientas en cada máquina a lo largo del tiempo, horizonte a horizonte. Con este objetivo en mente, se debe garantizar que el problema de programación tiene solución, asignando al menos una herramienta sin interferencias a cada operación. Una vez cada operación dispone de al menos una herramienta, se debe realizar un reparto uniforme de las herramientas entre las operaciones, asignando más herramientas a las operaciones que tienen más necesidad de herramientas. De esta forma se minimizan los tiempos improductivos, ya que se asignarán más herramientas a las operaciones que tienen una mayor frecuencia de cambio de los filos.

Para resolver el problema de programación de las herramientas planteado, existen métodos computacionales, como la enumeración, que obtiene todas las posibles soluciones, encontrando la solución óptima del problema. Sin embargo, este método requiere un gran tiempo computacional, no siendo operativo en producción. Por tanto, estos problemas suelen ser resueltos mediante heurísticos, que aunque no proporcionan una solución óptima, obtienen soluciones aceptables en una cantidad de tiempo razonable. Los heurísticos utilizan, básicamente, reglas de aplicación sencilla para la toma de decisiones. Sin embargo, la propuesta de la tesis va más allá, porque analiza globalmente el problema de programación de las herramientas.

#### **4.1. PROPUESTA PARA LA PROGRAMACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS.**

La propuesta realizada en la tesis para resolver el problema de programación de las herramientas, o la resolución de las interferencias, se basa en la aplicación de un algoritmo, que sigue un proceso iterativo,

resolviendo las interferencias una a una, pero con un punto de vista global (Ref 72). Tras la resolución de cada una de las interferencias, las alternativas de herramientas en las operaciones disminuyen y, por tanto, el problema de interferencias se transforma en uno nuevo en cada iteración, pero más sencillo, lo que hace que cada iteración tenga una resolución más rápida. Como cada interferencia es generada por una herramienta en el horizonte, el número de iteraciones necesarias para resolver el problema es igual o menor que el número de herramientas propuesto por el planificador de procesos en el horizonte de trabajo. Este proceso iterativo de resolución concluye cuando ya no existen interferencias, porque se han eliminado todas las interferencias existentes en anteriores iteraciones.

Aunque las interferencias se van a ir resolviendo de una en una, la resolución de cada interferencia está condicionada por los objetivos expuestos. En primer lugar se pretende garantizar que todas las operaciones tengan al menos una alternativa de herramienta sin interferencias en el horizonte, repartiendo el resto de herramientas en función de la necesidad de las operaciones. En segundo lugar, se pretende minimizar los transportes de herramientas, lo que fomenta la estabilidad de las herramientas en las máquinas.

La metodología propuesta para la programación de las herramientas o resolución de las interferencias se muestra en el diagrama de flujo de la Fig 4-1. Esta metodología está basada en el desarrollo de diferentes algoritmos, que desarrollan la función Resolver interferencias (A42) del anterior capítulo. El diagrama de flujo propuesto se aplica a determinados periodos de tiempo que incluyen a un conjunto de órdenes en cada máquina. Estos periodos de tiempo se han denominado horizontes de trabajo. A continuación se realizará una breve descripción de los distintos pasos a seguir, que serán explicados posteriormente con más detalle.

- *Información planificador de procesos y programación de la producción.* El punto de partida para la programación de las herramientas es la información que proviene del planificador de procesos y de la programación de la producción. El planificador de procesos selecciona para cada operación todas las posibles alternativas de herramientas (elementos cortantes y primer adaptador). Por otro lado, el programador de la producción especifica las órdenes a ejecutar en cada máquina, junto con sus tiempos de inicio y finalización.
- *Detectar interferencias.* La programación de los trabajos se ha realizado sin considerar el recurso herramienta. A partir de las alternativas de herramientas en cada operación, y de la programación

de la producción, se identifica la interferencia de cada herramienta en el horizonte de trabajo, es decir, la imposibilidad de que la misma herramienta pueda ser utilizada en los mismos instantes de tiempo por varias operaciones. Una vez detectadas las interferencias, la siguiente función las analizará. Dado que en cada iteración se resuelve una interferencia, llegará un momento en el que ya no existen más interferencias, porque ya se han resuelto todas en anteriores iteraciones, por lo que el problema de resolución de interferencias ha finalizado.

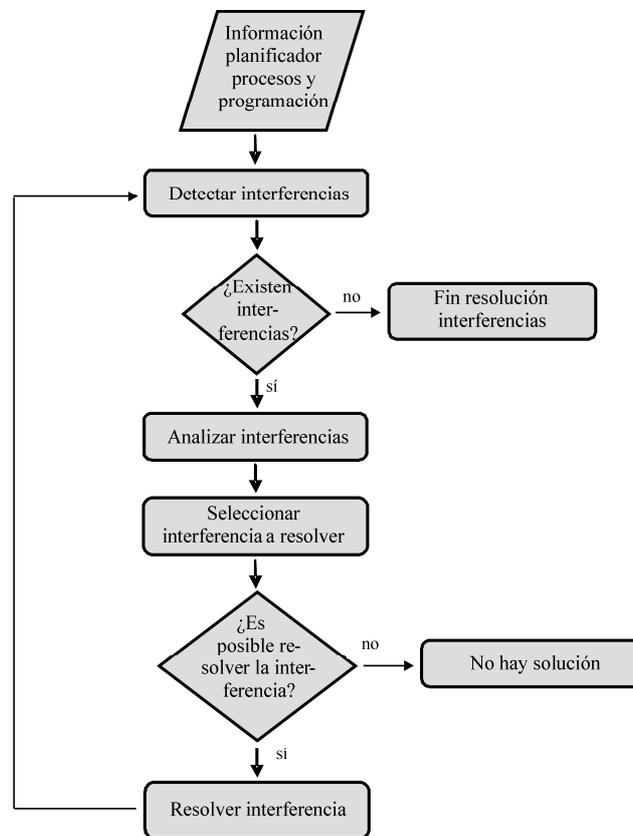


Fig 4-1. Metodología para la resolución de interferencias.

- *Analizar interferencias.* Esta función analiza todas las interferencias, con el objetivo de determinar la criticidad de cada una. En primer lugar, analiza individualmente cada interferencia, en base a unos determinados índices, como son el número de máquinas que requieren la herramienta, el número de alternativas de herramientas

en cada operación, etc. En segundo lugar, realiza una comparativa entre todas las interferencias, que permite ver la criticidad de cada interferencia con respecto a cada uno de los índices definidos.

- *Seleccionar interferencia a resolver.* Con la información que proviene del análisis de las interferencias realizado por la anterior función, se selecciona como interferencia a resolver la más crítica. Evidentemente, las situaciones más críticas son las que presentan en alguna operación de la interferencia, como única alternativa, la herramienta que provoca la interferencia, debiendo resolver en primer lugar esta situación. Si no hay situaciones con estas características, o tras resolver esta criticidad, la interferencia a resolver se selecciona aunando los índices definidos por la función anterior. De esta forma, es posible decidir qué interferencia es la más crítica en el horizonte de trabajo.
- *Resolver interferencia.* Esta función resuelve la interferencia, decidiendo en qué operaciones permanecerá la herramienta, y en qué operaciones se eliminará como alternativa. Una vez seleccionada la interferencia a resolver, se determinarán las posibles soluciones de la interferencia, es decir, el conjunto de operaciones en los que puede permanecer la herramienta sin generar interferencias. La generación de estas soluciones se realizará mediante un algoritmo, que genera todas las posibles soluciones, limitando el número de transportes de la herramienta entre máquinas. Posteriormente, cada una de estas posibles soluciones se evaluará para determinar cuál es la mejor solución. Para ello, se tienen como objetivos los siguientes: minimizar los transportes de herramientas, de forma que se fomente la estabilidad de las herramientas en las máquinas, garantizar que el problema de resolución de interferencias tiene solución, es decir, que cada operación disponga de al menos una herramienta y, posteriormente realizar un reparto de las herramientas entre las operaciones, en función de la necesidad de herramientas de las operaciones. Para cumplir con estos objetivos, se han definido diferentes índices, que se han evaluado junto con los transportes requeridos en cada posible solución.

#### **4.1.1. DETECCIÓN DE INTERFERENCIAS.**

Esta función detecta la interferencia de cada herramienta en el horizonte de trabajo. La detección de interferencias se lleva a cabo partiendo de la información de la programación de la producción y del planificador de procesos. Dependiendo de la programación establecida y de las alternativas de herramienta en las operaciones, en el horizonte de trabajo puede haber

herramientas que no tengan interferencias, y herramientas que sí presenten interferencias.

En la detección de las interferencias se tienen en cuenta los instantes de inicio y finalización de las órdenes en cada una de las máquinas, y el tiempo de transporte de las herramientas entre órdenes que se ejecuten en distintas máquinas.

La interferencia de una herramienta puede ser debida a colisiones entre operaciones que, o pertenecen a una misma orden de fabricación, o se sitúan en diferentes máquinas, y se disputan la herramienta en los mismos periodos de tiempo. Por otro lado, aunque las interferencias se detectan para un determinado horizonte, el enlace entre horizontes debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar esta detección, tal y como se expondrá posteriormente.

#### **4.1.1.1. Tipos de interferencias.**

En el capítulo tres, el concepto de interferencia se ha relacionado con la interferencia de la herramienta entre máquinas, para una mejor comprensión del concepto. Sin embargo, en este momento es necesario clasificar las posibles interferencias de las herramientas en dos tipos básicos: interferencia entre máquinas e interferencia dentro de una orden.

- Interferencia entre máquinas. Esta interferencia se produce cuando distintas máquinas requieren la misma herramienta para procesar órdenes que se solapan en el tiempo. Este tipo de interferencia también aparece cuando no existe tiempo suficiente para preparar y transportar las herramientas entre órdenes próximas en el tiempo, y que pertenecen a diferentes máquinas, por lo que la herramienta no podrá permanecer en las operaciones de ambas órdenes.
- Interferencia dentro de una orden. Esta interferencia se produce dentro de una misma orden de producción, cuando varias operaciones requieren el mismo primer adaptador o herramienta, pero diferentes elementos cortantes. Estas interferencias sólo aparecen en algunos casos, ya que dentro de una misma orden, evidentemente, el material a cortar es el mismo, por lo que la tecnología de corte o calidad empleada por los elementos de corte es igual para todos ellos. Entre estos casos especiales se puede encontrar el desbaste y el acabado de una operación de torneado, el roscado o el taladrado. En el caso del desbaste y el acabado, se puede utilizar el mismo portaplaquitas, pero con plaquitas de diferente geometría, para cada una de ellas. En el caso del roscado, se pueden encontrar distintos roscados sobre una misma pieza que

requieran diferentes plaquitas de roscar. En el caso del taladrado se puede utilizar un mismo portabrocas con distintas brocas en operaciones que pertenecen a la misma orden. En todos estos casos, sería necesario disponer de tantos primeros adaptadores o herramientas como elementos cortantes diferentes se requieran, con objeto de no intercambiar los elementos cortantes en la herramienta durante el mecanizado de cada una de las piezas que componen el lote.

Los dos tipos básicos de interferencias expuestos se muestran en la Fig 4-2, donde se denomina con un número a los primeros adaptadores o herramientas y con letras a los elementos cortantes requeridos en cada operación. En este ejemplo, el portabrocas 2 puede montar la broca ‘a’ de 10 mm en la Op2, o la broca ‘b’ de 12 mm en la Op3, lo que da lugar a una interferencia dentro de una orden.

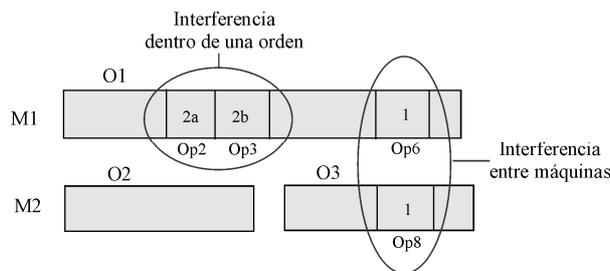


Fig 4-2. Interferencias básicas.

En la práctica, la interferencia que una herramienta presenta en el horizonte de trabajo es la combinación de varias interferencias básicas, que incluye tanto a interferencias entre máquinas, como a interferencias dentro de una orden. Aunque las interferencias dentro de una orden pueden no parecer tan críticas como las interferencias entre máquinas, y en caso de escasez de recurso se podría pensar en compartir la herramienta entre operaciones pertenecientes a la misma orden, esta solución no es viable en la práctica. Es decir, si sólo hay disponible un portabrocas y dos operaciones que lo requieren con brocas de diferentes diámetros, no se debería cambiar la broca para realizar el mecanizado de cada una de las operaciones. Tampoco es aconsejable mecanizar todas las operaciones en las piezas excepto una de las que requieren el portabrocas, y posteriormente montar en el portabrocas la otra broca y mecanizar otra vez todas las piezas. Ambas soluciones provocan pérdidas de tiempo muy importantes. Por ello, es necesario asignar diferentes portabrocas a cada una de las operaciones.

Como se ha comentado, la interferencia de una herramienta en el horizonte de trabajo es una combinación de las interferencias básicas expuestas. La interferencia representa la incompatibilidad por el uso simultáneo de la herramienta en las operaciones del horizonte de trabajo. En la detección de la interferencia de una herramienta en el horizonte de trabajo pueden aparecer incompatibilidades a lo largo del horizonte, así como operaciones en las que la herramienta no tenga incompatibilidades con otras operaciones. Es posible que las órdenes y operaciones implicadas en la interferencia se encuentren separadas en el tiempo, de forma que se pudiera pensar en separar dicha interferencia en interferencias más sencillas y resolverlas de forma independiente. Sin embargo, no se ha optado por esta última opción, ya que si se evalúa la utilización de la herramienta en todo el horizonte de trabajo, se dispone de una visión global a la hora de resolver la interferencia, y no de información parcial en periodos de tiempo más pequeños.

La Fig 4-3 muestra la interferencia de la herramienta 1 en el horizonte de trabajo. Aunque esta interferencia puede ser descompuesta en las dos interferencias más sencillas que se muestran, la propuesta de la tesis consiste en considerar una sola interferencia, para poder evaluar la utilización de la herramienta de forma global en todo el horizonte de trabajo.

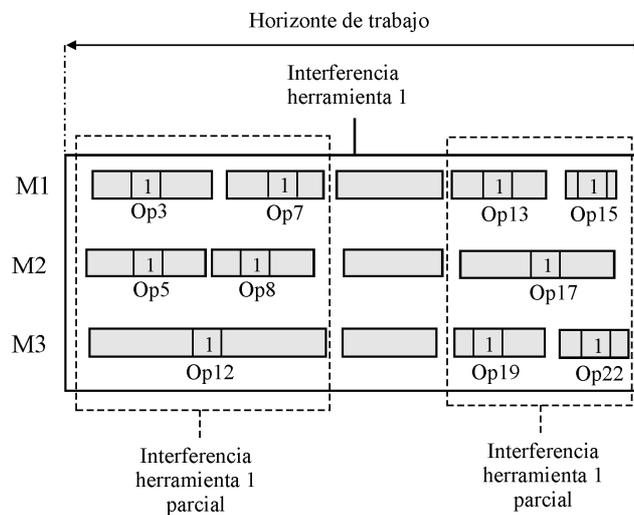
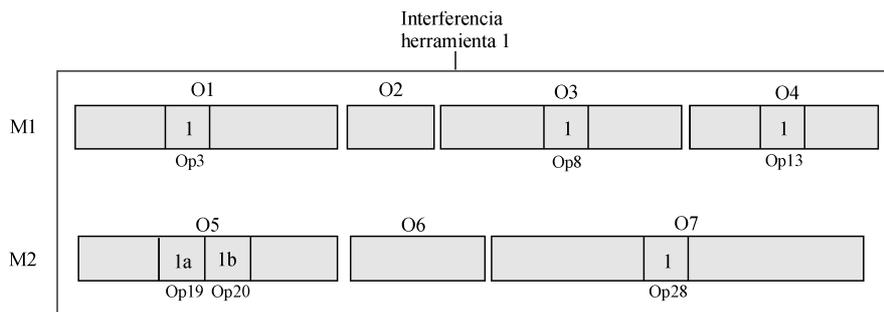


Fig 4-3. Interferencia en el horizonte.

La composición de la interferencia de cada herramienta, como una combinación de interferencias básicas se muestra en la Fig 4-4. Esta figura

muestra un ejemplo de la interferencia provocada por la herramienta 1 en el horizonte de trabajo. La herramienta se representa por un número y los elementos cortantes por letras. La interferencia está formada por la combinación de varias interferencias básicas entre máquinas y una interferencia dentro de una orden.



Interferencia	Herramienta	Órdenes implicadas	Operaciones implicadas
1	1	O1-O3-O4-O5-O7	Op3-Op8-Op13-Op19-Op20-Op28

Fig 4-4. Detección de interferencias.

#### 4.1.1.2. Criticidad de adaptadores.

La detección de las interferencias es el primer paso para eliminar las incompatibilidades de las alternativas de herramientas con la programación de la producción. Al eliminar las interferencias se realiza una asignación de las herramientas a las operaciones del horizonte de trabajo. En este momento, y antes de seguir con la exposición, es necesario realizar una puntualización. Como se ha comentado en el tercer capítulo, el planificador de procesos selecciona para cada operación los elementos cortantes y el primer adaptador que sustenta a estos elementos. En la propuesta realizada, sólo se resuelven las interferencias a este nivel, repartiendo en un paso posterior el resto de adaptadores para completar el montaje, de forma que la herramienta se pueda montar en la máquina.

Esta suposición es correcta en la mayoría de los casos, porque existe recurso sobrado de adaptadores. Sin embargo, existen adaptadores críticos o muy utilizados, que pueden aparecer en los montajes de herramientas tanto como primer adaptador como adaptador intermedio. Para estos adaptadores

es necesario resolver sus interferencias en el horizonte de forma global, aparezcan como primeros adaptadores o adaptadores intermedios.

Esta situación aparece, por ejemplo, en los adaptadores portapinzas y en los adaptadores de brocas. Estos adaptadores pueden sustentar tanto herramientas enterizas como de plaquitas. Por ejemplo, en fresado, los portapinzas pueden actuar como primer adaptador o adaptador intermedio. Si el planificador ha seleccionado fresas enterizas, los adaptadores portapinzas son el primer adaptador que sustenta al elemento cortante. Si el planificador selecciona para el mecanizado fresas de plaquitas de diámetro reducido, la fresa es ya el primer adaptador, siendo el portapinzas el adaptador intermedio. En ambos casos, es necesario resolver de forma conjunta la posible interferencia generada en el horizonte para los portapinzas.

La resolución de interferencias tiene como objetivo asignar las herramientas (primeros adaptadores) propuestas por el planificador a las operaciones del horizonte. Sin embargo, en el caso de los adaptadores críticos, no es adecuado realizar su asignación únicamente considerando las operaciones que los requieren como primer adaptador. Si esto se realiza así, estos adaptadores pueden no estar disponibles en las operaciones que los requieran como adaptadores intermedios para realizar el montaje. Para tener en cuenta este problema, en estos casos se considerará una operación ficticia en la orden, para representar la asignación de estos adaptadores críticos a los montajes de herramientas que los requieran como adaptadores intermedios. De esta forma, se puede resolver su interferencia en el horizonte de forma global. Estos adaptadores serán tratados de la misma forma que el primer adaptador que soporta los elementos cortantes a la hora de evaluar su importancia en el horizonte, para decidir qué interferencia se resuelve.

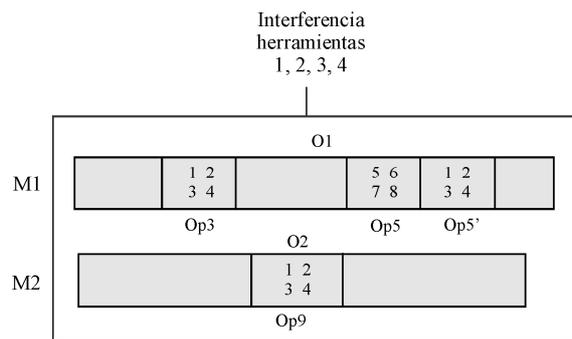


Fig 4-5. Interferencias de adaptadores con elevada criticidad.

La Fig 4-5 muestra un ejemplo de lo expuesto. El planificador de procesos ha seleccionado para la Op3 y la Op9 fresas enterizas con adaptadores portapinzas (1, 2, 3 y 4). En la Op5 ha seleccionado fresas de plaquita (5, 6, 7 y 8). Dado que las herramientas de plaquitas requerirán para su montaje en la máquina un portapinzas, se generará una operación ficticia Op5' donde se añadirán los portapinzas necesarios para dicho montaje. En este caso, a nivel de portapinzas, la interferencia está formada por interferencias entre máquinas e interferencias dentro de una orden.

#### 4.1.1.3. Enlace entre horizontes.

En la detección de las interferencias es necesario enlazar el horizonte en el que se están detectando las interferencias, con el horizonte anterior. Esto es debido a que las últimas órdenes del horizonte anterior no terminan en los mismos instantes de tiempo. Por ello, es posible que mientras en una máquina comience una orden del horizonte a evaluar, en otra máquina esté finalizando una orden del horizonte anterior.

El enlace entre horizontes hace que determinadas herramientas no puedan ser consideradas como alternativas en algunas operaciones. Las herramientas que están siendo utilizadas en operaciones del horizonte anterior, no pueden ser consideradas como alternativas en las operaciones del horizonte actual, hasta que finalice la ejecución de dichas operaciones. Por ello, en la detección de interferencias no serán tenidas en cuenta como alternativas.

La Fig 4-6 muestra el horizonte de trabajo para el que se van a detectar las interferencias. En la operación 1 (Op1) de la orden 1 (O1) perteneciente al horizonte anterior se está utilizando la herramienta 1. Por tanto, la herramienta 1 no puede ser considerada como alternativa en las operaciones Op3 y Op5, aunque sí puede ser considerada como alternativa en las operaciones Op7 y Op8.

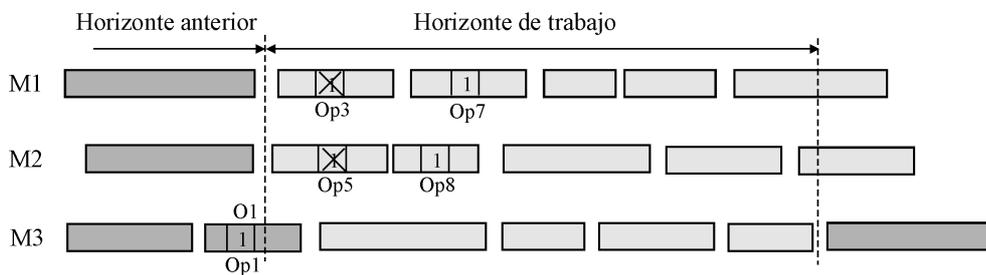


Fig 4-6. Enlace entre horizontes de trabajo.

#### **4.1.2. ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS.**

Una vez se han detectado las interferencias, es necesario analizar cada una de ellas, para resolver la interferencia que se considere más crítica. Con este propósito, el análisis de interferencias que se propone, tiene como objetivo obtener información de las interferencias, para evaluar su criticidad.

La obtención de la interferencia más crítica se realizará analizando las interferencias, de forma que se puedan comparar entre sí. En la propuesta realizada para la función, este análisis se llevará a cabo en dos pasos. En primer lugar, se analizará cada una de las interferencias individualmente, identificando y evaluando sus características más relevantes, mediante la definición de determinados índices. En segundo lugar, y una vez evaluada cada interferencia de forma individual, se compararán los valores obtenidos de los índices para cada interferencia con los del conjunto de las interferencias, para identificar, en un paso posterior, la interferencia más crítica.

En la exposición de esta función, se realizará un análisis de los factores más influyentes, de entre los que se extraerán los índices que se proponen tanto para el análisis individual como para la comparación entre las interferencias. Al final del punto se mostrará un ejemplo de utilización de estos índices.

##### **4.1.2.1. Análisis individual de las interferencias.**

Las interferencias detectadas en el horizonte de trabajo presentan diferentes características, que necesitan ser evaluadas para poder determinar la criticidad de cada interferencia. Por ejemplo, existen interferencias con distinto número de máquinas implicadas, con diferente número de alternativas de herramientas en las operaciones, distintos costes y tiempos asociados, etc. Por ello, se van a definir un conjunto de índices que se evaluarán en cada una de las interferencias, y que servirán para caracterizar la criticidad de las interferencias de manera individual.

En el análisis del problema de interferencias en el horizonte de trabajo, es importante identificar los aspectos que caracterizan la criticidad de la interferencia, y que serán de utilidad a la hora de definir los índices con los que se analizarán las interferencias.

En una interferencia, el número de máquinas que solicita la herramienta en los mismos instantes de tiempo muestra la competencia de las máquinas por la utilización de la herramienta. Por ello, una interferencia será más

crítica cuantas más máquinas solicitan la herramienta en los mismos instantes de tiempo.

Otro factor importante a considerar es el número medio de alternativas de herramientas que tiene el conjunto de operaciones de la interferencia, porque permite evaluar el volumen de herramientas disponibles para ir resolviendo las interferencias en las sucesivas iteraciones. Sin embargo, no sólo se debe cuantificar el valor medio, sino se debe evaluar también el número mínimo de alternativas en las operaciones. Si este número es pequeño, conforme se van resolviendo las interferencias, podría suceder que alguna operación se quedase sin alternativas de herramientas, y el problema de resolución de interferencias no tendría solución.

Dado que un objetivo importante en producción es minimizar los transportes de herramientas, se debe potenciar la utilización de las herramientas en la misma máquina, evitando, de esta forma, los transportes de las herramientas entre diferentes máquinas. Para ello se debe evaluar la posibilidad de dejar la herramienta en las operaciones de una misma máquina, cuantificando el número de operaciones consecutivas que se pueden realizar en una misma máquina.

El tiempo empleado en cada operación para el mecanizado del lote y el coste unitario de la herramienta son otros factores a considerar. El tiempo de mecanizado consumido por la operación en el lote permite identificar las operaciones que requerirán más cambios de filos para realizar el mecanizado del lote, por lo que pueden presentar más problemas en el horizonte de trabajo. Por ello, se debe evaluar el tiempo medio y máximo de mecanizado en las operaciones de la interferencia. En relación al coste, es el coste por unidad de tiempo de cada herramienta el que permitirá comparar el coste de las distintas herramientas alternativas. De esta forma, se puede dar prioridad a las herramientas que tengan menor coste unitario. Las herramientas son usadas en distintas operaciones, por lo que no habrá un solo coste atribuible a cada herramienta. Para considerar esto será necesario tener en cuenta el coste medio y su variabilidad. En concreto la variabilidad inferior (coste mínimo) es más importante por economía.

En el caso de las interferencias dentro de una orden, sólo se podían resolver de manera operativa, asignando herramientas distintas a cada operación implicada. El número máximo de operaciones en una interferencia de este tipo, para cada una de las herramientas, será un buen indicador de este aspecto. La Fig 4-7 muestra la interferencia de la herramienta 2, que presenta una interferencia dentro de una orden que implica a tres operaciones, cada una de las cuales requiere diferentes elementos cortantes. En este caso, el número máximo de operaciones que requieren la herramienta es tres.

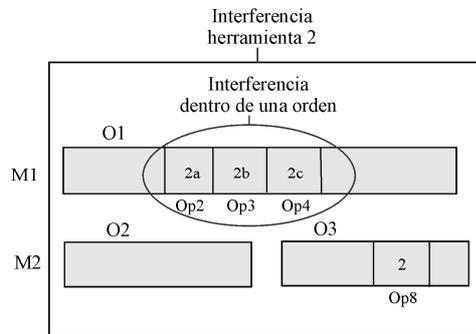


Fig 4-7. Interferencia dentro de una orden.

En algunos casos, la interferencia de la herramienta en el horizonte puede ser descompuesta en interferencias más sencillas (Fig 4-3), aunque no se ha adoptado esta opción, sino la de resolver conjuntamente la interferencia en el horizonte. Sin embargo, para cuantificar la importancia de estas interferencias parciales, se va a considerar el valor medio y máximo de órdenes que requirerem la herramienta en cada una de estas interferencias parciales.

Para cada herramienta se considerará una interferencia, que engloba a todas las órdenes que pujan por ella. El número de órdenes implicadas en la interferencia es un buen indicador de la importancia de la interferencia. La Fig 4-8 muestra la interferencia de la herramienta 3, que implica a cinco órdenes.

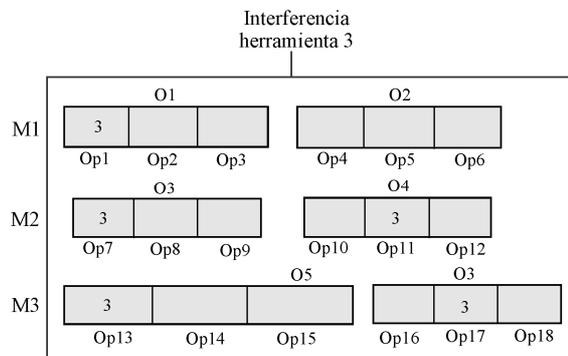


Fig 4-8. Número de órdenes implicadas en la interferencia.

En el análisis efectuado se ha pretendido mostrar los aspectos más relevantes relacionados con la criticidad de las interferencias. Las particularidades de cada sistema productivo pueden convertir a algunos de ellos en mas críticos respecto al resto, o incluso hacer necesarios nuevos

factores. En el trabajo realizado sólo se han tenido en cuenta algunos de ellos, que son los que se muestran en la Tabla 4-1.

Índices utilizados para evaluar cada interferencia
Máquinas que requieren la herramienta (MRH)
Número medio de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMAH)
Número mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMIAH)
Máximo número de peticiones de la herramienta por una máquina (MPHM)
Coste unitario de la herramienta (CU)
Tiempo de mecanizado de la operación para el lote (TM)

Tabla 4-1. Índices utilizados para evaluar las interferencias.

- *Máquinas que requieren la herramienta (MRH)*. Muestra el número de máquinas que solicitan la herramienta en un mismo instante de tiempo. Mediante este índice se evalúa la competencia de las máquinas por la consecución de la herramienta.
- *Número medio de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMAH)*. Este índice muestra el valor medio de las alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia. Este índice evalúa el volumen medio de alternativas de herramientas disponibles.
- *Número mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia. (NMIAH)*. Muestra el número mínimo de alternativas de herramientas, en las operaciones de la interferencia. Este índice evalúa la existencia de operaciones con pocas alternativas de herramientas. Cuando este índice toma como valor la unidad, muestra que existe alguna operación en la interferencia cuya única alternativa de herramienta es la propia herramienta que provoca la interferencia.
- *Máximo número de peticiones de la herramienta por una máquina (MPHM)*. Cada máquina involucrada en la interferencia requiere la herramienta un número determinado de veces en las operaciones que pertenecen a la interferencia. Este índice cuantifica el uso de una herramienta en una misma máquina en el horizonte. Para ello, se evalúa este índice en cada máquina y se toma el valor máximo de ellas para cuantificar a la interferencia. Mediante este índice se indica la posibilidad de asignar la herramienta a las operaciones

ejecutadas en una misma máquina, minimizando así el número de transportes.

- *Coste unitario de la herramienta (CU)*. Este índice evalúa el coste por unidad de tiempo de la herramienta en las operaciones de la interferencia. Este índice permite comparar el coste unitario de herramientas similares que aparecen en las mismas operaciones de la interferencia. De entre los valores obtenidos para las diferentes operaciones de la interferencia, este índice toma el valor mínimo, para que a igualdad del resto de índices se permita seleccionar para resolver la interferencia, la herramienta con menor coste por unidad de tiempo.
- *Tiempo de mecanizado de la operación para el lote (TM)*. Este índice evalúa para cada una de las operaciones de la interferencia el tiempo empleado en el mecanizado del lote. Evidentemente este valor es el mismo para todas las herramientas pertenecientes a una misma operación, ya que las alternativas de herramientas de una misma operación tienen tiempos de mecanizado constantes. Por ello, este índice nos permitirá comparar el tiempo de mecanizado entre distintas operaciones. Una vez evaluado este índice para cada operación, se toma como valor para la interferencia el mayor, de forma que se dé prioridad a las herramientas que son alternativas en operaciones con tiempos de mecanizado grandes para el lote.

#### **4.1.2.2. Comparación entre interferencias.**

Una vez conocidos los datos de cada interferencia y, con objeto de evaluar el conjunto de las interferencias, se utilizarán unos índices que permitan comparar las interferencias. Estos índices son los mismos que se han definido para el análisis individual, pero vistos para el conjunto.

Los índices que se han propuesto para caracterizar los diferentes aspectos de la interferencia tienen en cuenta diferente información (número de máquinas, número medio y mínimo de alternativas en las operaciones, etc.). Por ello, es difícil comparar la información que proviene de diferentes índices. Por ejemplo, no se pueden comparar directamente el índice que muestra el dato del número de máquinas que requieren la herramienta, y el índice que muestra el número medio de alternativas en las operaciones de la interferencia.

Si en una interferencia el índice '*Máquinas que requieren la herramienta (MRH)*' toma el valor tres, en esta interferencia existen tres máquinas que requieren la herramienta en el mismo instante de tiempo. Si en el horizonte existen interferencias donde este índice toma un valor superior, la primera

interferencia (MRH=3) no es tan crítica como estas otras. Dado que el objetivo del análisis es decidir la interferencia más crítica, en cada interferencia se comparará el valor de cada uno de sus índices con los valores más críticos de los índices obtenidos para el conjunto de las interferencias.

Además, para poder comparar los distintos índices entre sí, es necesario escalar o normalizar los valores de los índices antes definidos. La normalización consiste en que los valores que puede tomar cada uno de estos índices esté comprendido en el intervalo [0-1]. Esta normalización se consigue relacionando cada uno de los índices de la interferencia con los valores máximos o mínimos de dichos índices en el conjunto de las interferencias del horizonte de trabajo. En función del aspecto de la interferencia que representa cada índice, se toma el máximo o el mínimo valor del índice en el conjunto de las interferencias para normalizar. Por ejemplo, el índice ‘*Máquinas que requieren la herramienta*’ muestra una interferencia más crítica cuanto mayor sea su valor, por lo que se tomará su valor máximo. Por el contrario, el índice ‘*Número mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia*’ muestra una interferencia más crítica cuanto menor es su valor, por lo que se tomará el valor mínimo.

Para comparar los índices de cada interferencia con los del resto de interferencias y también poder comparar los diferentes índices entre sí, se definen unos índices normalizados, que se denominarán  $I_{\text{paralelo}}$ ,  $I_{\text{medio}}$ ,  $I_{\text{mínimo}}$ ,  $I_{\text{serie}}$ ,  $I_{\text{coste}}$  e  $I_{\text{tiempo}}$ . De esta forma cuando un índice toma como valor la unidad, significa que la interferencia es la más crítica o importante del horizonte con respecto a la valoración de dicho índice.

La Tabla 4-2 muestra la relación entre los índices definidos para cada una de las interferencias de forma individual, y los definidos para el análisis del conjunto de las interferencias.

Índices análisis individual interferencias	Comparación entre interferencias
MRH	$I_{\text{paralelo}}$
NMAH	$I_{\text{medio}}$
NMIAH	$I_{\text{mínimo}}$
NPHM	$I_{\text{serie}}$
CU	$I_{\text{coste}}$
TM	$I_{\text{tiempo}}$

Tabla 4-2. Relación entre los índices utilizados en el análisis individual y en la comparación entre interferencias.

- Índice paralelo ( $I_{\text{paralelo}}$ ): Normaliza el índice *Máquinas que requieren la herramienta (MRH)*, comparando el índice MRH en la interferencia con el valor máximo de este índice en el conjunto de interferencias del horizonte. Por ejemplo, si en la interferencia requieren la herramienta dos máquinas en el mismo instante de tiempo, y en el conjunto de las interferencias el máximo valor de las máquinas que requieren la herramienta es cuatro, el índice normalizado  $I_{\text{paralelo}}$  toma el valor 0,5.

$$I_{\text{paralelo}} = \frac{\text{MRH}_{\text{interferencia}}}{\text{MRH}_{\text{maximo\_interferencias}}}$$

- Índice medio ( $I_{\text{medio}}$ ): Normaliza el índice *Número medio de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMAH)*. En este caso se compara el valor mínimo del índice NMAH en el conjunto de interferencias del horizonte con el valor de este índice en la interferencia.

$$I_{\text{medio}} = \frac{\text{NMAH}_{\text{mínimo\_interferencias}}}{\text{NMAH}_{\text{interferencia}}}$$

- Índice mínimo ( $I_{\text{mínimo}}$ ): Normaliza el índice *Número mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMIAH)*. Para ello divide el valor mínimo del índice NMIAH en el conjunto de interferencias del horizonte con el valor de este índice en la interferencia.

$$I_{\text{mínimo}} = \frac{\text{NMIAH}_{\text{mínimo\_interferencias}}}{\text{NMIAH}_{\text{interferencia}}}$$

- Índice serie ( $I_{\text{serie}}$ ): Normaliza el índice *Máximo número de peticiones de la herramienta por una máquina (MPHM)*. Para ello compara este índice en la interferencia con el valor máximo de este índice en el conjunto de interferencias del horizonte.

$$I_{\text{serie}} = \frac{\text{NPHM}_{\text{interferencia}}}{\text{NPHM}_{\text{máximo\_interferencias}}}$$

- Índice coste unitario ( $I_{\text{coste}}$ ): Normaliza el índice *Coste unitario (CU)*, comparando el valor mínimo del índice CU del conjunto de las interferencias con el valor de este índice en la interferencia.

$$I_{\text{coste}} = \frac{\text{CU}_{\text{mínimo\_interferencias}}}{\text{CU}_{\text{interferencia}}}$$

- Índice tiempo mecanizado ( $I_{\text{tiempo}}$ ): Normaliza el índice *Tiempo de mecanizado de la operación para todo el lote (TM)*, comparando el

índice TM de la interferencia con el valor máximo de este índice en el conjunto de interferencias del horizonte.

$$I_{\text{tiempo}} = \frac{TM_{\text{interferencia}}}{TM_{\text{máximo\_interferencias}}}$$

#### 4.1.2.3. Ejemplo de cálculo de índices.

El cálculo de los índices propuestos para caracterizar las interferencias existentes en el horizonte de trabajo, se va a presentar mediante un ejemplo sencillo. La Fig 4-9 representa la programación de los trabajos en un horizonte de trabajo pequeño, donde sólo existen interferencias entre máquinas. En cada operación se indican las alternativas de herramientas mediante números. Para no complicar la figura, sólo se han mostrado algunas de las interferencias de las herramientas (herramientas 1, 10 y 12). La información del conjunto de interferencias existentes en el horizonte de trabajo se muestra en la Tabla 4-3, donde se indican las órdenes y las operaciones implicadas en cada una. En el ejemplo propuesto existen 17 herramientas, de las cuales todas presentan interferencias, excepto las herramientas 5 y 13.

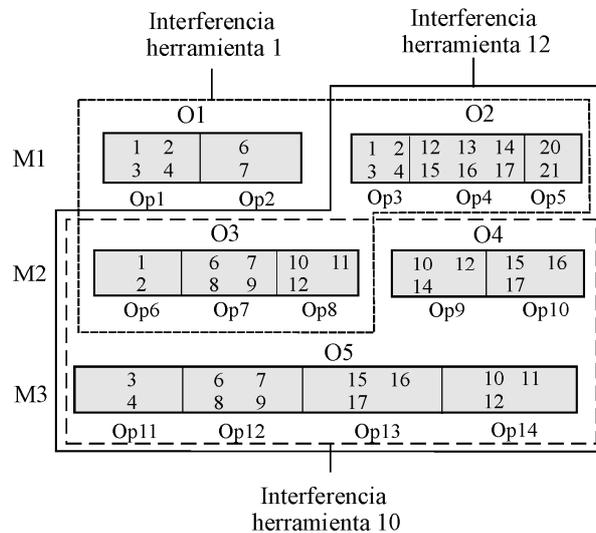


Fig 4-9. Ejemplo para el cálculo de índices.

Herramientas con interferencia	Órdenes implicadas	Operaciones implicadas
1	O1-O2-O3	Op1-Op3-Op6
2	O1-O2-O3	Op1-Op3-Op6
3	O1-O2-O5	Op1-Op3-Op11
4	O1-O2-O5	Op1-Op3-Op11
6	O1-O3-O5	Op2-Op7-Op12
7	O1-O3-O5	Op2-Op7-Op12
8	O3-O5	Op7-Op12
9	O3-O5	Op7-Op12
10	O3-O4-O5	Op8-Op9-Op14
11	O3-O5	Op8-Op14
12	O2-O3-O4-O5	Op4-Op8-Op9-Op14
14	O2-O4	Op4-Op9
15	O2-O4-O5	Op4-Op10-Op13
16	O2-O4-O5	Op4-Op10-Op13
17	O2-O4-O5	Op4-Op10-Op13

Tabla 4-3. Listado de interferencias.

En la Fig 4-9 y en la Tabla 4-3 no se han mostrado los costes unitarios de las herramientas en las diferentes operaciones de mecanizado. En cada operación se ha determinado el coste de la herramienta por unidad de tiempo. Por ejemplo, la herramienta 1 es una fresa que monta cuatro plaquitas cuadradas no reversibles. En la operación 1, las plaquitas que se requieren tienen un coste de 17 euros cada una. Cada uno de sus filos puede cortar 30 minutos, a las condiciones de corte establecidas por el planificador de procesos. El coste por unidad de tiempo de la herramienta para la operación 1 es de 0.56 euros/minuto.

La Tabla 4-4 muestra para la orden O1 el tamaño del lote y el tiempo necesario para el mecanizado de cada una de las operaciones en una pieza. Para cada una de las alternativas de herramientas en las operaciones muestra el coste unitario y el tiempo de mecanizado para el total del lote. Dado que las alternativas de herramientas tienen el mismo tiempo de mecanizado en la operación, los tiempos de mecanizado de la operación para el lote son los mismos en las alternativas pertenecientes a una misma operación. Esto mismo se ha realizado para el cálculo del coste unitario y del tiempo de

mecanizado de las alternativas de herramientas del resto de operaciones del horizonte.

Orden	Operación	Herramienta	Coste unitario (euros)	Tiempo mecanizado operación para el lote (min)
O1 Tamaño lote: 20	Op 1: Tiempo mecanizado: 1.15 min	1	0.56	23
		2	0.65	23
		3	0.6	23
		4	0.6	23
	Op 2: Tiempo mecanizado: 5 min	6	0.85	100
		7	0.78	100

Tabla 4-4. Coste unitario y tiempo de mecanizado de la operación para el lote.

La evaluación de los índices definidos para cada una de las interferencias se muestra en la Tabla 4-5. Dado el ejemplo tan sencillo que se ha propuesto, donde sólo hay tres máquinas, el índice *Máquinas que requieren la herramienta* (MRH) de cada interferencia sólo toma valores 2 y 3, que indica que en cada interferencia sólo hay implicadas 2 ó 3 máquinas.

Herramienta	MRH	NMAH	NMIAH	MPHM	CU	TM
1	2	3.33	2	2	0.37	33.75
2	2	3.33	2	2	0.4	33.75
3	2	3.33	2	2	0.38	60
4	2	3.33	2	2	0.38	60
6	3	3.33	2	1	0.85	105
7	3	3.33	2	1	0.78	105
8	2	4	4	1	0.95	105
9	2	4	4	1	1.1	105
10	2	3	3	2	0.9	90
11	2	3	3	1	0.8	90
12	3	3.75	3	2	0.7	90
14	2	4.5	3	1	0.75	22.5
15	3	4	3	1	0.9	180
16	3	4	3	1	0.9	180
17	3	4	3	1	0.9	180

Tabla 4-5. Evaluación de índices en las interferencias.

Una vez evaluados los índices de cada interferencia individualmente, se procede al cálculo de los índices normalizados  $I_{\text{paralelo}}$ ,  $I_{\text{medio}}$ ,  $I_{\text{mínimo}}$ ,  $I_{\text{serie}}$ ,  $I_{\text{coste}}$  e  $I_{\text{tiempo}}$ , obteniéndose los valores de la Tabla 4-6.

Herramienta	$I_{\text{paralelo}}$	$I_{\text{medio}}$	$I_{\text{mínimo}}$	$I_{\text{serie}}$	$I_{\text{coste}}$	$I_{\text{tiempo}}$
1	0.66	0.9	1	1	1	0.18
2	0.66	0.9	1	1	0.93	0.18
3	0.66	0.9	1	1	0.97	0.33
4	0.66	0.9	1	1	0.97	0.33
6	1	0.9	1	0.5	0.44	0.58
7	1	0.9	1	0.5	0.47	0.58
8	0.66	0.75	0.5	0.5	0.39	0.58
9	0.66	0.75	0.5	0.5	0.34	0.58
10	0.66	1	0.66	1	0.41	0.5
11	0.66	1	0.66	0.5	0.46	0.5
12	1	0.8	0.66	1	0.53	0.5
14	0.66	0.66	0.66	0.5	0.49	0.12
15	1	0.75	0.66	0.5	0.41	1
16	1	0.75	0.66	0.5	0.41	1
17	1	0.75	0.66	0.5	0.41	1

Tabla 4-6. Análisis del conjunto de las interferencias.

### 4.1.3. SELECCIÓN DE LA INTERFERENCIA A RESOLVER.

Esta función selecciona la interferencia a resolver en cada iteración. Esta interferencia será la que presente una mayor criticidad en el horizonte. Las interferencias se resolverán por orden de criticidad, es decir, primero las que presentan más problemas en el horizonte de trabajo, para garantizar la solución del problema.

La forma de seleccionar la interferencia más crítica se muestra en el diagrama de flujo de la Fig 4-10. Esta selección se basa en el análisis de las interferencias realizado previamente. En la propuesta se distingue entre dos casos: las herramientas que presentan interferencias con operaciones cuya única alternativa de herramienta es la herramienta que causa la interferencia (NMIAH=1) y el resto.

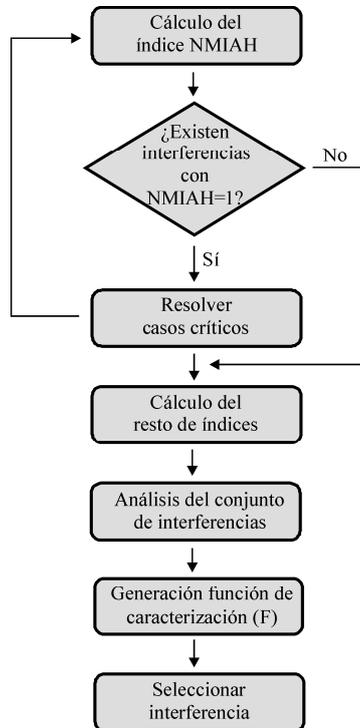


Fig 4-10. Selección de la interferencia a resolver.

En el análisis propuesto para las interferencias, se ha definido un índice que cuantifica el número mínimo de alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia (NMIAH). Si este índice toma como valor la unidad en alguna de las interferencias, significa que la herramienta está sin otras alternativas de herramientas en alguna operación de la interferencia. Estas situaciones se suelen presentar cuando existe escasez del recurso herramienta, o cuando tras sucesivas iteraciones, las alternativas de herramientas en las operaciones han ido disminuyendo. A estas situaciones se las denomina casos críticos, siendo su única posibilidad de solución asignar la herramienta a esa operación y eliminarla de las operaciones incompatibles con dicha asignación. Por ello, estas situaciones son las más críticas, ya que si la herramienta se queda en otra operación, el problema de resolución de interferencias no tiene solución. De esta forma, antes de proceder a la selección de la interferencia a resolver, se eliminarán los casos críticos.

Si existen varias interferencias con el índice NMIAH igual a la unidad, se procede a la resolución de sus casos críticos. El orden de resolución de los casos críticos no es trascendente, ya que su solución es independiente, es

decir, la resolución de cada caso crítico no influye en la resolución de los demás.

Una vez eliminado el caso crítico, es posible que aún no se haya resuelto la interferencia de la herramienta en el horizonte, ya que sólo se eliminan las alternativas de la herramienta en las operaciones incompatibles con la asignación de la herramienta a la operación que tiene un índice NMIAH la unidad. En este caso, la interferencia reduce su importancia en el horizonte, y se vuelve a evaluar con el resto de interferencias del horizonte para proceder a la selección de la interferencia a resolver.

La Fig 4-11 muestra la interferencia de la herramienta 1, que presenta un caso crítico. En este caso, y una vez eliminadas las alternativas de herramientas en las operaciones incompatibles con la Op10 (Op1, Op4 y Op16), aún no se ha resuelto la interferencia, aunque sí que se ha reducido.

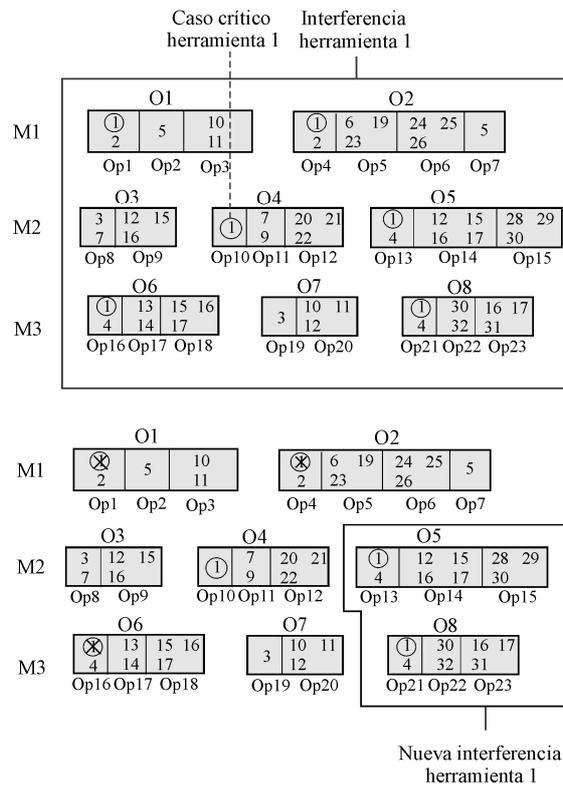


Fig 4-11. Resolución de casos críticos.

Si no existen interferencias con el índice NMIAH igual a la unidad, no existen casos críticos. En este caso, la interferencia a resolver se selecciona considerando el conjunto de índices normalizados que caracterizan a cada una de las interferencias. Como cada índice representa un factor distinto, una forma de considerarlos es establecer una función que los reúna de forma global. Para ello, se propone una función denominada función de caracterización (F), que muestra la criticidad de cada interferencia y que aúna estos índices normalizados. La interferencia seleccionada para resolver en la iteración correspondiente será la que presente un valor más elevado de esta función, ya que esa interferencia presenta más problemas en el horizonte.

$$F = w_1 \times I_{\text{paralelo}} + w_2 \times I_{\text{medio}} + w_3 \times I_{\text{minimo}} + w_4 \times I_{\text{serie}} + w_5 \times I_{\text{coste}} + w_6 \times I_{\text{tiempo}}$$

En la función de caracterización se asignan diferentes pesos a los índices. Estos pesos se denominan  $w_i$  y toman un valor comprendido en el intervalo  $[0,1]$ , de forma que la suma de todos los pesos sea la unidad. Con esto se consigue que el rango de valores que pueda tomar la función F varíe entre 0 y 1. A través del uso de los pesos  $w_i$  en la función de caracterización, es posible dar más o menos importancia a cada uno de los índices normalizados que evalúan los distintos aspectos de la interferencia.

Debido a la naturaleza del problema de resolución de interferencias, en nuestra opinión, los índices normalizados  $I_{\text{paralelo}}$  e  $I_{\text{minimo}}$  son los más importantes, porque representan los aspectos más restrictivos de la interferencia. Por ello, como regla general, estos índices deberán tener un peso mayor que el resto. Un índice  $I_{\text{paralelo}}$  elevado representa que hay un número mayor de máquinas que solicitan la herramienta en los mismos instantes de tiempo. Un índice  $I_{\text{minimo}}$  elevado indica que existen operaciones con pocas alternativas de herramientas y, por tanto, hay menos posibilidades a la hora de asignar la herramienta.

La Tabla 4-7 muestra el resultado de la función de caracterización para el ejemplo mostrado en la Fig 4-9, donde hay 15 interferencias. En este ejemplo, para generar la función de caracterización (F) se han tomado como pesos para los índices normalizados  $I_{\text{paralelo}}$  e  $I_{\text{minimo}}$  un valor mayor que para el resto de índices. En concreto, el peso de estos dos índices ha sido de 0.3, el de los índices  $I_{\text{medio}}$  e  $I_{\text{serie}}$  ha sido de 0.15 y el de  $I_{\text{coste}}$  e  $I_{\text{tiempo}}$  ha sido de 0.05 cada uno.

Los valores obtenidos en la función de caracterización se encuentran entre 0.586 y 0.863. En el ejemplo propuesto, los índices, excepto el de coste y el de tiempo de mecanizado, no presentan grandes variaciones en las interferencias del horizonte de trabajo. De los valores obtenidos se deduce que la interferencia correspondiente a la herramienta 7 es la que debe ser

resuelta en primer lugar. Las herramientas 6 y 7 tienen los índices  $I_{\text{paralelo}}$  e  $I_{\text{mínimo}}$ , con un valor unitario, por lo que son interferencias más críticas con respecto a estos parámetros. Dado que las dos herramientas aparecen en las mismas operaciones, todos los índices, excepto el de  $I_{\text{coste}}$  tienen los mismos valores. Se ha seleccionado la 7 en vez de la 6 porque la función de caracterización presenta un valor mayor.

Herramienta	Función caracterización
1	0.844
2	0.840
3	0.850
4	0.850
6	0.861
7	0.863
8	0.586
9	0.583
10	0.745
11	0.673
12	0.821
14	0.605
15	0.758
16	0.758
17	0.758

Tabla 4-7. Valores de la función de caracterización.

#### 4.1.4. PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN DE LA INTERFERENCIA.

Tras la selección de la interferencia a resolver, se procede a su resolución. Aunque las interferencias se resuelven de forma iterativa (de una en una), se debe respetar el objetivo global expuesto para la programación de las herramientas de minimizar los transportes de herramientas, manteniendo grupos de herramientas estables en las máquinas.

Al mismo tiempo, existen dos objetivos globales en la búsqueda de la solución a través de las sucesivas iteraciones. En primer lugar, se debe asegurar que el problema de resolución de interferencias tiene solución. Para ello, cada operación debe tener, al menos, una alternativa de herramienta sin interferencias en el horizonte de trabajo. Una vez se ha alcanzado este primer

objetivo, se considerará como objetivo secundario realizar un reparto uniforme de las herramientas restantes, considerando las necesidades de cada operación. Por ello, se asignarán más alternativas de herramientas a las operaciones que tienen una frecuencia de cambio mayor, ya que de esta forma se permite tener más alternativas de herramientas preparadas para realizar estos cambios.

Como ejemplo sencillo de resolución de una interferencia, la Fig 4-12 muestra la interferencia de la herramienta 1. La resolución de esta interferencia implica dejar la herramienta en las operaciones de la máquina 1 (Op1), eliminándola del resto de operaciones (Op5 y Op7), o dejar la herramienta en las operaciones de la máquina 2 (Op5 y Op7), eliminándola como alternativa en la Op1.

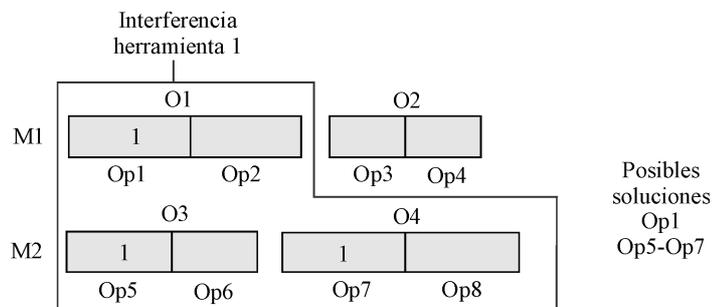


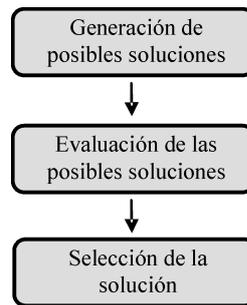
Fig 4-12. Ejemplo de interferencia.

La resolución de la interferencia se puede llevar a cabo aplicando reglas de despacho, que resuelven la interferencia basándose en un determinado criterio. Como ejemplo de reglas de despacho se pueden considerar la asignación de la herramienta a las operaciones que tengan un menor tiempo de mecanizado, a las que se encuentren en la misma máquina, de forma que no se requieran transportes, etc.

En la tesis se ha propuesto una metodología para la resolución de las interferencias. En esta metodología se plantea la aplicación de un algoritmo que genera las posibles combinaciones entre las operaciones que requieren la herramienta, pertenecientes al horizonte de trabajo, limitadas en el número máximo de transportes, y que darán lugar a las posibles soluciones de la interferencia. Posteriormente se evaluará cada una de estas posibles soluciones, seleccionando la más adecuada para la resolución de la interferencia. La aplicación de esta metodología permite generar todas las

posibles soluciones del problema, lo que garantiza una buena solución, ya que se evaluarán todas las posibilidades, en función de diferentes criterios.

La resolución de una interferencia implica realizar una serie de pasos, que se han presentado con anterioridad en el modelo funcional: generar las posibles soluciones de la interferencia, caracterizar o evaluar estas soluciones y, en base a esta caracterización, seleccionar la solución para la interferencia (Fig 4-13).



*Fig 4-13. Metodología de resolución para las interferencias.*

#### **4.1.4.1. Generación de soluciones.**

Cada posible solución de la interferencia está compuesta por un conjunto de operaciones donde puede permanecer la herramienta sin causar interferencias. La permanencia de la herramienta en estas operaciones implica su eliminación como alternativa en el resto de operaciones incompatibles con dicha asignación, eliminando, de este modo, la interferencia en el horizonte de trabajo.

La generación de las posibles soluciones de la interferencia es un problema combinatorio entre las operaciones que requieren la herramienta y pertenecen al horizonte de trabajo. En la generación de las soluciones no sólo se tienen en cuenta las operaciones que forman parte de la interferencia, sino también el resto de operaciones del horizonte, ya que de esta forma se generan las combinaciones conociendo todos los usos de la herramienta en el horizonte. Para realizar las combinaciones entre las operaciones se ha desarrollado un algoritmo, que genera estas combinaciones, acotadas por un máximo número de transportes.

En la generación de las combinaciones se deben considerar los tiempos de inicio y finalización de las órdenes en las que están incluidas las operaciones que requieren la herramienta, y el tiempo de transporte y preparación de las

herramientas entre órdenes pertenecientes a distintas máquinas. Además, la generación de las posibles soluciones requiere considerar si la interferencia presenta interferencias dentro de una orden.

Cada posible solución de la interferencia está formada por un conjunto de operaciones, de forma que la herramienta puede permanecer en dichas operaciones sin causar interferencias. Evidentemente, si en una orden hay varias operaciones que tienen como alternativa la misma herramienta y el mismo elemento cortante, todas estas operaciones formarán parte de la misma solución de la interferencia. Por el contrario, si en la orden existen operaciones que requieren la misma herramienta pero diferente elemento cortante (interferencia dentro de una orden), cada operación debe estar en diferentes soluciones, asignando una herramienta diferente a cada operación.

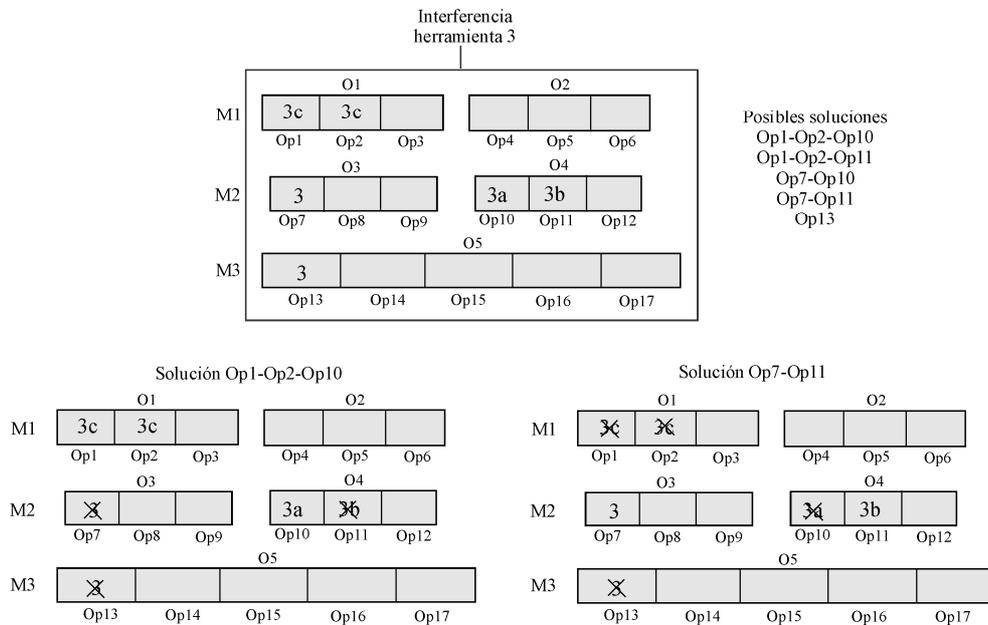


Fig 4-14. Posibles soluciones de la interferencia.

La Fig 4-14 presenta las posibles soluciones para resolver la interferencia de la herramienta 3, donde aparecen interferencias entre máquinas e interferencias dentro de una orden. En la O1 aparecen dos operaciones (Op1 y Op2) que requieren la herramienta con el mismo elemento cortante, por lo que la herramienta puede ser asignada simultáneamente a las dos operaciones. Como se ha comentado, en las interferencias dentro de una orden, no se debe asignar la misma herramienta a las operaciones que utilizan la herramienta con diferente elemento cortante, ya que esto disminuye la

productividad de la máquina. Por ello, la herramienta se debe asignar a una de las operaciones de la orden O4 (Op10 u Op11), pero no a ambas simultáneamente. Por tanto, en el ejemplo propuesto existen cinco posibles soluciones de resolución de la interferencia. En cada posible solución, si la herramienta permanece en las operaciones que componen la solución, se debe eliminar como alternativa en el resto de operaciones que forman parte de la interferencia. Para dos de las soluciones propuestas (Op1-Op2-Op10 y Op7-Op11) se muestra la eliminación de la herramienta en las operaciones que no pertenecen a la solución.

#### *4.1.4.1.1. Propuesta para la generación de soluciones de la interferencia.*

Los ejemplos que se han planteado para mostrar la generación de las posibles soluciones de la interferencia, como combinatoria entre las operaciones pertenecientes a la interferencia, son muy sencillos. Sin embargo, cuando se plantea la resolución de interferencias que implican a un gran número de máquinas y de operaciones en cada una de las máquinas, la generación y posterior evaluación de todas las posibles soluciones de la interferencia puede consumir un elevado tiempo computacional. En este caso, el número de combinaciones es elevado y generarlas todas puede presentar un problema a la hora de resolver las interferencias, ya que no sólo se consume tiempo en su generación, sino que cada combinación deberá ser evaluada para seleccionar finalmente la más idónea. Por ello, la propuesta de la tesis consiste en no generar todas las posibles soluciones de la interferencia, sino las que se consideren mejores para su resolución.

Como ya se ha comentado, uno de los objetivos importantes en producción, y que se pretende alcanzar con la programación de las herramientas, es minimizar los transportes de herramientas entre máquinas, al mismo tiempo que se fomenta la estabilidad de las herramientas en las máquinas, durante periodos más o menos largos de tiempo. La generación de todas las posibles soluciones hace que existan combinaciones que permiten que la herramienta pase de una máquina a otra un número mayor de veces, frente a otras combinaciones que tienen un número de transportes más reducido.

El transporte de la herramienta entre máquinas es un factor importante y debe ser tenido en cuenta a la hora de seleccionar la mejor solución para la interferencia. Por ello, a la hora de generar las posibles soluciones de la interferencia se limitará el número de transportes permitidos entre máquinas, descartando las soluciones que presentan demasiados transportes. Lo deseable sería eliminar los transportes de las herramientas entre máquinas, pero como esto no siempre es factible, se deben permitir los transportes. Sin embargo, no se debe permitir un excesivo número de transportes entre ellas,

por lo que se limita este valor. El número máximo de transportes de herramientas permitidos entre máquinas dependerá, principalmente, del número de máquinas, del layout, del horizonte de trabajo, de las herramientas disponibles, de los recursos destinados al transporte de herramientas, etc., siendo una decisión que se debe particularizar para cada sistema productivo.

La Fig 4-15 muestra la propuesta de generación de las posibles soluciones de la interferencia. En primer lugar se evaluarán las posibilidades de transporte de cada una de las operaciones a las operaciones de otras máquinas. Seguidamente, se ha desarrollado un algoritmo que generará todas las combinaciones entre las operaciones del horizonte que requieren un número de transportes entre máquinas igual o inferior al máximo fijado.

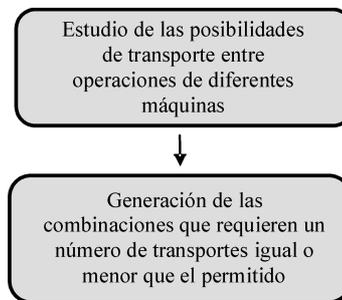


Fig 4-15. Propuesta de generación de soluciones.

La propuesta de la tesis para la generación de las posibles soluciones se va a exponer en dos pasos. En primer lugar, se evaluarán las posibilidades de transporte entre las operaciones pertenecientes a diferentes máquinas y, en segundo lugar, se mostrará el algoritmo que genera, mediante combinatoria, las posibles soluciones de la interferencia.

#### 4.1.4.1.1.1. Evaluación de los transportes.

La generación de las posibles soluciones requiere conocer las posibilidades de transporte de las herramientas entre las diferentes máquinas. Estos transportes hacen referencia al transporte entre las órdenes que tienen alguna operación que requiere la herramienta en el horizonte de trabajo. Cada solución debe agrupar al número máximo de operaciones posible sin interferencias en el horizonte de trabajo, para que de esta forma la herramienta sea asignada al máximo número de operaciones, si la solución es finalmente seleccionada para resolver la interferencia.

En la evaluación de los posibles transportes entre órdenes, se van a aplicar dos reglas básicas que descartarán determinados transportes. De esta forma, se garantizará que las soluciones agrupan al máximo número de operaciones, no existiendo soluciones que sean parte de soluciones más grandes, es decir, que agrupan a más operaciones, con el mismo número de transportes.

Por otro lado, la existencia de interferencias dentro de una orden aumenta las posibles soluciones de la interferencia (cada posible solución se multiplica por el número de operaciones que forman la interferencia dentro de la orden). La misma solución, con las mismas operaciones antes y después de la interferencia dentro de una orden, debe incluir a una sola de las operaciones de la interferencia dentro de la orden.

Para mostrar la forma de evaluar los transportes de herramientas, se va a estudiar el ejemplo de la Fig 4-16, que corresponde a la interferencia de la herramienta 1. Para ver el efecto de las interferencias dentro de una orden, en el ejemplo propuesto se ha considerado la existencia de una interferencia de este tipo en la orden O4 (Op4a y Op4b).

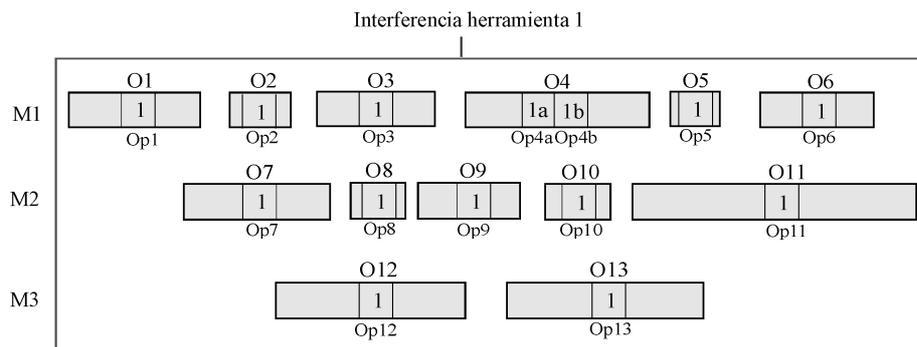


Fig 4-16. Ejemplo para la evaluación de transportes.

Para cada operación de la interferencia se identifican las operaciones de las diferentes máquinas a las que se puede transportar la herramienta. Evidentemente, es posible transportar la herramienta desde una orden a varias órdenes de otra máquina, siempre que todas ellas empiecen con posterioridad a la finalización de la orden que contiene la operación que se está evaluando.

Como primera regla a aplicar, para cada orden que se evalúe, de entre todas las posibilidades de transporte, se tomará como posible transporte, la primera orden de cada máquina que comience tras la finalización de la orden que ese está estudiando, descartando el resto de opciones. La Fig 4-17

muestra los posibles transportes de las operaciones Op2 y Op12 a las operaciones de la máquina 2. Los transportes que se van a considerar se muestran mediante líneas continuas y los transportes descartados con líneas de trazos.

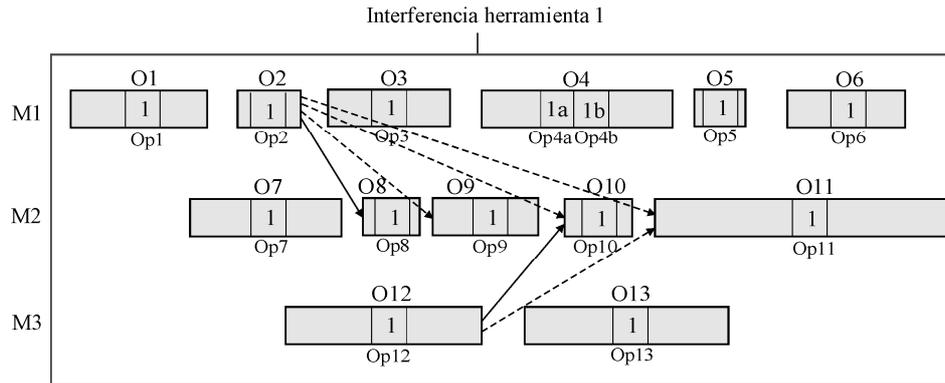


Fig 4-17. Posibilidades de transportes en función de la orden destino.

Como segunda regla, si existen varias operaciones de la misma máquina, perteneciendo a diferentes órdenes, que tienen como destino una misma orden de otra máquina, sólo se considerará como transporte entre órdenes, el que implica a la orden que se ejecuta más tarde, y no los de las anteriores.

En la Fig 4-18, que hace referencia al ejemplo propuesto anteriormente (Fig 4-16), los transportes que no se tendrán en cuenta por este motivo son los marcados por líneas discontinuas. Por ello, no se considerará el transporte entre las órdenes que contienen a la Op1 y la Op8, que daría lugar a la combinación Op1-Op8-OpXXX, si se puede generar la combinación Op1-Op2-Op8-OpXXXX, ya que esta segunda combinación contiene las operaciones de la primera, y es una combinación con más operaciones.

En la Fig 4-19 y en la Tabla 4-8 se muestra el ejemplo propuesto con los posibles transportes entre las órdenes de las diferentes máquinas. En cada posible transporte se indica la operación y la máquina de origen, y la operación y la máquina del posible destino de la herramienta. La existencia de una interferencia dentro de una orden (O4) hace que aumenten las posibles soluciones. Por ejemplo, tras la operación 8 (Op8) la herramienta puede ser asignada a la Op4a o a la Op4b, lo que dará lugar a dos soluciones.

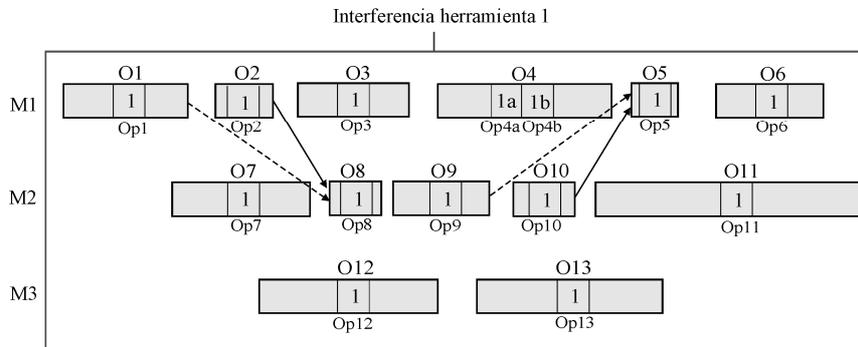


Fig 4-18. Posibilidades de transportes en función de la orden origen.

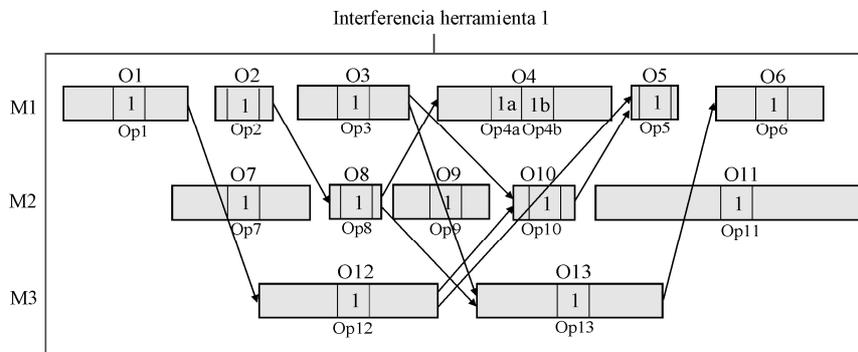


Fig 4-19. Posibles transportes de la herramienta entre órdenes.

Operación	Posibles transportes
Op1 (M1)	Op12 (M3)
Op2 (M1)	Op8 (M2)
Op3 (M1)	Op10 (M2)
	Op13 (M3)
Op8 (M2)	Op4a (M1)
	Op4b (M1)
	Op13 (M3)
Op10 (M2)	Op5 (M1)
Op12 (M3)	Op5 (M1)
	Op10 (M2)
Op13 (M3)	Op6 (M1)

Tabla 4-8. Listado de los posibles transportes entre órdenes.

4.1.4.1.1.2. Algoritmo de generación de soluciones.

El algoritmo propuesto para la generación de las posibles soluciones de la interferencia generará todas las combinaciones que tengan como máximo el número de transportes de herramientas permitido entre máquinas. Se ha optado por esta opción, porque esta solución es computacionalmente poco costosa.

El algoritmo propuesto generará estas soluciones basándose en el diagrama de secuenciación de operaciones. Dada una operación, este diagrama muestra las posibles operaciones que se pueden realizar a continuación. En este diagrama, los nodos representan las operaciones que requieren la herramienta en el horizonte de trabajo. Los arcos que parten de un nodo llevan a las operaciones que se pueden realizar a continuación de la operación del nodo. Estos arcos se han trazado uniendo las operaciones pertenecientes a una misma máquina y teniendo en cuenta las posibilidades de transporte entre operaciones de las diferentes máquinas. La Fig 4-20 muestra el diagrama de secuenciación para el ejemplo propuesto (Fig 4-16).

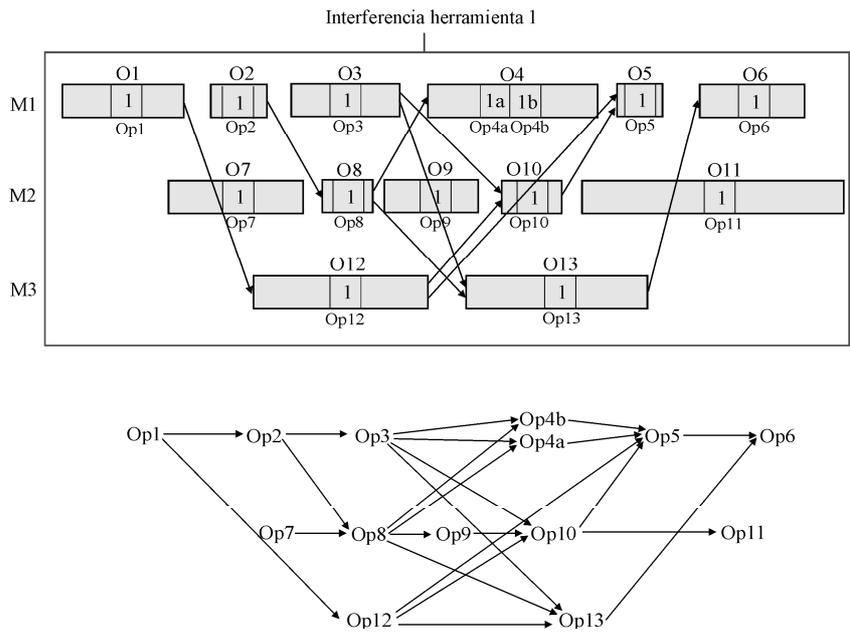


Fig 4-20. Diagrama de secuenciación.

El diagrama de flujo de la Fig 4-21 muestra la propuesta del algoritmo para la generación de las posibles soluciones de la interferencia. En cada posible solución de la interferencia se debe agrupar el máximo número de

operaciones, para que si la solución es seleccionada, la herramienta se asigne al máximo número de operaciones posible. Por ello, el algoritmo de generación de posibles soluciones comenzará por la primera operación de cada máquina, e irá recorriendo el diagrama de secuenciación.

En cada nodo, el algoritmo evaluará las posibles operaciones que pueden formar parte de la solución. Estas operaciones son a las que apuntan los arcos que parten del nodo. Para cada una de estas operaciones se generará una solución. En cada solución se mantendrán las operaciones anteriores al nodo, la del nodo, y se añadirá la operación a la que lleva el arco. Por ejemplo, de la Op1 parten dos arcos, uno a la Op2 y otro a la Op12. Por ello, se pueden generar dos soluciones: Op1-Op2 y Op1-Op12. Ambas soluciones tienen como inicio a la Op1. En cada una de estas soluciones, el algoritmo volverá a evaluar las posibles operaciones que se pueden adicionar a la solución en los nodos de las operaciones finales (Op2 y Op12). Este proceso continúa hasta que se llegue a los nodos finales del diagrama de secuenciación. Cada vez que se añaden operaciones a la solución, el algoritmo evaluará los transportes de herramientas necesarios. De esta forma, la primera solución (Op1-Op2) no requiere ningún transporte, mientras que la segunda (Op1-Op12) necesita un transporte.

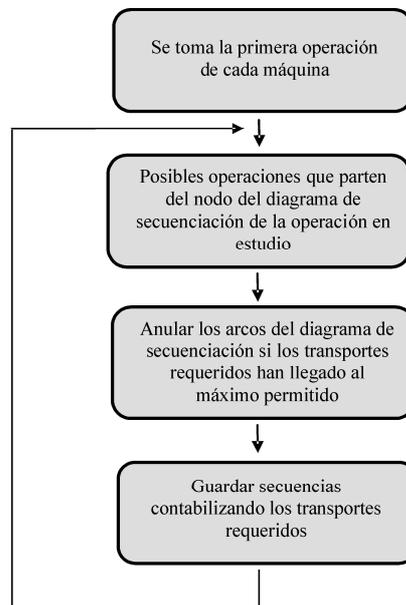


Fig 4-21. Algoritmo propuesto para la generación de las soluciones de la interferencia.

En la evaluación de las posibles operaciones que pueden formar parte de la solución se considerará el número máximo de transportes permitidos. Si en las operaciones anteriores que forman la solución ya se ha alcanzado el número máximo de transportes, se deben eliminar los arcos que llevan a las operaciones que pertenecen a otras máquinas. Por ejemplo, si sólo se permite un transporte, la solución Op1-Op12 necesita ya ese transporte. Por ello, las posibilidades de operaciones que parten de la Op12 se verán reducidas a la Op13. No se pueden considerar las operaciones Op5 y Op10, porque estas soluciones necesitarían dos transportes de herramientas entre máquinas.

4.1.4.1.1.3. *Ejemplo de generación de soluciones.*

Una vez expuesto el algoritmo que genera las posibles soluciones de la interferencia, la Fig 4-22 muestra algunas de las posibles soluciones que se pueden generar a partir del diagrama de secuenciación. Como ejemplo, se han marcado tres posibles soluciones. Las dos primeras soluciones requieren un transporte, mientras que la última requiere dos transportes. Las soluciones son: Op1-Op2-Op3-Op10-Op11; Op7-Op8-Op4b-Op5-Op6; Op1-Op12-Op13-Op6.

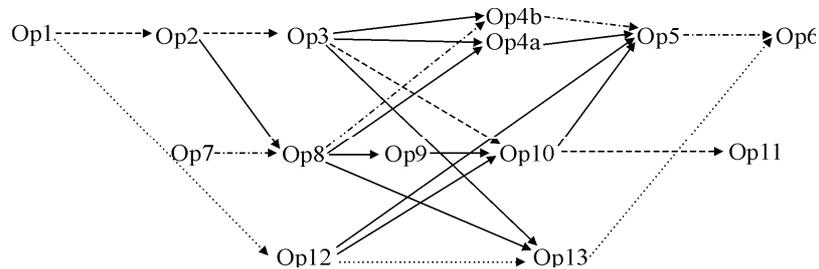


Fig 4-22. Posibles soluciones de la interferencia.

Continuando con el ejemplo, si se toma como inicio la máquina 1 y se permiten como máximo dos transportes de herramientas, la Tabla 4-9 muestra todas las posibles soluciones. Todas estas soluciones comienzan con la primera operación de la máquina, la Op1, ya que en la generación de las posibles soluciones de una máquina se parte de la primera operación y se van generando las combinaciones tal y como se ha expuesto en el algoritmo.

Posibles soluciones de la interferencia	
Sin transportes	Op1-Op2-Op3-Op4a-Op5-Op6
	Op1-Op2-Op3-Op4b-Op5-Op6
Un transporte	Op1-Op12-Op13
	Op1-Op2-Op8-Op9-Op10-Op11
	Op1-Op2-Op3-Op10-Op11
	Op1-Op2-Op3-Op13
Dos transportes	Op1-Op12-Op5-Op6
	Op1-Op12-Op10-Op11
	Op1-Op12-Op13-Op6
	Op1-Op2-Op8-Op4a-Op5-Op6
	Op1-Op2-Op8-Op4b-Op5-Op6
	Op1-Op2-Op8-Op13
	Op1-Op2-Op8-Op9-Op10-Op5-Op6
	Op1-Op2-Op3-Op10-Op5-Op6
	Op1-Op2-Op3-Op13-Op6

Tabla 4-9. Posibles soluciones de la interferencia.

#### 4.1.4.2. Evaluación de las posibles soluciones.

Siguiendo la metodología propuesta, una vez se han determinado las posibles soluciones de la interferencia, esta función caracteriza o evalúa dichas soluciones, para poder compararlas y seleccionar la más adecuada para resolver la interferencia.

La evaluación de las soluciones se llevará a cabo teniendo en cuenta los objetivos propuestos en la resolución del problema, a través de las sucesivas iteraciones. Por ello, se fomentará la estabilidad de las herramientas en las máquinas, intentando minimizar los transportes de herramientas entre máquinas. Como es necesario garantizar una solución al problema de interferencias, cada operación debe tener al menos una herramienta para realizar el mecanizado, por lo que se dará prioridad a este objetivo. Una vez este objetivo se ha alcanzado, se realizará un reparto de las herramientas entre las operaciones, asignando más herramientas a las operaciones que tengan mayor necesidad de herramientas, fundamentalmente porque los cambios de filos son más frecuentes. De esta forma, se pueden reducir los tiempos de espera por preparación del recurso herramienta.

La evaluación de las posibles soluciones se realizará en dos pasos. En primer lugar se evaluará la información necesaria para caracterizar cada posible solución de la interferencia. Esta evaluación comprende la caracterización de cada operación individual de la solución y del conjunto de las operaciones que componen cada posible solución. En segundo lugar, se propondrá un algoritmo, que analizará todas estas características, permitiendo la obtención de los objetivos planteados para la resolución del problema.

#### *4.1.4.2.1. Evaluación a nivel de operaciones individuales.*

En la caracterización de las operaciones individuales que forman parte de cada posible solución, se van a evaluar distintas informaciones, que se utilizarán en cada iteración para la consecución de los objetivos globales. En este sentido, es necesario conocer si la operación dispone de una primera herramienta sin interferencias en el horizonte, la necesidad de herramientas que tiene la operación y, finalmente la posibilidad de generación de casos críticos, si la herramienta no es asignada a la operación. Esta información se evaluará mediante la utilización de los siguientes índices:

- Necesidad de la primera alternativa de herramienta sin interferencias en la operación:  $A_{ope}$ .
- Necesidad de herramientas en la operación:  $B_{ope}$ .
- Posibilidad de generación de casos críticos:  $C_{ope}$ .

El primer objetivo en la resolución de las interferencias consiste en garantizar que todas las operaciones dispondrán de una primera herramienta sin interferencias. Para evaluar este aspecto, en cada operación individual se definirá un índice que se denominará  $A_{ope}$ . Este índice evalúa la existencia de alternativas de herramientas sin interferencias en la operación, mostrando la necesidad que tiene la operación de la primera herramienta de este tipo. De esta forma, el índice  $A_{ope}$  tomará el valor nulo cuando exista alguna alternativa de herramienta sin interferencia en la operación, y el valor 1 en caso contrario.

Una vez todas las operaciones tienen al menos una herramienta sin interferencias, el segundo objetivo en la resolución de las interferencias consiste en determinar la necesidad de herramientas de cada operación. Esta necesidad se evaluará con la frecuencia de cambio de los filos, mediante un índice que se denominará  $B_{ope}$ . Este índice se define como el tiempo entre cambios de filo de la herramienta. Una frecuencia de cambios alta implica preparaciones de herramientas más frecuentes, lo que provoca más paros y mayor asignación de mano de obra. En principio, este índice se evaluará únicamente en las operaciones que requieran más de un cambio de filo para el

mecanizado del lote. Una vez todas las operaciones que requieran más de un filo tengan asignadas al menos dos herramientas, que permiten alternarse en los cambios, se evaluará en todas las operaciones del horizonte, para realizar el reparto de las herramientas sobrantes.

A continuación se muestra un ejemplo de cuantificación del índice  $B_{ope}$ . En la Fig 4-23 se muestra la interferencia de la herramienta 3. En cada una de las operaciones de la interferencia se requieren al menos dos filos para el mecanizado del lote. Como consecuencia de iteraciones anteriores, en cada operación que requiere la herramienta 3 ya existe una herramienta sin interferencia capaz de realizar la operación.

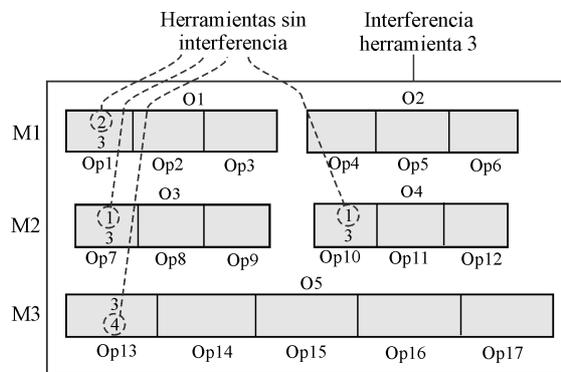


Fig 4-23. Ejemplo para la evaluación de  $B_{ope}$

La Tabla 4-10 muestra la frecuencia de cambios para cada operación que requiere la herramienta, que es el valor del índice  $B_{ope}$  en cada operación.

Operación	Op1	Op7	Op10	Op13
Frecuencia cambio (min)	40	50	25	30
$B_{ope}$	40	50	25	30

Tabla 4-10. Evaluación del índice  $B_{ope}$ .

Finalmente, para concluir la evaluación de las operaciones individuales que forman parte de la solución, hay que estudiar la posibilidad de generación de casos críticos en posteriores iteraciones. La generación de casos críticos se puede evitar, analizando las alternativas de herramientas en las operaciones de la interferencia, y seleccionando una solución que no dé lugar a casos críticos o a los menos posibles.

Los casos críticos pueden aparecer cuando existen operaciones con dos alternativas de herramientas: la herramienta que provoca la interferencia y otra herramienta que presenta una interferencia en ese intervalo de tiempo y que aún no ha sido resuelta. En este caso, si se elimina la herramienta que provoca la interferencia en estas operaciones, se queda una única alternativa de herramienta que no tiene resuelta su interferencia, generando un caso crítico en una posterior iteración. La posibilidad de generación de casos críticos se evalúa mediante un índice, que se denominará  $C_{ope}$ . Este índice cuantifica en cada posible operación la posibilidad de generación de un caso crítico si la herramienta no es asignada a dicha operación. El índice  $C_{ope}$  tomará un valor nulo cuando no exista posibilidad de caso crítico y un valor de 1 si existe esta posibilidad.

La Fig 4-24 muestra la posibilidad de generación de un caso crítico. Las interferencias de las herramientas 3 y 4 ya han sido resueltas. En esta iteración se está resolviendo la interferencia de la herramienta 1, pero la interferencia causada por la herramienta 2 aún no ha sido resuelta. Por ello, el índice  $C_{ope}$  tomará el valor 1 en la operación 1, y un valor nulo en el resto de operaciones de la interferencia. Si no se deja la herramienta 1 en la Op1, se generará un caso crítico para la siguiente iteración.

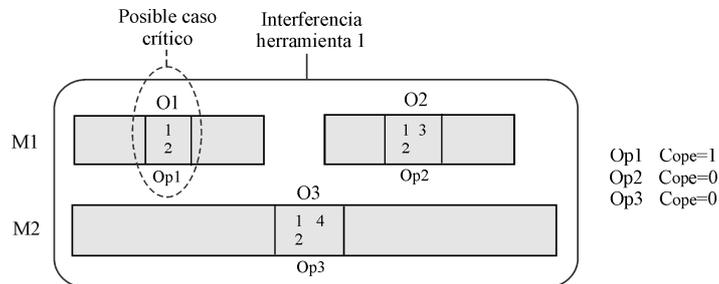


Fig 4-24. Posible generación de casos críticos.

#### 4.1.4.2.2. Caracterización de las posibles soluciones.

Cada posible solución de la interferencia está formada por un conjunto de operaciones. Aunque las operaciones de la solución se han evaluado de manera individual, es necesario caracterizar cada posible solución de forma global. De esta forma se podrá seleccionar la solución más adecuada para la resolución de la interferencia.

La caracterización de cada posible solución se basará en la evaluación de los diferentes índices ( $A_{sol}$ ,  $B_{sol}$  y  $C_{sol}$ ), que aunarán los índices de cada

operación individual ( $A_{ope}$ ,  $B_{ope}$  y  $C_{ope}$ ), y en el análisis de los transportes de herramientas requeridos en cada posible solución.

*4.1.4.2.2.1. Evaluación de índices.*

En la caracterización de cada posible solución se van a utilizar unos índices que aúnen la información de cada una de las operaciones a nivel individual que forman la solución. De esta forma, en cada posible solución es necesario conocer cuántas operaciones aún no tienen la primera herramienta sin interferencia asignada, qué necesidad de herramientas tienen las operaciones de la posible solución o cuántas operaciones pueden generar posibles casos críticos en las iteraciones siguientes.

Para ello, se definirán tres nuevos índices, que se denominarán  $A_{sol}$ ,  $B_{sol}$  y  $C_{sol}$  en cada solución, que aglutinarán la información de los índices de cada una de las operaciones a nivel individual ( $A_{ope}$ ,  $B_{ope}$  y  $C_{ope}$ ).

En cada solución, el índice  $A_{sol}$  se definirá como la suma de los índices  $A_{ope}$  de las operaciones que pertenecen a la solución. Cada operación que aún no tenga una primera herramienta sin interferencia aporta un valor unidad del índice  $A_{ope}$ . El valor de  $A_{sol}$  indica el número de operaciones en la posible solución que aún no tienen asignada una herramienta sin interferencia. Por el contrario, un valor nulo de  $A_{sol}$  implica que se ha alcanzado el objetivo de que todas las operaciones que forman la solución tienen una primera alternativa de herramienta sin interferencias.

El índice  $B_{sol}$  se define como el mínimo del valor de  $B_{ope}$  en las operaciones que forman parte de la interferencia. El índice  $B_{ope}$  evalúa la frecuencia de cambios de filo de las operaciones que requieren la herramienta. Valores pequeños de este índice implican cambios más frecuentes. De esta forma, la solución que presente un valor menor del índice  $B_{sol}$  implica que la solución tiene una operación que requiere una frecuencia de cambios mayor.

El índice  $C_{sol}$  se define de forma similar al índice  $A_{sol}$ . El índice  $C_{sol}$  se define como la suma de los índices  $C_{ope}$  de las operaciones que pertenecen a la solución. Como el índice  $C_{ope}$  indica la posibilidad que tiene cada operación de generar casos críticos si la herramienta no es asignada a la operación, la solución con mayor  $C_{sol}$  será la que evitará más casos críticos para la siguiente iteración que el resto de soluciones, si es seleccionada. De esta forma, el índice  $C_{sol}$  evalúa la criticidad de la solución en cuanto a la generación de casos críticos.

La obtención de los índices definidos para el conjunto de la solución, se mostrará mediante tres ejemplos, uno de evaluación del índice  $A_{sol}$ , otro del índice  $B_{sol}$ , y el último del índice  $B_{sol}$ . La Fig 4-25 muestra la evaluación del índice  $A_{sol}$  en las posibles soluciones de la interferencia generada por la herramienta 3. En esta iteración, la operación 1 ya dispone de una herramienta sin interferencias (herramienta 2). El resto de operaciones disponen de otras alternativas, que presentan interferencias no resueltas en el horizonte.

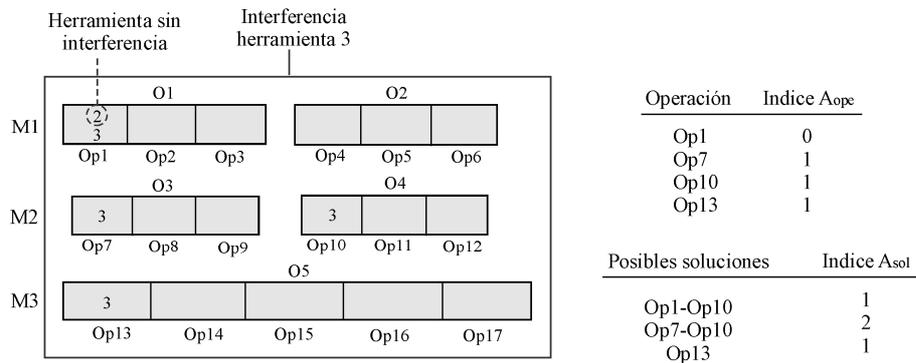


Fig 4-25. Evaluación del índice  $A_{sol}$ .

Continuando con el ejemplo de la Fig 4-23, la Fig 4-26 muestra la evaluación del índice  $B_{sol}$  en las posibles soluciones de la interferencia generada por la herramienta 3. En cada operación se muestra el índice  $B_{ope}$ , que representa la frecuencia de cambio de los filos de la herramienta. El índice  $B_{sol}$  toma el valor mínimo del índice  $B_{ope}$  de las operaciones pertenecientes a la posible solución.

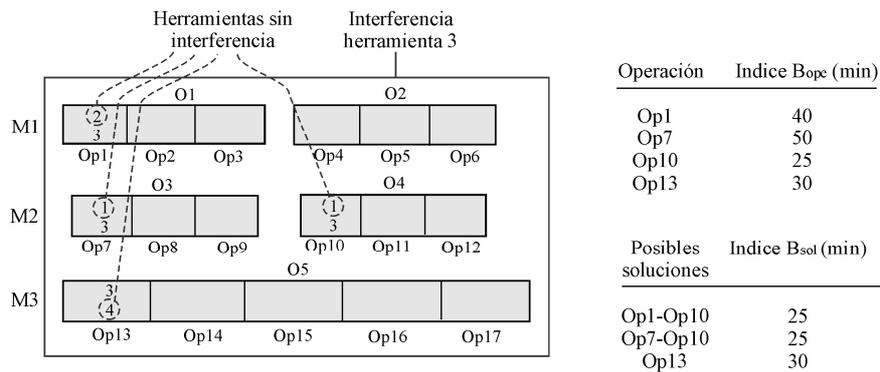


Fig 4-26. Evaluación del índice  $B_{sol}$ .

La Fig 4-27 muestra el ejemplo de valoración del índice  $C_{sol}$  en las posibles soluciones de la interferencia provocada por la herramienta 3. En el ejemplo mostrado, la herramienta 2 presenta una interferencia en el horizonte de trabajo, siendo la única alternativa que está con la herramienta 3 en la Op1. Por ello, la Op1 tiene una valoración del índice  $C_{ope}$  de 1. Al evaluar el índice  $C_{sol}$  en las diferentes soluciones, las soluciones que contienen la Op1 presentarán una valoración del índice  $C_{sol}$  de 1. Si no se selecciona una de estas soluciones (Op1-Op10; Op1-Op16) para resolver la interferencia, se generará un caso crítico en la siguiente iteración.

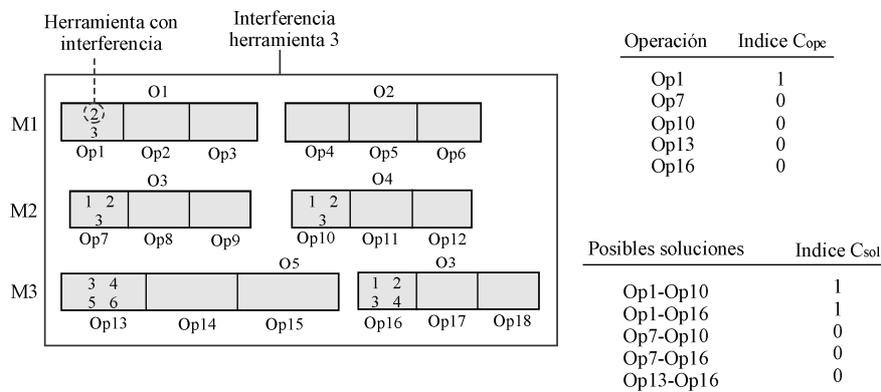


Fig 4-27. Evaluación del índice  $C_{sol}$ .

4.1.4.2.2.2. Análisis de los transportes.

En relación a los transportes, el número de transportes requerido en cada una de las posibles soluciones de la interferencia, y los instantes de realización de dichos transportes en el horizonte de trabajo, son factores que influyen en la selección de la mejor solución de la interferencia. Como los recursos utilizados para transportar las herramientas tienen una capacidad finita, los transportes se deben distribuir en el tiempo, a lo largo del horizonte de trabajo, para no rebasar dicha capacidad.

Uno de los objetivos importantes en producción es minimizar los transportes de herramientas en el sistema productivo. Por ello, en la propuesta de programación de las herramientas o resolución de las interferencias se tiene como objetivo minimizar estos transportes, o lo que es lo mismo, se pretende mantener grupos de herramientas en la misma máquina durante determinados periodos de tiempo. En la generación de cada posible solución, ya se ha limitado el número de transportes de herramientas entre máquinas, y se conoce el número de transportes entre las operaciones que forman cada solución. Sin embargo, no sólo hay que evaluar los transportes

entre las operaciones que forman la posible solución de la interferencia, sino que se debe considerar la ubicación de la herramienta al inicio del horizonte que se está evaluando, y al inicio del horizonte posterior. Estas ubicaciones pueden generar transportes adicionales de la herramienta, que hay que tener en cuenta en la evaluación de los transportes que origina cada posible solución.

La ubicación de la herramienta al inicio del horizonte es conocida, ya que se conocen las previsiones realizadas por el gestor en el horizonte anterior. En función de esta ubicación, se contabilizarán transportes adicionales en las soluciones que requieran un transporte de la herramienta.

La Fig 4-28 muestra la evaluación de dicho transporte en las soluciones de la interferencia generada por la herramienta 1. Como la herramienta 1 se encuentra en la máquina 1 al inicio del horizonte, las soluciones que comienzan por una operación perteneciente a la máquina 1 (Op1) no necesitan un transporte adicional, mientras que el resto de soluciones sí que lo requieren.

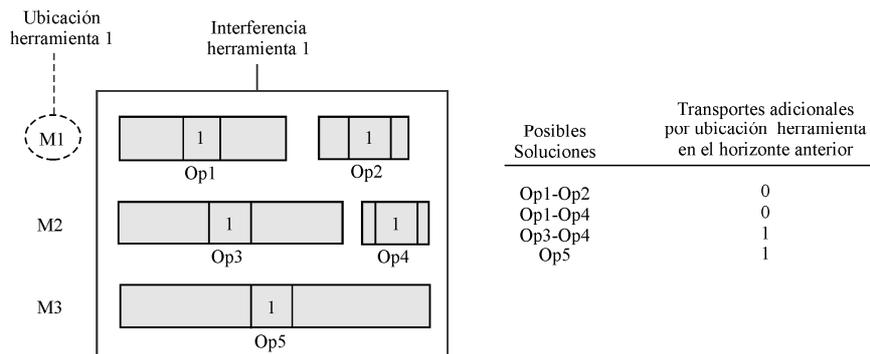
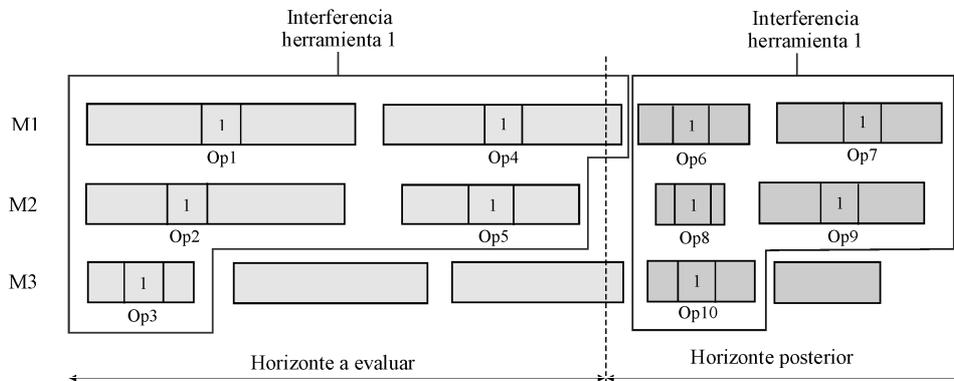


Fig 4-28. Transportes adicionales por enlace con el horizonte anterior.

En relación a la ubicación de la herramienta en el inicio del horizonte posterior, este dato puede no ser conocido, ya que la herramienta también puede presentar interferencias en dicho horizonte. En este caso, se estimará la probabilidad de ubicación de la herramienta en las primeras operaciones del horizonte que requieran la herramienta, dado que la ubicación real de la herramienta sólo se conocerá cuando se resuelvan las interferencias del horizonte posterior. Para ello, se dará la misma probabilidad a las máquinas que requieran la herramienta simultáneamente en las primeras operaciones del horizonte. Es decir, si al inicio del horizonte posterior, la herramienta es

requerida por dos máquinas simultáneamente, a cada una se le asignará una probabilidad de un 50% de quedarse con la herramienta.

La Fig 4-29 muestra las posibles soluciones para la interferencia de la herramienta 1 en el horizonte de trabajo actual, considerando que como máximo se puede realizar un transporte entre las operaciones de cada solución. En las posibles soluciones del horizonte a evaluar se muestra la máquina en la que se realiza la última operación. En el horizonte posterior también existe una interferencia de la herramienta. Dado que en las primeras operaciones, la herramienta 1 es requerida por las tres máquinas, a cada máquina se le dará una probabilidad de un 33% de quedarse con la herramienta.



Soluciones horizonte a evaluar	Máquina fin	Primeras operaciones interferencia horizonte posterior	Máquina comienzo
Op1-Op4	M1	Op6	M1
Op1-Op5	M2	Op8	M2
Op2-Op5	M2	Op10	M3
Op2-Op4	M1		
Op3	M3		
Op3-Op4	M1		
Op3-Op5	M2		

Soluciones horizonte a evaluar	Probabilidad transportes por ubicación herramienta en horizonte posterior
Op1-Op4	0.66
Op1-Op5	0.66
Op2-Op5	0.66
Op2-Op4	0.66
Op3	0.66
Op3-Op4	0.66
Op3-Op5	0.66

Fig 4-29. Transportes adicionales por enlace con el horizonte posterior.

Como ejemplo para la determinación del número de transportes requeridos en cada posible solución de la interferencia, la Fig 4-30 muestra los transportes de herramientas para las posibles soluciones de la interferencia de la herramienta 1 del ejemplo anterior. La herramienta 1 se encuentra en el almacén de la máquina 1 al inicio del horizonte de trabajo. Por ello, las soluciones que comiencen con la Op1 no requerirán ningún transporte adicional, mientras que las soluciones que comiencen con la Op2 o la Op3 sí que requerirán de un transporte adicional.

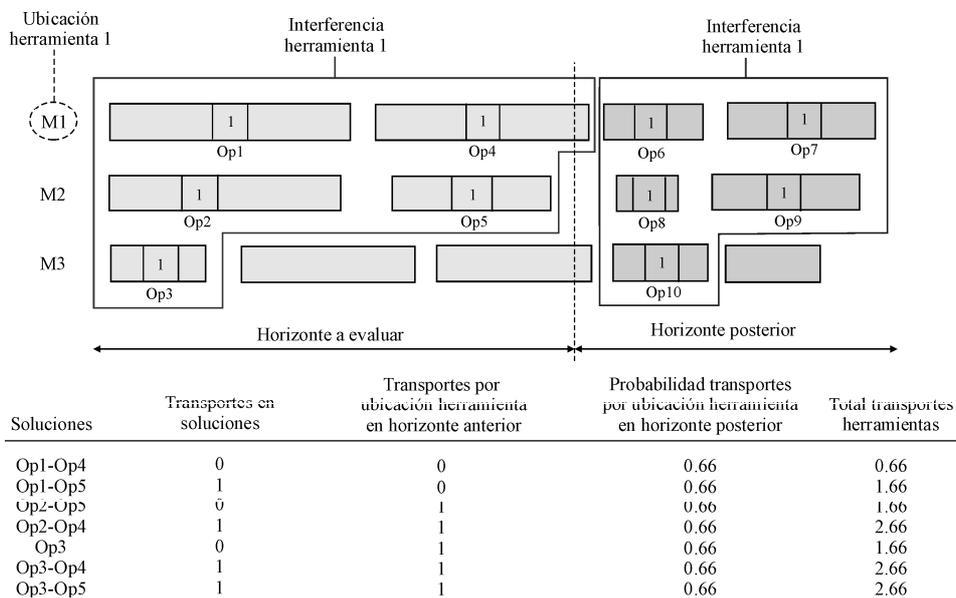


Fig 4-30. Evaluación del número de transportes requeridos.

Aunque se ha determinado el número de transportes de herramientas necesarios, los transportes de herramientas de una máquina a otra, o desde los almacenes a las máquinas, requieren de determinados recursos para su ejecución (mano de obra, dispositivos automáticos, etc.). Aunque estos recursos suelen disponer de suficiente capacidad para realizar dichos transportes de herramientas, no hay que olvidar que tienen una capacidad finita. Para no sobrepasar esta capacidad, los transportes de herramientas no se deberían concentrar en los mismos instantes de tiempo, sino que se deberían distribuir a lo largo del horizonte de trabajo. Por esta razón, no sólo es necesario conocer el número de transportes que requiere cada posible solución de la interferencia, sino también determinar los periodos de tiempo en los que se realizarán dichos transportes, de forma que no se sature el recurso dedicado al transporte de las herramientas.

En cada iteración del problema de resolución de interferencias, se conocen los transportes necesarios de la resolución de las iteraciones anteriores. Por ello, si en una iteración, se detecta que determinadas soluciones requieren transportes de herramientas en periodos de tiempo que sobrepasan la capacidad de los transportes, estas soluciones deberán ser descartadas, no admitiéndose como solución para la interferencia. Para disponer de un margen antes de saturar los transportes, se fijará un límite de seguridad, inferior en un porcentaje a la capacidad del recurso destinado al transporte de herramientas. De esta forma, una vez alcanzado dicho límite, sólo se permitirá asignar transportes de herramientas a estos periodos de tiempo, cuando no existan más soluciones alternativas para resolver la interferencia.

La Fig 4-31 muestra los periodos de tiempo en los que se deben realizar los transportes de herramientas requeridos entre las operaciones de cada posible solución, así como los transportes necesarios por la ubicación de la herramienta al inicio del horizonte. Los transportes requeridos al final del horizonte para enlazar con el horizonte posterior aún no se conocen, por lo que no se representan en la figura, y no se tienen en cuenta.

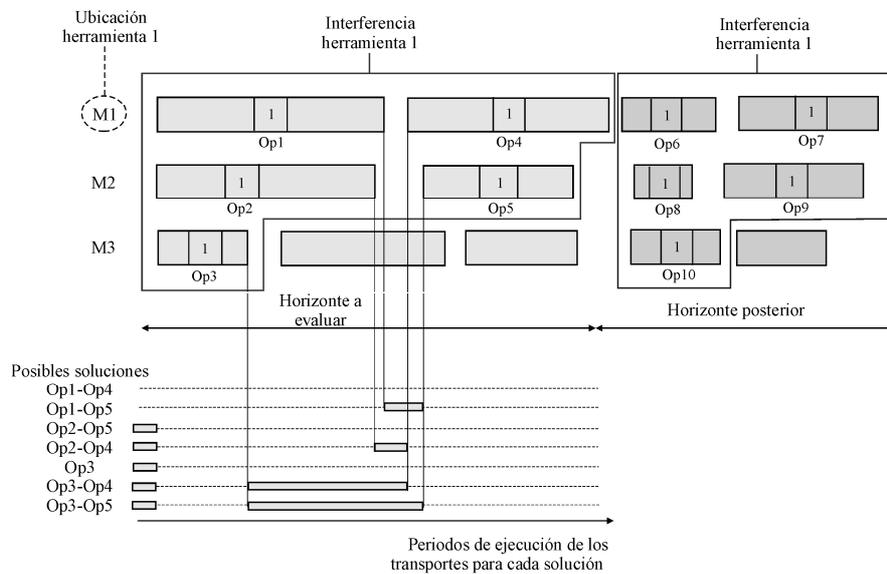


Fig 4-31. Periodos de ejecución de los transportes.

Para este ejemplo, la Fig 4-32 muestra la capacidad del recurso dedicado al transporte de las herramientas. Antes de llegar a agotar la capacidad del recurso se ha considerado un límite de seguridad. Como se observa, existe

una saturación del recurso que realiza los transportes de herramientas en el periodo de tiempo que transcurre entre el final de la orden que contiene a la operación 2 y el inicio de la orden que contiene a la operación 4. Por ello, se deberían descartar las soluciones que requieren transportes en estos periodos de tiempo. En este caso, se descartarían las soluciones Op1-Op5 y Op2-Op4, seleccionando para resolver la interferencia una de las restantes opciones. Sin embargo, si no existiesen soluciones alternativas, se elegiría una de las posibles soluciones (Op1-Op5; Op1-Op4), pero se estaría próximo a saturar el recurso de transporte de herramientas.

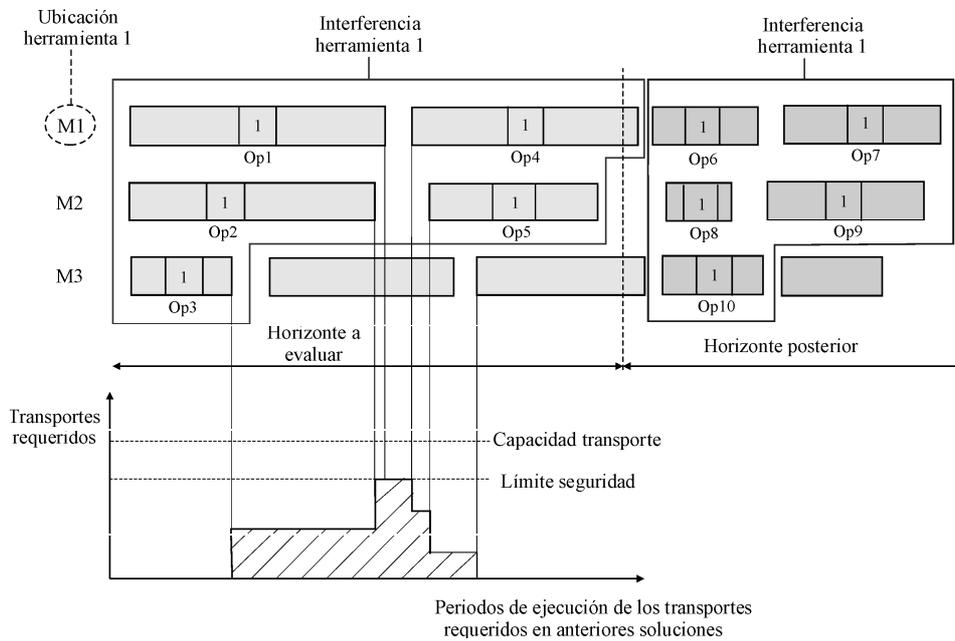


Fig 4-32. Capacidad de los transportes.

#### 4.1.4.2.3. Algoritmo de evaluación de las posibles soluciones.

Las posibles soluciones de la interferencia se evaluarán mediante un algoritmo, que considerará los índices definidos en cada solución ( $A_{sol}$ ,  $B_{sol}$  y  $C_{sol}$ ), junto con los transportes requeridos en dichas soluciones. Este algoritmo tiene como propósito alcanzar los objetivos globales propuestos para la programación de herramientas o resolución de interferencias. Básicamente, estos objetivos son:

- Minimizar los transportes de herramientas, de manera que se fomente la estabilidad de las herramientas en las máquinas.
- Garantizar que el problema de resolución de interferencias tiene solución, asignando al menos una primera alternativa de herramienta sin interferencia a cada operación.
- Realizar un reparto de las herramientas entre las operaciones, asignando más alternativas a las operaciones que tienen más necesidad de herramientas.
- Distribuir los transportes de herramientas necesarios a lo largo del horizonte de trabajo, para no sobrepasar la capacidad de los recursos destinados al transporte de herramientas.

El diagrama de la Fig 4-33 muestra el procedimiento seguido por el algoritmo para seleccionar la solución más adecuada que resuelva la interferencia. Mediante este algoritmo se evaluarán todas las posibles soluciones de la interferencia simultáneamente, tal y como se explica a continuación.

El algoritmo comienza descartando las posibles soluciones que sobrepasan la capacidad de los recursos destinados al transporte de herramientas en el horizonte de trabajo (1). Para ello, en cada iteración se conocen los transportes a los que han dado lugar la resolución de las interferencias en anteriores pasos, así como la capacidad de los sistemas de transporte. Descartar las soluciones que saturan los transportes hace que en la fase de programación de los transportes, que se realiza con posterioridad, surjan menos problemas por incapacidad de los transportes de herramientas. Si se diera la situación en la que se tuvieran que descartar todas las soluciones, no sería posible encontrar una solución a la interferencia. En este caso, se evaluarían todas las soluciones, aunque se saturasen los transportes de herramientas. En caso de incapacidad de los transportes, los trabajos sufrirán pequeños retrasos en las máquinas, que no se han considerado importantes en el desarrollo del modelo funcional, ya que se ha intentado evitar la saturación de dichos transportes.

Una vez descartadas estas soluciones, se aplicarán distintos criterios de forma secuencial. Estos criterios descartan progresivamente posibles soluciones, hasta obtener la mejor solución de la interferencia. Estos criterios están basados en la valoración de los índices propuestos junto con los transportes requeridos en cada posible solución.

Para asegurar que el problema de resolución de interferencias, o programación de herramientas, tiene solución en el horizonte, cada operación

debe tener, al menos, una alternativa de herramienta sin interferencias en el horizonte de trabajo, lo que se alcanza cuando el índice  $A_{sol}=0$ . Para ello, se evaluará este índice en las operaciones de la solución. Una vez se ha garantizado una solución al problema de interferencias, se realizará un reparto de las herramientas entre las operaciones, en función de las necesidades de herramientas de cada solución ( $B_{sol}$ ).

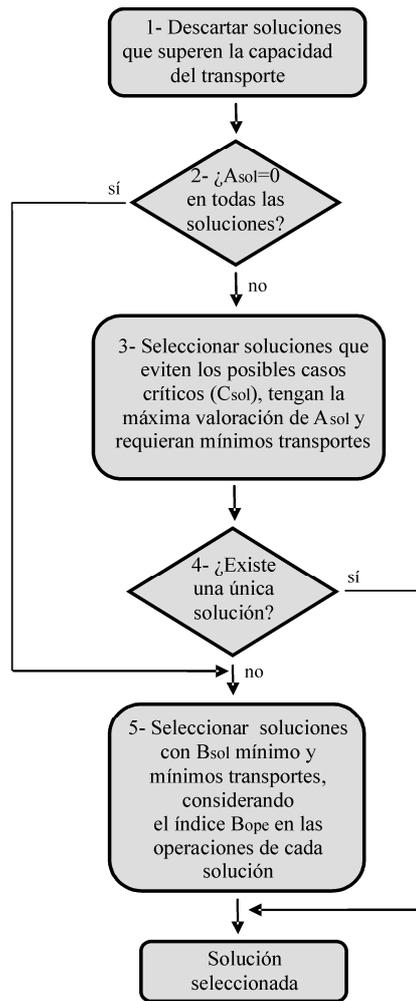


Fig 4-33. Algoritmo de evaluación de las posibles soluciones de la interferencia.

Para garantizar que todas las operaciones tienen asignada al menos una herramienta, se evalúa el índice  $A_{sol}$  (2). En las soluciones en las que el índice  $A_{sol}>0$ , existen operaciones en las que no hay asignada ninguna alternativa de

herramienta sin interferencias. Entre ellas, se seleccionará la mejor solución para resolver la interferencia, aplicando los siguientes criterios de forma secuencial (3):

- Evaluación del índice  $C_{sol}$ . Si existe posibilidad de generación de casos críticos ( $C_{sol}>0$ ), se seleccionan las soluciones que eviten esta posibilidad, siendo las únicas que continuarán siendo analizadas. Cuanto mayor es el valor de  $C_{sol}$  en una solución, más casos críticos se generarán en posteriores iteraciones, si dicha solución no es seleccionada para resolver la interferencia. Por tanto, se tomarán como soluciones a seguir analizando las que tengan un mayor valor del índice  $C_{sol}$ .
- Soluciones con máxima valoración del índice  $A_{sol}$ . Se seleccionan las soluciones que tengan una valoración mayor del índice  $A_{sol}$ , ya que en estas soluciones hay más operaciones que aún no disponen de la primera alternativa de herramienta sin interferencias.
- Soluciones con mínimos transportes. De entre las soluciones que tengan el máximo valor del índice  $A_{sol}$  se seleccionan las que requieran menos transportes de herramientas. Por ejemplo, pueden existir tres soluciones con el valor máximo de  $A_{sol}$  (p.e.  $A_{sol}=3$ ). Esto significa que cada solución tiene tres operaciones que no disponen de una primera alternativa de herramienta. De entre ellas, se seleccionará la que origine menos transportes.
- Evaluación de  $B_{sol}$ . Si tras la aplicación de los criterios anteriores, no existe una única solución que resuelva la interferencia (4), se evaluará en las soluciones candidatas a resolver la interferencia el índice  $B_{sol}$ . Si en el ejemplo anterior las tres soluciones con  $A_{sol}=3$  requieren el mismo número de transportes, se procederá a la evaluación de  $B_{sol}$ . Esta evaluación se expone a continuación.

El índice  $B_{sol}$  se evalúa en dos situaciones. En primer lugar, para discernir entre soluciones con el mismo valor de  $A_{sol}$  y los mismos transportes. En segundo lugar, se evalúa el índice  $B_{sol}$  junto con los transportes necesarios cuando todas las operaciones disponen de una primera alternativa de herramienta, para seleccionar la solución que finalmente resolverá la interferencia. En este último caso, los índices  $A_{sol}$  y  $C_{sol}$  no se tendrán en cuenta, ya que el índice  $A_{sol}$  sólo se utiliza para garantizar que cada operación tendrá al menos una alternativa de herramienta, y el índice  $C_{sol}$  evalúa la posibilidad de generación de casos críticos, lo que no es posible, si cada operación dispone al menos de una primera alternativa de herramienta.

La evaluación del índice  $B_{sol}$  se lleva a cabo en dos pasos. En primer lugar, se asignarán dos alternativas de herramienta a las operaciones que

requieran más de un cambio de filo para el mecanizado del lote, de forma que estas operaciones reduzcan su frecuencia de cambio y tengan disponibles al menos dos herramientas que se alternen en los cambios de filo. En un segundo paso, y una vez todas las operaciones que requieren más de un cambio de filo tienen asignadas dos herramientas, si aún quedan herramientas por asignar, éstas se irán asignando a las operaciones que tienen frecuencias de cambio mayores. De esta forma, se asignan más alternativas de herramientas a las operaciones, que se podrían utilizar en caso de incidencias relacionadas con el recurso herramienta. Teniendo en mente estos dos pasos, los criterios utilizados para la selección de la solución de la interferencia, que se aplican de forma secuencial, son los siguientes (5):

- Valor mínimo de  $B_{sol}$ . Se seleccionarán las soluciones que presentan el valor mínimo del índice  $B_{sol}$ , ya que en estas soluciones existen operaciones con una frecuencia de cambio de filos elevada.
- Soluciones con mínimos transportes. De entre las soluciones que presentan el valor mínimo del índice  $B_{sol}$  se seleccionan las que requieren menos transportes. Por ejemplo, si se tienen dos soluciones con  $B_{sol}=3.5$ , y la primera requiere 2 transportes y la segunda 3, se seleccionará la primera para resolver la interferencia.
- Evaluación del índice  $B_{ope}$  en las posibles soluciones. El valor del índice  $B_{sol}$  puede ser el mismo en diferentes soluciones y, además, dichas soluciones pueden requerir el mismo número de transportes. Esto se debe a que el índice  $B_{sol}$  se calcula en base a los valores mínimos de  $B_{ope}$  de las operaciones que forman cada solución, y una misma operación puede estar contenida en varias soluciones. Para discernir qué solución resolverá la interferencia, entre las soluciones que tienen el mismo valor de  $B_{sol}$  se considerará el índice  $B_{ope}$  en las operaciones que forman cada posible solución, seleccionando la solución que presente valores menores del índice  $B_{ope}$ .

La Fig 4-34 muestra el ejemplo utilizado para la evaluación del índice  $B_{sol}$  en las diferentes soluciones. Cada operación tiene al menos una alternativa de herramienta asignada. Si la herramienta 3 se ubica al inicio del horizonte en la máquina 1, y se considera que no se utiliza esta herramienta en el horizonte posterior, las soluciones Op1-Op10 y Op7-Op10 presentan la misma valoración del índice  $B_{sol}$  y requieren de un transporte cada una. Por ello, la solución seleccionada para resolver la interferencia será la que presente en alguna de sus operaciones un valor de  $B_{ope}$  menor. De las dos posibles soluciones, se seleccionará la Op1-Op10, ya que la valoración del índice  $B_{ope}$  en la Op1 es 40, mientras que en la Op7 es de 50.

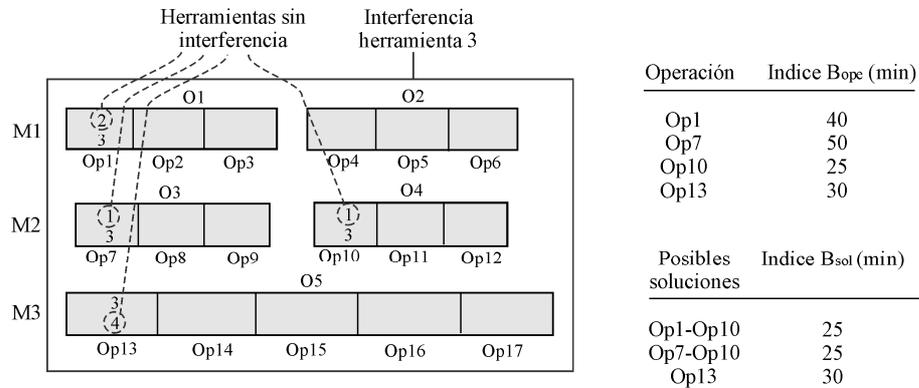


Fig 4-34. Selección de la herramienta en función del índice B<sub>sol</sub>.

## 4.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN.

En este punto se va a desarrollar un ejemplo completo de programación de herramientas o resolución de interferencias, aplicando la metodología propuesta. En este ejemplo se han considerado tres fresadoras de características similares. Se ha partido de la programación de los trabajos en las máquinas, que se muestra mediante el diagrama de Gantt de la Fig 4-35. Esta figura también muestra el horizonte de trabajo para el que se resolverán las interferencias.

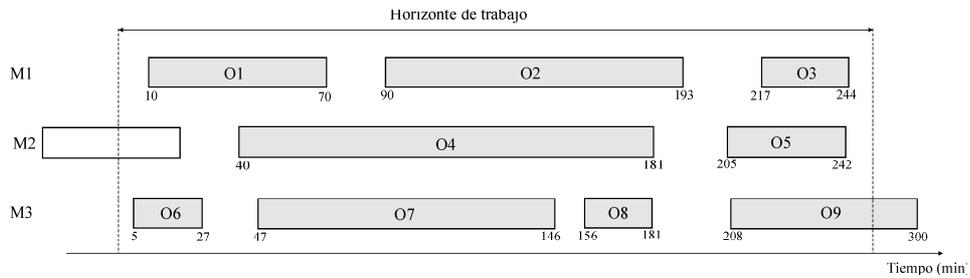


Fig 4-35. Ejemplo propuesto para la resolución de interferencias.

En relación a las herramientas que se van a utilizar en el horizonte, sólo se han considerado herramientas para planear y ranurar, portapinzas, portabrocas y brocas de plaquitas. Estas herramientas se muestran en las siguientes tablas. La Tabla 4-11 muestra las herramientas de planear y ranurar, la Tabla 4-12 los portapinzas, la Tabla 4-13 los portabrocas y la Tabla 4-14 las brocas de plaquitas.

Herramienta	Diámetro	Ángulo posición	Dientes
1	100	90	7
3	80	90	6
4	80	75	6
5	80	45	6
8	63	90	4
9	63	75	4
10	63	45	4
13	50	90	4
15	45	90	4
16	40	90	4
22	20	90	3
24	16	90	2

Tabla 4-11. Herramientas para planear y ranurar.

Herramienta	Rango pinzas
50	1-10
51	1-10
52	1-10
53	1-10
54	2-20
55	2-20
56	2-20
57	2-20
58	6-34
59	6-34
60	6-34

Tabla 4-12. Descripción de los portapinzas.

Herramienta	Rango pinzas
61	1-13
62	1-13
63	1-13
64	1-13
65	1-13

Tabla 4-13. Descripción de los portabrocas.

Herramienta	Diámetro
35	20
36	22
37	25
42	30
45	35

Tabla 4-14. Descripción de las brocas de plaquitas.

Para cada una de las piezas a mecanizar, se ha realizado un plan de proceso. En este plan se detallan las diferentes operaciones de mecanizado, junto con las alternativas de herramientas propuestas en cada operación. La Tabla 4-15 muestra las diferentes operaciones de mecanizado a realizar en cada una de las órdenes, con los tiempos de mecanizado para el lote, las alternativas de herramientas en cada operación y su coste unitario. Atendiendo a la duración del mecanizado y al tiempo de vida de la herramienta, las operaciones 7, 14, 16, 29 y 38 requieren de un cambio de filo para el mecanizado del lote, mientras que el resto de operaciones no requieren ningún cambio.

Orden	Op	Tiempo mecanizado (min)	Alternativas herramientas	Coste unitario (euros)
O1	Op 1	6.21	3,4,5,8,9,10	0.44-0.44-0.42-0.50-0.50-0.47
	Op 2	10.8	1,3,4,5	0.60-0.65-0.65-0.63
	Op 3	1.35	61,62,63,64,65	0.18
	Op 4	10.8	50,51,52,53,54,55,56,57	0.22
	Op 5	13.17	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.35
	Op 6	2.16	42	0.26
O2	Op 7	70	1,3,4,5,8,9,10	0.40-0.44-0.44-0.42-0.50-0.50-0.49
	Op 8	6	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.26
	Op 9	1.2	61,62,63,64,65	0.18
O3	Op 10	5.04	3,4,5,8,9,10	0.69-0.69-0.63-0.79-0.78-0.76
	Op 11	8.75	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.32
	Op 12	1.4	61,62,63,64,65	0.24
	Op 13	4.2	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.63

Programación de herramientas.

Orden	Op	Tiempo mecanizado (min)	Alternativas herramientas	Coste unitario (euros)
O4	Op 14	52	1,3,4,5,8,9,10	1.16-1.23-1.23-1.20-1.29-1.28-1.26
	Op 15	6.12	3,8,13	0.71-0.73-0.80
	Op 16	65	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.44
	Op 17	1	61,62,63,64,65	0.24
	Op 18	0.8	36	0.24
	Op19	1	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	1
O5	Op 20	4.37	3,4,5,8,9,10	0.89-0.88-0.85-0.97-0.96-0.94
	Op 21	1.27	22,24	0.41-0.39
	Op 22	10.25	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.35
	Op 23	9.4	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.31
	Op 24	1.5	61,62,63,64,65	0.2
O6	Op 25	5.77	1,3,4,5,8,9,10	0.30-0.36-0.36-0.33-0.38-0.38-0.34
	Op 26	1.05	8,13,15	0.60-0.63-0.66
	Op 27	6.45	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	0.31
	Op 28	2.79	37	0.30
O7	Op 29	62.1	1,3,4,5,8,9,10	0.38-0.47-0.46-0.44-0.51-0.50-0.48
	Op 30	3.12	3,8,13	0.43-0.48-0.51
	Op 31	0.45	61,62,63,64,65	0.24
	Op 32	0.9	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60	1
	Op 33	1.2	35	0.38
	Op 34	3.15	54,55,56,57,58,59,60	1
O8	Op 35	9.81	3,4,5,8,9,10	0.73-0.71-0.70-0.81-0.81-0.79
	Op 36	4.84	45	0.6
	Op 37	3.6	42	0.3
O9	Op 38	50	1,3,4,5	1.02-1.15-1.13-1.12
	Op 39	5.33	1,3,8	0.66-0.68-0.71
	Op 40	1.47	13,15,16	0.55-0.53-0.52
	Op 41	3.42	54,55,56,57,58,59,60	0.44
	Op 42	1.26	61,62,63,64,65	0.20
	Op 43	1.8	61,62,63,64,65	0.24

*Tabla 4-15. Operaciones y alternativas de herramientas.*

Las alternativas de herramientas propuestas en cada una de las operaciones se muestran en la Fig 4-36. En función de las alternativas de herramientas, de la programación de las órdenes y del horizonte, es posible identificar las herramientas con interferencias en el horizonte de trabajo. Cada una de estas interferencias está formada por interferencias básicas entre máquinas e interferencias dentro de una orden.

Las interferencias dentro de una orden se deben al uso simultáneo de portapinzas, portabrocas o platos en operaciones pertenecientes a la misma orden, pero con diferentes elementos cortantes. Estas interferencias se han mostrado marcando las alternativas de herramientas en las operaciones en negrita. Las interferencias dentro de una orden implican la necesidad de más alternativas de herramientas para resolver las interferencias en el horizonte de trabajo, ya que no sólo hay que repartir las alternativas entre las máquinas, sino también entre las operaciones que presentan una interferencia de este tipo (interferencia dentro de una orden).

En el ejemplo propuesto aparece una operación ficticia (Op21'), para representar la utilización del portapinzas como adaptador intermedio en la operación 21. Los portapinzas se utilizan en todas las operaciones del horizonte como primer adaptador, excepto en la operación 21, que se utiliza como adaptador intermedio. Por ello, y para resolver la interferencia del portapinzas en el horizonte de forma global, se ha generado la Op21'.

Dado que las interferencias se resuelven sólo en un horizonte, se deben enlazar los diferentes horizontes temporales en los que se van a resolver las interferencias. En relación al horizonte anterior, la máquina 2 está finalizando la ejecución de una orden. Por ello, las herramientas que se están utilizando en esta orden no pueden considerarse como alternativas en las órdenes de las otras máquinas que solapan con la ejecución de dicha orden. Por este motivo, se eliminarán como alternativas en las órdenes O1 y O6 las herramientas 3, 50, 54 y 62 (en la figura aparecen las alternativas tachadas). La Tabla 4-16 muestra la ubicación de las herramientas que presentan interferencias, al inicio del horizonte.

Ubicación	Herramientas
M1	1, 5, 10, 13, 52, 56, 60
M2	3, 4, 50, 54, 62
M3	8, 9, 51, 55, 59
Almacén	53, 57, 58, 61, 63, 64, 65

Tabla 4-16. Ubicación de las herramientas al inicio del horizonte.

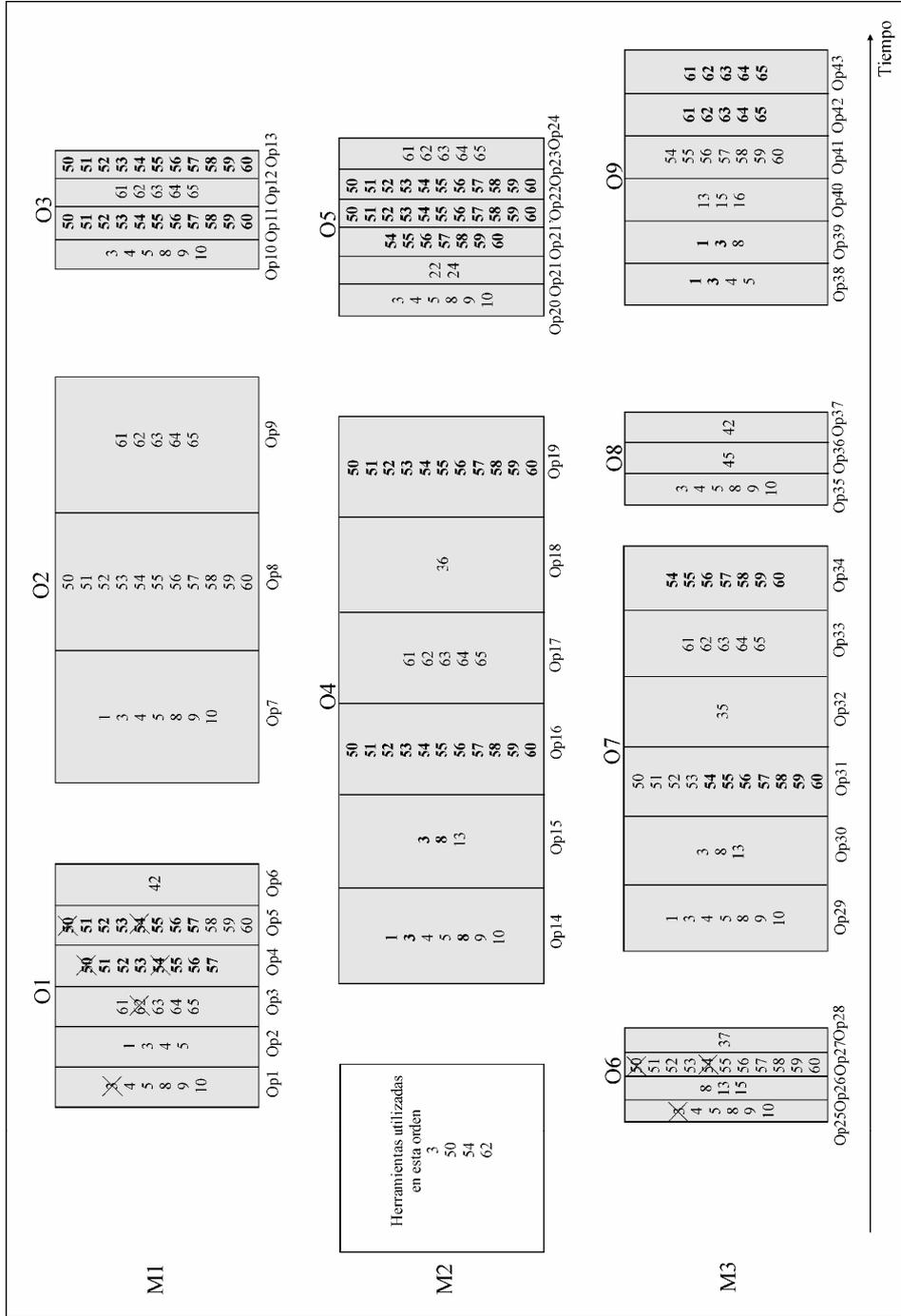


Fig 4-36. Alternativas de herramientas en las operaciones.

CAPITULO 4

En relación al siguiente horizonte, se ha considerado que todas las herramientas tienen interferencias, y que son requeridas por las tres máquinas simultáneamente.

Tras la detección de interferencias, se observa que todas las herramientas presentan interferencias en el horizonte de trabajo excepto las herramientas 15, 16, 35, 36, 37, 42 y 45. Una vez detectadas las interferencias se procede a su evaluación. Esta evaluación se realiza en cada iteración para decidir la interferencia más crítica y proceder a su resolución. La Tabla 4-17 y la Tabla 4-18 muestran la evaluación de los índices y la generación de la función de caracterización (F) en la primera iteración del problema. Los pesos dados para los distintos índices han sido los siguientes: 0.3 para  $I_{\text{paralelo}}$  e  $I_{\text{mínimo}}$ ; 0.15 para  $I_{\text{medio}}$  e  $I_{\text{serie}}$ ; 0.05 para  $I_{\text{coste}}$  e  $I_{\text{tiempo}}$ . En base a estos datos, la interferencia 8 es la más crítica, por lo que se resolverá primero.

Herramienta	MRH (máquinas)	NMIAH (alt.mínimas)	NMAH (alt.medias)	NPHM (peticiones)	CU (coste)	TM (tiempo)
1	3	3	5.33	2	0.3	70
3	3	3	5.2	3	0.36	70
4	3	4	5.6	4	0.36	70
5	3	4	5.6	4	0.33	70
8	3	3	5.08	6	0.38	70
9	3	5	6.12	3	0.38	70
10	3	5	6.12	3	0.34	70
13	2	3	3	2	0.51	6.12
50	3	11	11	2	0.22	65
51	3	9	10.18	3	0.22	65
52	3	9	10.18	3	0.22	65
53	3	9	10.18	3	0.22	65
54	3	7	9.54	2	0.22	65
55	3	7	9.21	3	0.22	65
56	3	7	9.21	3	0.22	65
57	3	7	9.21	3	0.22	65
58	3	7	9.46	3	0.26	65
59	3	7	9.46	3	0.26	65
60	3	7	9.46	3	0.26	65
61	3	4	4.87	3	0.18	1.8
62	3	5	5	2	0.18	1.8
63	3	4	4.87	3	0.18	1.8
64	3	4	4.87	3	0.18	1.8
65	3	4	4.87	3	0.18	1.8

Tabla 4-17. Evaluación individual de las interferencias.

Herramienta	I <sub>paralelo</sub>	I <sub>mínimo</sub>	I <sub>medio</sub>	I <sub>serie</sub>	I <sub>coste</sub>	I <sub>tiempo</sub>	Función (F)
1	1	1	0.563	0.33	0.6	1	0.814
3	1	1	0.577	0,5	0.581	1	0.836
4	1	0.75	0.536	0.67	0.545	1	0.780
5	1	0.75	0.536	0.67	0.5	1	0.782
8	1	1	0.591	1	0.563	1	0.912
9	1	0.6	0.49	0.5	0.545	1	0.702
10	1	0.6	0,49	0.5	0.5	1	0.705
13	0.667	1	1	0.33	0.545	0.087	0.722
50	1	0.273	0.273	0.33	0.818	0.929	0.560
51	1	0.333	0.295	0.5	0.818	0.929	0.606
52	1	0.333	0.295	0.5	0.818	0.929	0.606
53	1	0.333	0.295	0.5	0.818	0.929	0.606
54	1	0.429	0.314	0.33	0.818	0.929	0.613
55	1	0.429	0.326	0.5	0.818	0.929	0.639
56	1	0.429	0.326	0.5	0.818	0.929	0.639
57	1	0.429	0.326	0.5	0.818	0.929	0.639
58	1	0.429	0.317	0.5	0.692	0.929	0.632
59	1	0.429	0.317	0.5	0.692	0.929	0.632
60	1	0.429	0.317	0.5	0.692	0.929	0.632
61	1	0.75	0.616	0.5	1	0.026	0.743
62	1	0.6	0.6	0.33	1	0.026	0.671
63	1	0.75	0.616	0.5	1	0.026	0.743
64	1	0.75	0.616	0.5	1	0.026	0.743
65	1	0.75	0.616	0.5	1	0.026	0.743

Tabla 4-18. Comparación entre interferencias y función de caracterización.

Como se ha comentado, y a la vista de los resultados obtenidos, en primer lugar se resolverá la interferencia generada por la herramienta 8. De entre las posibles soluciones para resolver la interferencia se escoge la formada por las operaciones Op25-Op26-Op29-Op30-Op35-Op39, ya que esta solución asigna la herramienta a más operaciones que aún no tienen una primera alternativa de herramienta que el resto de soluciones. Una vez seleccionada la solución que resuelve la interferencia, la herramienta 8 se elimina como alternativa en el resto de operaciones del horizonte.

Siguiendo este procedimiento iterativo, las interferencias de herramientas se resuelven en el siguiente orden: 8, 3, 1, 13, 5, 4, 10, 9, 58, 60, 59, 63, 61, 64, 65, 62, 56, 57, 55, 58, 59, 60, 54, 51, 53, 52 y 50. La Fig 4-37 muestra la solución final del problema propuesto.

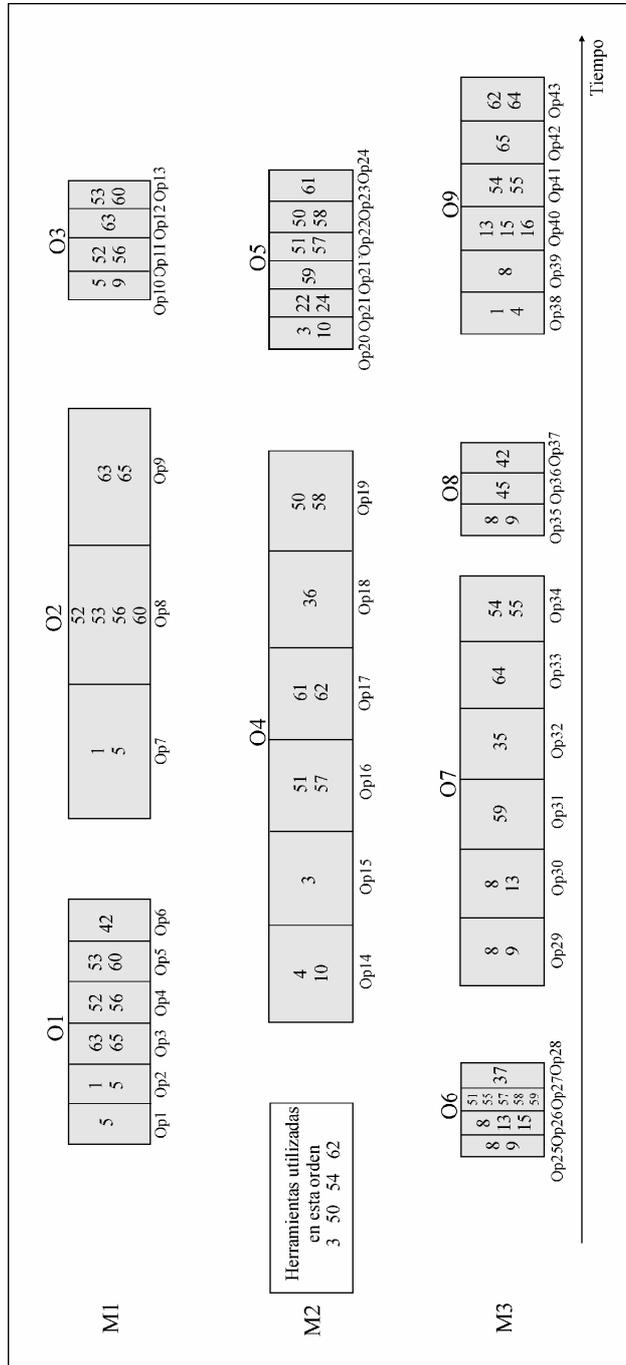


Fig 4-37. Solución final.

Las operaciones que requieren un cambio de filo para el mecanizado del lote (operaciones 7, 14, 16, 29 y 38), tienen asignadas al menos dos alternativas de herramientas. Al partir de alternativas de herramientas no sobradas de herramientas, es decir, las alternativas se acercaban al recurso justo, algunas operaciones se han quedado con una única alternativa de herramienta (operaciones 1, 12, 15, 21, 24, 31, 33, 39 y 42). En caso de escasez de recurso, es decir, si alguna operación se hubiera quedado sin ninguna herramienta, hubiera sido necesario modificar la programación de las órdenes.

### **4.3. VERIFICACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA PROPUESTA REALIZADA DE RESOLUCION DE INTERFERENCIAS.**

La propuesta de programación de herramientas o resolución de interferencias de la tesis, está basada en un método iterativo de resolución de las interferencias, que plantea resolver las interferencias una a una. Dado que la planificación de procesos ha propuesto todas las posibles alternativas de herramientas en cada operación, el problema de interferencias es grande, por la gran cantidad de interferencias de diferente tamaño y características que pueden aparecer en el horizonte.

El factor más crítico para garantizar que la propuesta realizada para la resolución de interferencias es viable, es el tiempo de resolución de las interferencias. Dado que la resolución de interferencias se lleva a cabo tras la programación de la producción, antes de lanzar las órdenes de fabricación a las máquinas, los tiempos de resolución del problema de interferencias deben ser pequeños. Por ello, se ha realizado un estudio que evalúa dichos tiempos de resolución, de forma que se garantice que se puede dar una respuesta en tiempo real al problema de resolución de interferencias.

La evaluación de los tiempos de resolución de las interferencias se ha llevado a cabo utilizando una herramienta de programación imperativa. En concreto, se ha utilizado el compilador Visual C++ 6.0. Con esta herramienta se ha implementado la metodología y los algoritmos básicos expuestos en este capítulo, para la propuesta funcional realizada para la función de resolución de interferencias.

Dado que sólo se pretende verificar la viabilidad de la propuesta de resolución de interferencias, la información que proviene de la planificación de procesos, relativa a las alternativas de herramientas en las operaciones, así como la programación de las órdenes en las diferentes máquinas, se ha considerado como datos de partida para la aplicación desarrollada. Estos

datos se han elaborado mediante el desarrollo de un generador aleatorio de experimentos, que permite crear problemas de interferencias de forma automática. En cada experimento se varía el número de interferencias, así como su tamaño y características. El objetivo de cada uno de los experimentos es determinar el tiempo de resolución de todas las interferencias generadas.

En la generación de experimentos, se han considerado como principales factores que afectan al tiempo de resolución de las interferencias, los siguientes:

- Número de máquinas. Conforme este factor aumenta el problema se hace más complejo, ya que en cada interferencia pueden intervenir un número mayor de máquinas, siendo los conflictos por el uso simultáneo de las herramientas más importantes.
- Número de órdenes por máquina. El aumento de este factor hace que las posibles soluciones de cada interferencia aumenten, lo que implica chequear más posibles soluciones en cada iteración. Esto es debido a que existen más combinaciones posibles entre las órdenes de las diferentes máquinas.
- Número de operaciones por orden. Este factor afecta al número de interferencias que pueden existir en el horizonte de trabajo. El aumento de este factor hace que haya más posibilidades de encontrar interferencias entre máquinas, e incluso dentro de una misma orden.
- Tipos de operaciones. Este factor contempla los diferentes tipos de operaciones que se pueden presentar en el horizonte de trabajo. Por ejemplo, un tipo de operación puede ser el planeado. Cada tipo de operación requiere un tipo de herramienta, aunque hay herramientas que pueden realizar diferentes tipos de operación. Por ejemplo, una fresa se puede utilizar para realizar un ranurado, una cajera, o un contorneado, por lo que la misma herramienta aparecerá como alternativa en estos tipos de operaciones. Si se utilizan muchos tipos de operaciones en el horizonte, al requerir cada uno un determinado tipo de herramienta, las interferencias son más sencillas. En cambio, si hay pocos tipos de operaciones, las interferencias que se ocasionan son más importantes, ya que son más frecuentes las operaciones que demandan los mismos tipos de herramientas.
- Número de alternativas de herramientas por operación. Este factor afecta al número de interferencias a resolver. Cuanto mayor sea el valor de este factor, más interferencias se tendrán que resolver. Sin embargo, cuantas más alternativas existen, más sencillo es garantizar la solución al problema de interferencias.

Los experimentos se han generado con distintos valores de estos cinco factores. Se considerarán dos niveles de variación en cada uno de los factores. Un primer nivel, donde los factores tomarán valores pequeños (nivel 1), y un segundo nivel, donde se considerarán valores superiores (nivel 2).

En cada nivel, los factores no tomarán siempre un valor constante, sino que en algunos casos se considerarán valores aleatorios, dentro de un rango (Tabla 4-19). Los factores que representan al número de máquinas y a los tipos de operaciones sí que toman un valor fijo en cada uno de los niveles, no sucediendo lo mismo con el resto de factores. Al número de órdenes por máquina y el de operaciones por orden se les permite una variación dentro de un rango, ya que todas las máquinas no tienen las mismas órdenes en el horizonte de trabajo, como tampoco todas las órdenes tienen el mismo número de operaciones.

Factor	Nivel 1	Nivel 2
Número de máquinas (F1)	5	8
Número de órdenes por máquina (F2)	[4,6]	[9,11]
Número de operaciones por orden (F3)	[2,4]	[5,7]
Tipos de operaciones (F4)	10	20
Número de alternativas de herramientas por operación (F5)	[0.8,1.2] x número máquinas	[1.8,2.2] x número máquinas

Tabla 4-19. Variación de factores experimentales.

En relación al número de alternativas de herramientas por operación, este factor se determina en función del número de máquinas. Para garantizar que los experimentos generados tendrán solución, las alternativas de herramientas deben ser del mismo orden o superior que el número de máquinas. Si las alternativas de herramientas en las operaciones son claramente inferiores al número de máquinas, en cuanto aparezcan interferencias que impliquen a todas o casi todas las máquinas, e interferencias dentro de una orden, el problema de resolución de interferencias no tiene solución. Esto es debido a que en varias iteraciones el algoritmo detecta que hay operaciones a las que es imposible asignar ninguna herramienta, por escasez del recurso. Al generarse las alternativas aleatoriamente, se observa que en el nivel 1, existen casos en los que no es posible resolver el problema de interferencias por escasez de alternativas. En el nivel 2, este problema desaparece, ya que suelen existir suficientes alternativas por operación para resolver las interferencias.

Cada tipo de operación debe disponer de un conjunto de herramientas adecuadas. Estos conjuntos no son disjuntos, sino que en los experimentos se ha supuesto que determinadas operaciones pueden compartir un 20% de herramientas, dado que algunas herramientas pueden ser adecuadas para el mecanizado de varios tipos de operaciones.

El número de herramientas de cada tipo se determina en función del número de máquinas y del número de alternativas de herramientas en cada operación, de forma que existan alternativas sobradas para la generación de los experimentos. Por ejemplo, en el caso de cinco máquinas, y con un factor de alternativas de herramientas en cada operación entre 1.9 y 2.1 veces el número máquinas, se pueden requerir hasta 13 alternativas de herramientas de cada tipo en cada operación. Para que las alternativas de herramientas no sean las mismas en todas las operaciones, se ha decidido mayorar el número de herramientas del sistema para cada tipo en un 30%. Por ello, en el ejemplo comentado, se considerarán 17 herramientas de cada tipo. Las alternativas de herramientas en cada operación se seleccionarán de forma aleatoria de entre las que pertenecen a cada grupo.

Además de considerar los cinco factores anteriores, es necesario definir otras variables que se utilizarán en la generación de los experimentos. Estas variables son el tiempo de mecanizado de cada operación, el intervalo de tiempo entre la ejecución de dos órdenes consecutivas en la misma máquina, la frecuencia de cambio de los filos, el número de piezas de cada lote y el coste unitario de las herramientas en cada operación. Estas variables toman valores aleatorios para que exista variabilidad en la duración de las diferentes órdenes, en el coste asociado a cada operación y en la necesidad de herramientas que tienen las operaciones. Los valores de estas variables se muestran en la Tabla 4-20.

Variable	Nivel 1
Tiempo de mecanizado de la operación (min)	[0.3,1.5]
Intervalo de tiempo entre órdenes (min)	[5,60]
Frecuencia de cambio de los filos (min)	[15,60]
Piezas del lote	[10,40]
Coste unitario de la herramienta (euros)	[0.2,2]

*Tabla 4-20. Variables utilizadas en la generación de experimentos.*

La duración de cada orden se determinará en función del número de operaciones que forman parte de ella, del tiempo de mecanizado de cada operación, y del número de piezas del lote, mayorando este tiempo en un

porcentaje para contemplar las tareas de cambios de piezas, de herramientas, etc.

Los costes unitarios de las herramientas para una operación deben ser similares. El planificador de procesos ha seleccionado las herramientas en cada operación utilizando una misma tecnología y con unos criterios de productividad y economía. Como ya se ha justificado, las alternativas seleccionadas presentan el mismo tiempo de mecanizado para la operación y costes similares, siendo intercambiables en el mecanizado de la operación. Una vez conocido el tipo de operación, se asignará un coste unitario perteneciente al intervalo de la Tabla 4-20, y cada una de las herramientas asignadas a la operación tomará un valor que varía entre el 90% y el 110% del valor de dicho coste unitario. De esta forma, las herramientas pertenecientes a la misma operación presentan costes similares, pero no iguales.

Las herramientas se han situado de forma aleatoria en las máquinas y en los almacenes al inicio del horizonte de trabajo. Los tiempos de transporte de las herramientas entre cada una de las máquinas y entre las máquinas y almacenes se han fijado a un valor constante de 3 minutos.

Los experimentos realizados se han generado combinando los valores de los cinco factores en ambos niveles. Dado que se han considerado cinco factores y dos posibles niveles de variación en cada uno, se han generado  $2^5$  combinaciones o experimentos para determinar sus tiempos de resolución. En cada uno de estos experimentos se han generado cinco problemas diferentes. De esta forma se tienen varios datos de los tiempos de resolución en cada una de los experimentos, pudiendo obtener un valor medio de dichos tiempos.

La Tabla 4-21 muestra los resultados obtenidos para los dieciséis experimentos realizados con cinco máquinas y la Tabla 4-22 es similar, pero con ocho máquinas. En cada uno de los problemas generados se muestra el número medio de interferencias resueltas y los tiempos medios de resolución empleados. Con los resultados obtenidos en cuanto a tiempos de resolución, se puede decir que la función de resolución de interferencias permite garantizar el funcionamiento de la propuesta, ya que todos los problemas planteados han sido resueltos en menos de 1 minuto.

CAPITULO 4

Número de máquinas (F1): 5						
Exp.	Órdenes F2	Operaciones F3	Tipos operaciones F4	Alternativas herramientas F5	Número medio interferencias resueltas	Tiempo resolución medio (s)
1	[4,6]	[2,4]	10	[0.8,1.2] x n_maq	118	1.07
2	[4,6]	[2,4]	10	[1.8,2.2] x n_maq	222	2.08
3	[4,6]	[2,4]	20	[0.8,1.2] x n_maq	183	1.34
4	[4,6]	[2,4]	20	[1.8,2.2] x n_maq	356	2.89
5	[4,6]	[5,7]	10	[0.8,1.2] x n_maq	192	2.61
6	[4,6]	[5,7]	10	[1.8,2.2] x n_maq	377	4.35
7	[4,6]	[5,7]	20	[0.8,1.2] x n_maq	348	2.76
8	[4,6]	[5,7]	20	[1.8,2.2] x n_maq	515	5.62
9	[9,11]	[2,4]	10	[0.8,1.2] x n_maq	224	3.06
10	[9,11]	[2,4]	10	[1.8,2.2] x n_maq	412	6.45
11	[9,11]	[2,4]	20	[0.8,1.2] x n_maq	328	3.51
12	[9,11]	[2,4]	20	[1.8,2.2] x n_maq	617	9.05
13	[9,11]	[5,7]	10	[0.8,1.2] x n_maq	333	6.46
14	[9,11]	[5,7]	10	[1.8,2.2] x n_maq	641	14.81
15	[9,11]	[5,7]	20	[0.8,1.2] x n_maq	359	6.08
16	[9,11]	[5,7]	20	[1.8,2.2] x n_maq	754	15.63

Tabla 4-21. Experimentos con cinco máquinas.

Número de máquinas (F1): 8						
Exp.	Órdenes F2	Operaciones F3	Tipos operaciones F4	Alternativas herramientas F5	Número medio interferencias resueltas	Tiempo resolución medio (s)
1	[4,6]	[2,4]	10	[0.8,1.2] x n_maq	118	2.72
2	[4,6]	[2,4]	10	[1.8,2.2] x n_maq	222	6.48
3	[4,6]	[2,4]	20	[0.8,1.2] x n_maq	183	3.78
4	[4,6]	[2,4]	20	[1.8,2.2] x n_maq	356	6.48
5	[4,6]	[5,7]	10	[0.8,1.2] x n_maq	192	6.07
6	[4,6]	[5,7]	10	[1.8,2.2] x n_maq	377	11.92
7	[4,6]	[5,7]	20	[0.8,1.2] x n_maq	348	7.35
8	[4,6]	[5,7]	20	[1.8,2.2] x n_maq	515	12.96
9	[9,11]	[2,4]	10	[0.8,1.2] x n_maq	224	7.87
10	[9,11]	[2,4]	10	[1.8,2.2] x n_maq	412	20.81
11	[9,11]	[2,4]	20	[0.8,1.2] x n_maq	328	8.10
12	[9,11]	[2,4]	20	[1.8,2.2] x n_maq	617	23.61
13	[9,11]	[5,7]	10	[0.8,1.2] x n_maq	333	17.22
14	[9,11]	[5,7]	10	[1.8,2.2] x n_maq	641	44.66
15	[9,11]	[5,7]	20	[0.8,1.2] x n_maq	359	16.35
16	[9,11]	[5,7]	20	[1.8,2.2] x n_maq	754	40.46

Tabla 4-22. Experimentos con ocho máquinas.

#### **4.4. RESUMEN DE LA PROPUESTA.**

En este capítulo se aborda la programación de las herramientas, tras la programación de los trabajos en las máquinas. Esta función se corresponde con la incluida en la propuesta funcional, que se denomina resolución de interferencias. Esta función es la más importante y la que sustenta la metodología propuesta para el gestor de herramientas de mecanizado.

En este capítulo se ha mostrado la propuesta de resolución de interferencias, así como la verificación de la viabilidad de la propuesta planteada. Como resumen de la propuesta se pueden establecer los siguientes puntos:

- La programación de herramientas propuesta aborda el problema de forma global, ya que parte de todas las alternativas de herramientas en las operaciones, lo que permite asignar las herramientas a las operaciones analizando el problema en conjunto.
- La programación de las herramientas se ha realizado teniendo como objetivo minimizar los transportes de herramientas entre las máquinas, lo que favorece la estabilidad de las herramientas en las máquinas. La propuesta de resolución de interferencias no se limita a asignar una herramienta a cada operación, para garantizar que exista una solución del problema, sino que asigna más herramientas a las operaciones que tienen una frecuencia de cambio mayor, lo que permite disminuir los tiempos no productivos.
- La sistemática propuesta en la resolución de las interferencias o programación de herramientas es novedosa, y permite abordar el problema de forma sencilla y metódica. La metodología propuesta para la resolución de las interferencias es independiente del recurso, por lo que puede ser aplicada a otros recursos, como los utillajes, etc.
- La generación de las posibles soluciones de la interferencia es un problema combinatorio entre las operaciones que requieren la herramienta en el horizonte de trabajo. Este problema se ha resuelto mediante el desarrollo de un algoritmo, que genera conjuntos de operaciones en los que puede permanecer la herramienta sin causar interferencias, limitando el número máximo de transportes de la herramienta entre máquinas. De esta forma, los tiempos computacionales obtenidos son aceptables.
- Los experimentos realizados han permitido verificar la viabilidad de la propuesta de resolución de interferencias y, por lo tanto, de la propuesta global, ya que se han obtenido tiempos de resolución pequeños en problemas de tamaño medio.



---

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.**

### **5.1. CONCLUSIONES.**

En los diferentes capítulos de la tesis, se han comentado las propuestas y aportaciones realizadas, así como los resultados obtenidos. De forma general, en este punto, se expondrán las conclusiones más importantes.

La gestión de las herramientas de mecanizado no se ha considerado un problema objeto de estudio hasta las últimas décadas, tras constatar que las herramientas pueden limitar la capacidad de procesar piezas en los sistemas productivos. Aunque el recurso herramienta debe ser considerado en las diferentes etapas del ciclo productivo, desde el diseño, hasta la propia fabricación de los productos, el planteamiento y ámbito de la tesis se ha ceñido al nivel más operativo de las herramientas en el taller, por lo que únicamente aborda la programación y la gestión de las herramientas en este nivel.

La programación y la gestión de las herramientas están referidas a un recurso productivo, por lo que no se pueden realizar aisladamente, sino que deben integrarse con las actividades relacionadas con la fabricación. La tesis

ha propuesto la integración de la gestión de herramientas con la planificación de procesos y la programación de la producción.

El objetivo principal de la tesis ha consistido en el desarrollo de una propuesta para la programación y gestión de las herramientas, integrada con la planificación de procesos y la programación de la producción. En esta propuesta se opta por una programación no simultánea de los trabajos y las herramientas en las máquinas. Para ello, se parte de la programación de los trabajos en las máquinas, realizada sin considerar el recurso herramienta, y de las alternativas de herramientas proporcionadas por el planificador de procesos asistido por computador en cada una de las operaciones de mecanizado. La programación de las herramientas en las máquinas, para cumplir con la programación de los trabajos, implica resolver las interferencias o incompatibilidades que surgen por el uso simultáneo de las alternativas propuestas por el planificador de procesos con la programación de los trabajos.

Como conclusiones más destacadas de la tesis doctoral desarrollada, se pueden establecer las siguientes:

- La propuesta realizada en la tesis permite la integración de la planificación de procesos, la programación de la producción y el gestor de herramientas, manteniendo la funcionalidad de cada una de ellas. Para ello, el planificador de procesos asistido por computador selecciona alternativas de herramientas para cada operación, junto con sus condiciones de corte. Estas alternativas se seleccionan considerando la tecnología más adecuada y teniendo en cuenta criterios de productividad y económicos, de manera que las alternativas tengan un tiempo de mecanizado constante en la operación. Con estas premisas, las herramientas son intercambiables entre sí en una misma operación, lo que proporciona flexibilidad en el proceso de asignación de las herramientas concretas a las operaciones. Como la programación de los trabajos se ha realizado con anterioridad, las alternativas de herramientas permiten resolver las incompatibilidades que surgen por el uso simultáneo de las herramientas en las operaciones, teniendo una visión global del problema, y permitiendo independizar la programación de los trabajos del recurso herramienta. De esta forma, los problemas se resuelven de manera jerárquica, lo que facilita su resolución, al disminuir la magnitud de los problemas a resolver.
- La propuesta funcional para el gestor de herramientas contempla tanto la programación de las herramientas como su gestión en el sistema productivo. La programación de utilización de las

herramientas en las máquinas se realiza resolviendo las incompatibilidades o interferencias de las herramientas con la programación de la producción. En relación a su gestión, en la propuesta funcional se han contemplado las funciones necesarias para conseguir que las herramientas se encuentren en las máquinas requeridas en los instantes de tiempo necesarios. Estas funciones hacen referencia a la programación y ejecución de las tareas del nivel más operativo relacionadas con las herramientas, como son la preparación de los montajes, los transportes requeridos, la gestión de los cambios de filo por desgaste, etc.

- La tesis propone la programación de las herramientas supeditada al recurso crítico, que son las máquinas. La consecución de una programación detallada para las herramientas se inicia con la resolución de las incompatibilidades o interferencias de las herramientas para adaptarse a la programación de la producción. Esta resolución tiene como objetivos principales minimizar los transportes de herramientas, de forma que se fomente la estabilidad de las herramientas en las máquinas, al mismo tiempo que se garantiza una solución al problema de resolución de interferencias y se realiza un reparto de las herramientas entre las diferentes operaciones. Estas incompatibilidades o interferencias se han resuelto considerando el problema de forma global y utilizando algoritmos que permiten abordar problemas complejos de interferencias en tiempos reducidos.
- La existencia de alternativas de herramientas en las operaciones facilita la gestión de las herramientas. Aunque las alternativas de herramientas permiten resolver las interferencias, asignando al menos una herramienta a cada una de las operaciones, también flexibilizan la propia gestión de herramientas. Estas alternativas pueden ser utilizadas por el gestor de herramientas para gestionar los cambios de las herramientas por desgaste de sus filos. Además, las alternativas permiten al gestor una cierta independencia con respecto a las incidencias ocurridas durante la producción, proporcionando opciones que permiten continuar con el mecanizado, cuando alguna herramienta no está disponible. De esta forma, no suele ser necesario realizar una nueva programación de los trabajos por las incidencias relacionadas con el recurso herramienta.

## **5.2. TRABAJOS FUTUROS.**

Esta tesis ha planteado la propuesta funcional para un gestor de herramientas de mecanizado integrado con la planificación de procesos y la

programación de la producción. Se ha desarrollado su parte fundamental, la resolución de interferencias o incompatibilidades de las alternativas de herramientas en las operaciones con la programación de la producción. Sin embargo, aún quedan varios puntos que pueden ser desarrollados, continuando con el trabajo empezado en esta tesis. Estos puntos son los siguientes:

- En la propuesta funcional del gestor de herramientas se han propuesto cinco funciones (Fig 5-1). Aunque se ha desarrollado la función de Resolución de Interferencias (A42), se debe completar el desarrollo del resto de funciones. De estas funciones las más importantes son la de Gestionar alternativas de herramientas y la de Determinar adaptadores. La función Determinar horizontes de trabajo (A41) especifica los intervalos temporales para los que se realizará la programación y gestión de herramientas. La función Gestionar alternativas de herramientas y elementos cortantes (A43) selecciona las alternativas de herramientas que se utilizarán en cada operación, de entre las alternativas sin interferencias, gestionando tanto los paros por los cambios de los fillos de los elementos cortantes, como los necesarios por reglajes. La función Determinar adaptadores (A44) se encarga de la gestión de los adaptadores intermedios y/o finales para completar los montajes de las herramientas en las máquinas. La función Programar montajes y transportes (A45) determina la programación de las tareas de más bajo nivel relacionadas con las herramientas.

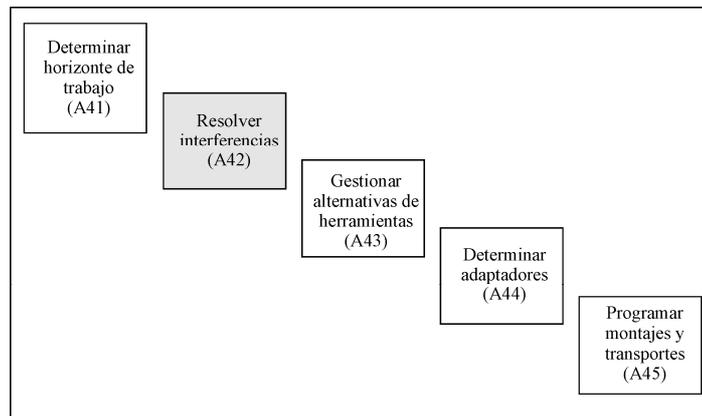


Fig 5-1. Propuesta funcional del gestor de herramientas.

- La propuesta funcional necesita ser completada con un modelo de información que le dé soporte. Aunque sí se han definido los flujos de información, es necesario desarrollar el modelo de información.
- La propuesta realizada para la programación y gestión del recurso herramienta puede extrapolarse a otros recursos, como pueden ser los utillajes, la mano de obra, etc., siempre que se trabaje con la hipótesis de que estos recursos se encuentran supeditados al recurso crítico, representado por las máquinas. De esta forma, y particularizando para las características de cada recurso, se puede generar la programación y gestión de dichos recursos de fabricación.



---

## Bibliografía

- Ref 1 Abellán, J. V., Romero, F., Siller, H. R., Estruch, A., Vila, C. 2008, “Adaptive control optimization of cutting parameters for high quality machining operations based on neural networks and search algorithms”, *Advances in Robotics, Automation and Control*, Ed. Jesús Arámburo y Antonio Ramirez Treviño, pp. 472-492, ISBN: 78-953-7619-16-9.
- Ref 2 Akturk, M. S., Ghosh, J. B., Gunes, E. D. 2004, “Scheduling with tool changes to minimize total completion time: basic results and SPT performance”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 157, pp. 784-790.
- Ref 3 Akturk, M. S., Ghosh, J. B., Kayan, R. K. 2007, “Scheduling with tool changes to minimize total completion time under controllable machining conditions”, *Computers & Operations Research*, Vol. 34, pp. 2130-2146.
- Ref 4 Akturk, M. S., Ozkan, S. 2001, “Integrated scheduling and tool management in flexible manufacturing systems”, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, no. 12, pp. 2697-2722.
- Ref 5 Al-Fawzan, M. A., Al-Sultan, K. S. 2002, “A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 44, pp. 35-47.
- Ref 6 Alvarez, E. 2007, “Multi-plant production scheduling in SME’s”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23, pp. 608-613.
- Ref 7 Amoako-Gyampah, K., Meredith J. R., Raturi, A. 1992, “A comparison of tool management strategies and part selection rules for a flexible manufacturing system”, *International Journal of Production Research*, Vol. 30, no. 4, pp. 733-748.
- Ref 8 Atan, T. S., Pandit, R. 1996, “Auxiliary tool allocation in flexible manufacturing systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 89, pp. 642-659.
- Ref 9 Avci, S., Akturk, M. S. 1996, “Tool magazine arrangement and operations sequencing on CNC machines”, *Computers Operation Research*, Vol. 23, no. 11, pp. 1069-1081.
- Ref 10 Balogun, O., Popplewell, K. 1999, “Towards the integration of flexible manufacturing system scheduling”, *International Journal of Production Research*, Vol. 37, no. 15, pp. 3399-3428.

- 
- Ref 11 Baykasoglu, A., Dereli, T. 2004, "Heuristic optimization system for the determination of index positions on CNC magazines with the consideration of cutting tool duplications", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, no. 7, pp. 1281-1303.
- Ref 12 Ber, A., Falkenburg, D. R. 1985, "Tool management for FMS", *Annals of the CIRP*, Vol. 34, no. 1, pp. 387-390.
- Ref 13 Binghai, Z., Lifeng, X., Jianguo, C. 2004, "Knowledge-based decision support system for tool management in flexible manufacturing system", *Journal of Systems Engineering and Electronics*, Vol. 15, no. 4, pp. 537-541.
- Ref 14 Braglia, M., Zavanella L. 1999, "Experiences and issues in evaluating tool requirements using genetic algorithms", *Production Planning and Control*, Vol. 10, pp. 340-358.
- Ref 15 Brandimarte, P., Lombardi, F., Villa, A. 1992, "Issues in tool management for flexible manufacturing systems", *JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation. ASME*, Vol. 1, pp. 455-459.
- Ref 16 Büyüközkan, G., Dereli, T., Baykasoglu, A. 2004, "A survey on the methods and tools of concurrent new product development and agile manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, pp. 731-751.
- Ref 17 Buyurgan, N., Saygin, C., Kilic, S. E. 2004, "Tool allocation in flexible manufacturing systems with tool alternatives", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 20, pp. 341-349.
- Ref 18 Camarinha-Matos, L. M., Afarmanesh, H. 2003, "Designing the Information Technology Subsystem", *Handbook on Enterprise Architecture*, Ed. Springer, ISBN: 3-540-00343-6.
- Ref 19 Carvalho, J. D. A., Moreira, N. A., Pires, L. C. M. 2005, "Autonomous production systems in virtual enterprises", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, no. 5, pp. 357-366.
- Ref 20 Chen, J., Chen, F. F. 2008, "Adaptive scheduling and tool flow control in flexible shops", *International Journal of Production Research*, Vol. 46, no. 15, pp. 4035-4059.
- Ref 21 Choi, Y., Kim, Y. 2001, "Tool replacement policies for a machining centre producing multiple types of products with distinct due dates", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, no. 5, pp. 907-921.

- 
- Ref 22 Crama, Y., Kolen, A. W. J., Oerlemans, A. G. 1994, "Minimizing the number of tool switches on a flexible machine", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 6, pp. 33-54.
- Ref 23 Dereli, T., Baykasoglu, A. 2005 "OPPS-PRI 2.0: an open and optimized process planning system for prismatic parts to improve the performance of SMEs in the machining industry", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, no. 5, pp. 1039-1087.
- Ref 24 Dereli, T., Filiz, I. H. 2000, "Allocating optimal index positions on tool magazines using genetic algorithms", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 33, pp. 155-167.
- Ref 25 Dimla, E., Dimla, S. 2000, "Sensor signal for tool wear monitoring in metal cutting operations- a review of methods", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 1073-1098.
- Ref 26 ElMaraghy, H. A. 1985, "Automated tool management in flexible manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 4, no. 1, pp. 1-13.
- Ref 27 Eversheim, W., Kals, H. J. J., Koning, W., van Luttervelt, C. A., Milberg, J., Storr, A., Tonshoff, H. K., Weck, M., Weule, H., Zdevlick, W. J. 1991, "Tool management: the present and the future", *Annals of the CIRP*, Vol. 40, no. 2, pp. 631-639.
- Ref 28 Fathi, Y., Barnette, K. W. 2002, "Heuristic procedures for the parallel machine problem with tool switches", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, no. 1, pp. 151-164.
- Ref 29 Fernandes, K. J., Raja V. H. 2000, "Incorporated tool selection system using object technology", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1547-1555.
- Ref 30 Frechette, S. 1992, "Open architecture for tool management", *Proceedings of Manufacturing International. ASME, March 29 - April 1 Dallas*, pp. 319-334.
- Ref 31 Ghosh, S., Malnyk, S. A., Ragatz, G. L. 1992, "Tooling constraints and shop floor scheduling: evaluating the impact of sequence dependency", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, no. 6, pp. 1237-1253.
- Ref 32 Göloğlu, C., 2004, "A constraint-based operation sequencing for a knowledge-based process planning", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, pp. 463-470.
- Ref 33 González, F., 2001, Tesis Doctoral: "Propuesta funcional y estructuración de información y conocimiento para planificación de

- 
- procesos asistida por computador. Aplicación a la determinación de procesos, operaciones y máquinas para piezas mecanizadas”, Universidad Politécnica de Valencia.
- Ref 34 González, F., Rosado, P. 2003, “General and flexible methodology and architecture for CAPP: GF-CAPP”, *International Journal of Production Research*, Vol. 41, no. 12, pp. 2643-2662.
- Ref 35 Gray, A. E., Seidman, A., Stecke, K. E. 1993, “A synthesis of decisions models for tool management in automated manufacturing”, *Management Science*, Vol. 39, no. 5, pp. 549-567.
- Ref 36 Grieco, A., Semeraro, Q., Tolio, T., Toma, S. 1995, “Simulation of tool and part flow in FMSs”, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, no. 3, pp. 643-658.
- Ref 37 Grieco, A., Semeraro, Q., Tolio, T. 2001, “A review of different approaches to the FMS loading problem”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 13, pp. 361-384.
- Ref 38 Groover, M. P. 1996, *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*, Ed. Prentice Hall, ISBN: 968-880-846-6.
- Ref 39 Groover, M. P. 2001, *Automation, production systems & computer integrated manufacturing*, Ed. Prentice Hall, ISBN: 0-13-089546-6.
- Ref 40 Hao, Q., Shen, W., Wang, L. 2006, “Collaborative manufacturing resource scheduling using Agent-based Web services”, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 9, no. 3/4, pp. 309-327.
- Ref 41 Hertz, A., Laporte, G., Mittaz, M., Stecke, K. E. 1998, “Heuristic for minimizing tool switches when scheduling part types on a flexible machine, *IIE Transactions*, Vol. 30, pp. 689-694.
- Ref 42 Ho, Y.-C., Hsieh, H.-W. 2005, “A part-and-tool assignment method for the workload balance between machines and the minimisation of tool shortage occurrences in a FMS”, *International Journal of Production Research*, Vol. 43, no. 9, pp. 1831-1860.
- Ref 43 ISO 3685: 1993. Tool-life testing with single-point turning tools.
- Ref 44 ISO 10303: 2006. Industrial automation systems and integration. Product data representation and exchange.
- Ref 45 ISO 13399: 2005. Cutting tool data representation and exchange.

- 
- Ref 46 ISO 14649: 2003. Industrial automation systems and integration. Physical device control. Data model for numerical computerized controllers.
- Ref 47 Jain, A. S., Meeran, S. 1999, "Deterministic job shop scheduling: past, present and future", *European Journal of Operational Research*, Vol. 13, pp. 390-434.
- Ref 48 Kalpakjian, S., Schmid, S. R. 2002, *Manufactura. Ingeniería y tecnología*, Ed. Prentice Hall, ISBN: 0-201-36131-10.
- Ref 49 Kannan, V. R., Ghosh, S. 1996, "Cellular manufacturing using virtual cells", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 16, no. 5, pp. 99-112.
- Ref 50 Kim, Y. D., Lee, G. C., Kim, S. K., Choi, S. K. J. 2003, "Tool requirement planning in a flexible manufacturing system: minimizing tool costs subject to a makespan constraint", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, no. 14, pp. 3339-3357.
- Ref 51 Kim, Y. D., Yano, C. A. 1994, "A new branch and bound for loading problems in flexible manufacturing systems", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 6, pp. 361-382.
- Ref 52 Koo, P.-H., Tanchoco, J. M. A. 1999, "Real-time operation and tool selection in single stage multimachine systems" *International Journal of Production Research*, Vol. 37, no. 5, pp. 1023-1040.
- Ref 53 Koo, P.-H., Tanchoco, J. M. A. and Talavage, J. J. 1998, "Estimation of tool requirements in single-stage multimachine systems", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, no. 6, pp. 1699-1713.
- Ref 54 Kulvatunyou, B., Wysk, R. A., Cho, H., Jones, A. 2004, "Integration framework of process planning based on resource independent operation summary to support collaborative manufacturing", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, no. 5, pp. 377-393.
- Ref 55 Kumar N., Sridharan, R. 2007, "Simulation modelling and analysis of tool sharing and part scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23, pp. 361-370.
- Ref 56 Kusiak, A. 1986, "Parts and tools handling systems", *Modelling and design of flexible manufacturing systems*, Elsevier Science Publications, pp. 99-109.
- Ref 57 Kusiak, A. 1990, *Intelligent manufacturing systems*, Ed. Prentice Hall, ISBN: 0-13-468364-1.
-

- 
- Ref 58 Laviolette, B. E. 1994, "Tool management seen as a source of cost savings", *American Machinist*, pp. 29-30.
- Ref 59 Lee, C. S., Kim, H. J. 2006, "A part release considering tool scheduling and dynamic tool allocation in flexible manufacturing systems", *IEEE*.
- Ref 60 Levitin, G., Rubinovitz, J. 1995, "Algorithm for tool placement in an automatic tool change magazine", *International Journal of Production Research*, Vol. 33, no. 2, pp. 351-360.
- Ref 61 Liang, S. Y., Hecker, R. L., Landers, R. G. 2004, "Machining process monitoring and control: the state of the art", *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, Vol. 126, no. 2, pp. 297-310.
- Ref 62 Liu, P. H., Makis, V., Jardine, A. K. S. 2001, "Scheduling of the optimal tool replacement times in a flexible manufacturing system", *IIE Transactions*, Vol. 33, pp. 487-495.
- Ref 63 López de la Calle, L. N., Sánchez J. A., Lamikiz, A. 2004, *Mecanizado de alto rendimiento. Procesos de arranque*, Ediciones Técnicas Izaro, S.A., ISBN: 84-609-1380-5.
- Ref 64 Macchiaroli, R., Riemma, S. 1996, "Design of a tool management system in a flexible cell", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, no. 3, pp. 767-784.
- Ref 65 Maropoulos, P. G. 1995, "Review of research in tooling technology, process modelling and process planning. Part I: Tooling and process modelling", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, no. 1, pp. 5-12.
- Ref 66 Mason, F. 1986, "Computerized cutting-tool management", *American Machinist & Automated Manufacturing*, pp. 106-120.
- Ref 67 Matta, A., Tolio, T., Tontini, F. 2004, "Tool management in flexible manufacturing systems with network part program", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, no. 17, pp. 3707-3730.
- Ref 68 Matzliach, B., Tzur, M. 1998, "Online tool switching problem with non-uniform tool size", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, no. 12, pp. 3407-3420.
- Ref 69 Melnyk, S. A., Lyman, S. B. 1993, "Tool management and control: developing an integrated top-down control process", *American Production & Inventory Control Society*, pp. 510-514.
- Ref 70 Mendes, M., Mikhailov, M. D., Qassim, R. Y. 2003, "A mixed-integer linear programming model for part mix, tool allocation, and process

- 
- plan selection in CNC machining centres”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1179-1184.
- Ref 71 Meseguer, A., González, F. 2006, “Modelo funcional de un gestor de herramientas de mecanizado”, *Información Tecnológica*, Vol. 17, no. 5, pp 3-8.
- Ref 72 Meseguer, A., González, F. 2008, “A methodology for cutting-tool management through the integration of CAPP and scheduling”, *International Journal of Production Research*, Vol. 46, no. 6, pp. 1685-1706.
- Ref 73 Ming, X. G., Yan, J. Q., Wang, X. H., Li, S. N., LU, W. F., Peng, Q. J., Ma, Y. S. 2008, “Collaborative process planning and manufacturing in product lifecycle management”, *Computers in Industry*, Vol. 59, pp. 154-166.
- Ref 74 Mitsubishi Carbide. [www.mitsubishicarbide.com](http://www.mitsubishicarbide.com).
- Ref 75 Modi, B. K., Shanker, K. 1994, “Models and solutions approaches for part movement minimization and load balancing in FMS with machine, tool and process plan flexibilities”, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, no. 7, pp. 1791-1816.
- Ref 76 Mukhopadhyay, S. K., Sahu, S. K. 1996, “Priority-based tool allocation in a flexible manufacturing system”, *International Journal of Production Research*, Vol. 34, no. 7, pp. 1995-2018.
- Ref 77 NIST FIPS PUB 183. Federal Information Processing Standard Publication 183.
- Ref 78 Nomden, G., Slomp, J., Suresh, N. C. 2006, “Virtual manufacturing cells: A taxonomy of past research and identification of future research issues”, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 17, pp. 71-92.
- Ref 79 Oral, A., Cemal Cakir, M. 2004, “Automated cutting tool selection and tool sequence optimisation for rotational parts”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 20, pp. 127-141.
- Ref 80 Özbayrak, M., De Souza, R. B. R., Bell, R. 2001, “Design of a tool management system for a flexible machining facility”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 215, pp. 353-370.
- Ref 81 Pearn, W. L., Hsu Y., Wu, C. 2006, “Tool replacement for production with a low fraction of defectives”, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, no. 12, pp. 2313-2326.
- Ref 82 Prabakaran, T., Nakkeeran, P. R., Jawahar, N. 2006, “Sequencing and scheduling of job and tool in a flexible manufacturing cell”,
-

- 
- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 729-745.
- Ref 83 Prince, J., Kay, J. M. 2003, "Combining lean and agile characteristics: creation of virtual groups by enhanced production flow analysis", *International Journal of Production Economics*, Vol. 85, pp. 305-318.
- Ref 84 Privault, C., Finke, G. 1995, "Modelling a tool switching problem on a single NC machine", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 6, pp. 87-94.
- Ref 85 Quiroga, O., Zeballos, L., Henning, G. 2005, "A constraint programming approach to tool allocation and resource scheduling in FMS", *Proceedings of the 2005 IEEE. International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3715-3720.
- Ref 86 Rachamadugu, R., Stecke, K. E. 1994, "Classification and review of FMS scheduling procedures", *Production Planning & Control*, Vol. 5, no. 1, pp. 2-20.
- Ref 87 Ranky, P. G. 1988, "A generic tool management system architecture for flexible manufacturing systems", *Robotica*, Vol. 6, pp. 221-234.
- Ref 88 Rao, P. V., Raju, D. R. P. 2000, "Concurrent simulation of job flow with tools. A tool management systems approach", *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 7, no. 2, pp. 99-107.
- Ref 89 Rhodes, J. S. Jr. 1988, "FMS tool management systems", *Flexible Manufacturing Systems*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, pp. 269-286.
- Ref 90 Roh, H., Kim, Y. D. 1997, "Due-date based loading and scheduling methods for a flexible manufacturing system with an automatic tool transporter", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, no. 11, pp. 2989-3003.
- Ref 91 Rosado, P., 1998, Tesis Doctoral: "Propuesta de un sistema inteligente de control de planta. Establecimiento de un sistema modular y flexible para entornos CIM", Universidad Politécnica de Valencia.
- Ref 92 Rupe, J., Kuo, W. 1997, "Solutions to a modified tool loading problem for a single FMM", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, no. 8, pp. 2253-2268.
- Ref 93 Sandvik Coromant. [www.coromant.sandvik.com](http://www.coromant.sandvik.com).
- Ref 94 Sarin, S. C., Chen, C. S., 1987, "The machine loading and tool allocation problem in a flexible manufacturing system", *International Journal of Production Research*, Vol. 25, no. 7, pp. 1081-1094.

- 
- Ref 95 Shayan, E., Liu, C. L. 1995, "Tool management in flexible manufacturing systems", *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 6, no. 4, pp. 26-35.
- Ref 96 Smith, G. T. 2008, *Cutting tool technology*, Ed. Springer, ISBN: 978-1-84800-205-0.
- Ref 97 Sodhi, M. S., Agnetis, A., Askin, R. G. 1994, "Tool addition strategies for flexible manufacturing systems", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 6, pp. 287-310.
- Ref 98 Song, C. Y., Hwang, H., Kim, Y.D. 1995, "Heuristic algorithm for the tool movement policy in flexible manufacturing systems", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, no. 3, pp. 160-168.
- Ref 99 Song, C. Y., Hwang, H. 2002, "Optimal tooling policy for a tool switching problem of a flexible machine with automatic transporter", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, no. 4, pp. 1081-1094.
- Ref 100 Sormaz, D. N., Arumugan, J., Rajaraman, S. 2004, "Integrative process plan model and representation for intelligent distributed manufacturing planning", *International Journal of Production Research*, Vol. 42, no. 17, pp. 3397-3417.
- Ref 101 Stecke, K. E. 1983, "Formulation and solution of nonlinear integer production planning problems for flexible manufacturing systems", *Management Science*, Vol. 29, pp. 273-288.
- Ref 102 Tang, C. S., Denardo, E. V. 1988, "Models arising from a flexible manufacturing machine, Part I: Minimization of the number of tool switches", *Operations Research*, Vol. 36, pp. 767-777.
- Ref 103 Tian, G. Y., Yin, G. F. Taylor, D. 2002, "Internet-based manufacturing: A review and a new infrastructure for distributed intelligent manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 13, pp. 323-328.
- Ref 104 Tiwari, M. K., Vidyarthi, N. K. 2000, "Solving machine loading problems in a flexible manufacturing system using a genetic algorithm based heuristic approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 38, no. 14, pp. 3357-3384.
- Ref 105 Trent, E. M., Wright, P. K. 2000, *Metal cutting*, Ed. Butterworth-Heinemann, ISBN: 0-7506-7069-X.
- Ref 106 Turkcan, A., Akturk M. S., Storer, S. H. 2003, "Non-identical parallel CNC machine scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, no. 10, pp. 2143-2168.

- 
- Ref 107 Turkcan, A., Akturk M. S., Storer, S. H. 2007, "Due date and cost-based FMS loading, scheduling and tool management", *International Journal of Production Research*, Vol. 45, no. 5, pp. 1183-.
- Ref 108 Veeramani, D., Upton, D. M., Barash, M. M. 1992, "Cutting-tool management in computer-integrated manufacturing", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 3/4, pp. 237-265.
- Ref 109 Xie, S. Q., Tu, Y. L., Fung, R. Y. K., Zhou, Z. D. 2003, "Rapid one-of-a-kind product development via the Internet: a literature review of the state of the art and a proposed platform", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, no. 18, pp. 4257-4298.
- Ref 110 Xu, X. W., Newman, S. T. 2006, "Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent-a review of the technologies", *Computers in Industry*, Vol. 57, pp. 141-152.
- Ref 111 Xu, Z., Randhawa, S. 1998, "Evaluation of scheduling strategies for a dynamic job shop in a tool-shared, flexible manufacturing environment", *Production Planning & Control*, Vol. 9, no. 1, pp. 74-86.
- Ref 112 Xu, X. W., Wang, H., Mao, J., Newman, S. T., Kramer, T. R., Proctor, F. M., Michaloski, J. L. 2005, "STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration", *International Journal of Production Research*, Vol. 43, no. 17, pp. 3703-3743.
- Ref 113 Zhang, X., Fujii, S., Kaihara T. 2005, "Evaluation of tool allocation strategies in flexible manufacturing system", *JSME International Journal*, Vol. 48, no 1, pp. 37-45.
- Ref 114 Zhou, B. H., Xi, L. F., Cao, Y. S. 2005, "A beam-search-based algorithm for the tool switching problem on a flexible machine", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, pp. 876-882.
- Ref 115 Zhou, Z., Li, M., Shen, L. 2006, *Knowledge enterprise: intelligent strategies in product design, manufacturing and management*, International Federation for Information Processing (IFIP), Volume 207, Ed. Springer: Boston.