Procesos de fabricación flexible

PID_00253868

Joan Ramón Gomà Ayats

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas





© FUOC • PID_00253868 Procesos de fabricación flexible



Joan Ramón Gomà Ayats

Joan Ramon Gomà Ayats (Santa Coloma de Gramenet, 1960) es doctor ingeniero industrial, profesor agregado del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña en la especialidad de procesos de fabricación. Es miembro del grupo de investigación de tecnologías de la producción de la UPC (TECNOFAB) y hasta diciembre de 2009 fue director general de la Fundación Centro CIM.

© FUOC • PID_00253868 Procesos de fabricación flexible

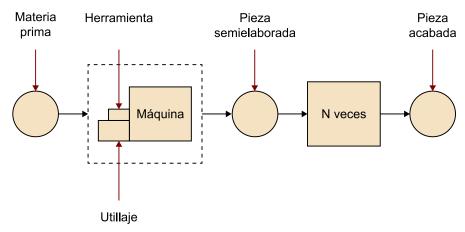
Índice

Introducción						
1.	Lote	óptimo	9			
2.	Fábrica flexible					
	2.1.	Célula de fabricación flexible	13			
		2.1.1. Número de máquinas atendidas por el mismo robot	14			
		2.1.2. Maniobra de carga y descarga	16			
		2.1.3. Mesa de trabajo	18			
		2.1.4. Gestión de herramientas	20			
		2.1.5. Gestión de la calidad	22			
	2.2.	2. Línea de fabricación flexible				
		2.2.1. Cajas	24			
		2.2.2. Sistemas de transporte	25			
	2.3.	Taller flexible	26			
		2.3.1. Almacenes automáticos	27			
3.	Procesos directos versus procesos indirectos					
	3.1.	Procesos sustractivos	30			
	3.2.	Moldeo	33			
	3.3.	Forja	36			
	3.4.	Chapa	37			
3.5. Procesos de fabric		Procesos de fabricación aditiva	42			
	3.6.	. Selección entre procesos directos e indirectos				
		3.6.1. Análisis basado en el proceso concreto	44			
		3.6.2. Análisis basado en la fabricación integrada	47			
Bil	oliogr	afía	49			

Introducción

La palabra flexible sugiere que algo se puede doblar para adaptarse a las acciones exteriores. En el caso de la fabricación de piezas, la adaptación que hace falta es la que permite cambiar de pieza fabricada y/o cambiar de ritmo de producción. Planteado de esta manera, la flexibilización de la fabricación de piezas no comporta ningún reto tecnológico para la fabricación artesanal y siempre ha sido altamente capaz de adaptarse a cambios en las piezas y los ritmos de producción para ajustarse a las necesidades de los clientes. De hecho, es en la época de la Revolución Industrial cuando, al introducir las ideas de división del trabajo, especialización, fabricación en masa y estandarización, la fabricación de piezas se hace rígida porque resulta muy costoso el cambio de fabricación de una pieza a fabricar otra pieza; se abandona la fabricación a medida y se pasa a la fabricación estándar. Para entender las causas de la rigidez de la fabricación de piezas se puede hacer abstracción del proceso de fabricación de una pieza como una sucesión de operaciones donde cada una de ellas modifica la forma de la materia. Con estas sucesivas modificaciones de la forma, al final se consigue darle la forma deseada a la pieza terminada. En el caso más general, en cada una de estas operaciones concurre una máquina, con unos utillajes, unas herramientas y un operario. Esto se puede representar con la figura 1.

Figura 1. Esquema de un proceso de conformación de una pieza



Fuente: Vivancos, J., 1996

La distinción entre el concepto de máquina, utillaje y herramienta hace falta analizarla.

La máquina es un equipamiento que transforma la energía primaria empleada en la fábrica y la aplica sobre la pieza para modificar su forma. Esta máquina es universal en el sentido de que puede fabricar infinitas piezas diferentes dentro de ciertos límites de materiales, tamaños y formas. El hecho de que la pieza

obtenida tenga una forma u otra depende de las herramientas y utillajes que se montan en la máquina y de la forma como el control de la máquina la hace actuar. Ejemplos de máquinas pueden ser tornos, fresadoras, prensas, etc.

Las herramientas son complementos que se montan en la máquina para actuar directamente sobre la materia de la pieza. Las herramientas se diseñan como elementos independientes de la máquina porque, al actuar directamente sobre la pieza, sufren un desgaste y hay que sustituirlas periódicamente por otras. Las herramientas también son universales en el sentido de que utilizando la misma herramienta de diferentes maneras se pueden fabricar piezas diferentes. Ejemplos de herramientas pueden ser las brocas, las fresas, los punzones, las muelas.

En este texto, cuando se habla de utillajes se hace referencia a elementos que se diseñan y se fabrican específicamente para hacer una pieza concreta o un conjunto muy limitado de piezas similares. Ejemplos de utillajes son los elementos de sujeción de piezas con formas complejas, los moldes, las matrices, las estampas, modelos, etc. (A veces, cuando se habla de utillajes, se hace referencia solo a utillajes de sujeción, pero este no es el caso en este texto).

En el caso más general, para que una máquina que estaba fabricando una pieza pase a hacer una diferente son necesarias tres cosas:

- Cambiar el utillaje.
- Asegurar que tiene montadas las herramientas necesarias para hacer la nueva pieza.
- Operar la máquina de forma diferente.

El cambio en la forma de operar de la máquina tradicionalmente presentaba un dilema que consistía en tener que escoger entre máquinas universales o máquinas automáticas. Las máquinas universales estaban diseñadas para ser constantemente controladas por un operario. El operario arranca y para motores, selecciona marchas y hace girar manivelas que cambian la posición de las herramientas, y de esta manera consigue que la máquina haga la pieza deseada. Por otro lado, las máquinas automáticas estaban diseñadas para reproducir mecánicamente las maniobras que el operario hacía sobre las máquinas universales. Esto se consigue utilizando levas, modelos y palpadores, topes, etc. En esta situación la máquina universal era flexible porque podía cambiar de pieza sin otro requisito que darle la instrucción al operario, pero era mucho menos productiva que la máquina automática. Por otra parte, las máquinas automáticas eran muy productivas, pero para cambiar de pieza que debían fabricar era preciso desmontar una parte significativa de la máquina, fabricar levas, modelos, topes nuevos y montarlos. En algunos casos casi implicaba construir una máquina nueva.

Las máquinas de control numérico rompen este dilema y permiten obtener una máquina que es, al mismo tiempo, universal y automática. La primera vez que se hace una pieza hay que escribir el programa de control numérico y eso le da cierta desventaja respecto de las máquinas universales convencionales en el caso de piezas que solo se han de fabricar una vez en la vida y que tienen formas geométricas sencillas. Pero una vez se tiene el programa de control numérico, conseguir que la máquina cambie de pieza es simplemente cambiar el programa que debe ejecutar, lo que puede tardar microsegundos, por lo que, en la práctica, se puede afirmar que es instantáneo.

Hoy en día, las tres tecnologías conviven. Las máquinas universales convencionales han quedado reducidas prácticamente a los talleres de mantenimiento o de fabricación de prototipos para hacer piezas sencillas y únicas. Las máquinas automáticas convencionales se emplean en la fabricación de piezas con gran demanda que permiten mantener la máquina haciendo la misma pieza 24 horas al día 7 días a la semana todo el año. Las máquinas de control numérico empleadas tienen diferentes niveles de integración y con más o menos complementos han ido ocupado el lugar intermedio, en el que se halla la fabricación de piezas en lotes o la fabricación de piezas únicas con geometrías complejas. El cambio de las herramientas es una función que se puede automatizar de forma relativamente fácil. Las herramientas tienen una parte activa que es la que interacciona con la pieza y una parte auxiliar que es el mango, cuya función es facilitar su sujeción a la máquina. La parte activa hay que diseñarla para cumplir la función de dar forma a la pieza y esto condiciona totalmente su geometría, pero en la parte auxiliar hay total libertad a la hora de diseñar, de forma que se puede diseñar para facilitar la automatización del cambio de herramienta. Las máquinas de control numérico tienen resuelta la automatización del cambio de herramienta y habitualmente se ofrecen en el mercado con el cambio automático de herramientas como una especificación más de la máquina o como una opción.

Hoy en día, en que disponemos de máquinas que operan controladas por control numérico y con cambio automático de herramientas, la barrera que dificulta la preparación de la máquina proviene de la necesidad de cambiar los utillajes.

Los utillajes deben diseñarse específicamente para cada pieza y quedan condicionados por su forma. En algunos procesos de fabricación, estos utillajes pueden ser muy complejos. Por ejemplo, los moldes de inyección de plástico pueden contener mecanismos de salida de noyos giratorios para hacer roscas interiores que requieren motores hidráulicos o eléctricos; pueden tener transmisiones mecánicas, sistema de termoacondicionamiento que debe conectarse con los circuitos de fluidos de la máquina de inyección, o también señales de sensores para coordinar los parámetros de funcionamiento durante el ciclo

de trabajo. En muchos casos el tiempo de cambio de estos utillajes puede ser de varias horas de trabajo y en todo caso muchas veces superior al tiempo de producción de una pieza una vez el utillaje ya está montado en la máquina.

La consecuencia de todo ello es que en estos casos lo más rentable económicamente es la producción por lotes. Pero la producción por lotes conduce a una distribución en planta de la fábrica y una logística interna de materiales que hace muy difícil que la automatización del transporte y del almacenamiento sea productiva.

Por eso hay un gran interés económico y tecnológico en poder reducir al mínimo el tamaño del lote de trabajo llegando, en el caso ideal, a lotes unitarios.

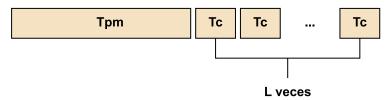
Hay dos formas para conseguir que el lote óptimo sea pequeño. Una posibilidad es eliminar la preparación de máquina utilizando un proceso de fabricación que no necesite utiliajes. El otro es reducir el tiempo de cambio de los utiliajes y preparación de la máquina en tan alto grado que el lote óptimo sea unitario.

En este texto se estudiará primero la determinación del lote óptimo y las condiciones que deben darse para que el lote óptimo sea unitario o muy pequeño. Entonces se estudiarán los sistemas de fabricación flexibles basados en fabricación sobre la base de lotes unitarios o pequeños. Para terminar, se examinarán los principales procesos de conformación de piezas explorando si existen alternativas sin utillajes. Se dejará para más adelante el tratamiento de la metodología SMED, que busca aplicar un conjunto de métodos para llegar a conseguir que el lote económico sea unitario o muy pequeño.

1. Lote óptimo

En el caso de procesos que requieren una preparación previa de la máquina antes de empezar a fabricar la primera pieza, el desarrollo de la operación de fabricación a lo largo del tiempo se puede esquematizar en la figura 2.

Figura 2. Desarrollo temporal de la operación



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Primero hay que destinar un tiempo a preparar la máquina (TPM) y una vez está preparada se empieza el ciclo de producción. Cada ciclo dura un tiempo (TC) y se repite L veces (tamaño del lote). Normalmente en cada ciclo se quiere fabricar una sola pieza y, por tanto, el número de ciclos es igual al número de piezas. En casos donde en cada ciclo se fabrica un pequeño conjunto de piezas entonces hay que tener en cuenta que el tamaño del lote crece.

A partir de aquí se puede determinar el coste anual en función de la medida del lote. Denominando:

D (piezas/año]	La demanda anual de piezas.			
P _{hp} [€/h)	El precio de la hora de preparación de la máquina.			
C _s (€/pieza-año)	El coste de mantener una pieza en <i>stock</i> durante un año.			
T _p (h/lote)	El tiempo de preparación de la máquina.			
C (€/pieza)	El coste por pieza del resto de costes proporcionales al número de piezas fabricadas. Fundamentalmente el coste de la materia primera y el coste del tiempo de ciclo.			

El número de veces que se prepara la máquina al cabo del año será la cantidad de piezas a fabricar al año, es decir, la demanda anual, dividida por la cantidad de piezas que se fabrican cada vez que se prepara la máquina (el tamaño del lote):



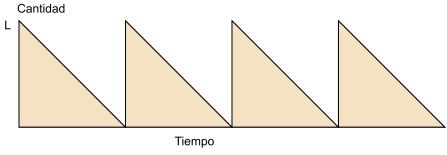
Cada vez que se prepara la máquina, el coste de preparación es el producto del tiempo en horas de preparación por el precio hora de preparación: $T_p \times P_{hp}$

Por lo tanto, el coste anual de preparación de máquina será el producto del número de veces que se prepara por el coste de prepararla cada vez:

$$C_{\text{prep}} = \frac{D}{L} \cdot T_p \cdot P_{\text{hp}}$$

En cuanto al coste del *stock*, hay que estimar cuál será el *stock* medio que habrá, dado que cuando se termine de hacer un lote el *stock* subirá de repente y a medida que se vaya satisfaciendo la demanda, este se irá reduciendo a lo largo del tiempo mientras no se fabrique otro lote. Suponiendo una demanda constante en el tiempo y suponiendo que la programación de la producción se hace de tal forma que cada lote se acaba de producir justo en el momento en que se acaba el *stock*, la curva que representa la cantidad de piezas almacenadas en cada momento del tiempo sería como la de la figura 3.

Figura 3. Evolución temporal del stock



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

A la vista del gráfico queda claro que de media hay L/2 piezas en el almacén. Por lo tanto, el coste de mantenimiento de este *stock* se puede evaluar como:

$$C_{\text{stoc}} = \frac{L}{2} \cdot C_s$$

Dado que el resto de costes proporcionales al número de piezas producidas se pueden determinar multiplicando el número de piezas por el coste unitario C, serán D·C. Por lo tanto, el coste total anual de fabricar esta pieza será:

$$C_T = \frac{D}{L} \cdot T_p \cdot P_{hp} + \frac{L}{2} \cdot C_s + D \cdot C$$

Derivando respecto de L e igualando a cero, se encontrará el valor de L, que representa el mínimo coste:

$$\frac{dC_T}{dL} = -\frac{D}{I^2} \cdot T_p \cdot P_{hp} + \frac{C_s}{2} = 0$$

$$\frac{C_s}{2} = \frac{D}{L_2} \cdot T_p \cdot P_{hp}$$

$$L^2 = \frac{2 \cdot D \cdot T_p \cdot P_{hp}}{C_s}$$

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot T_p \cdot P_{hp} \cdot D}{C_s}}$$

Queda claro que cuanto menor es el tiempo de preparación de máquina más pequeño es el lote óptimo. En particular, para que el lote óptimo valga L o menos el tiempo de preparación de máquina es menor o igual que:

$$L^2 \ge \frac{2 \cdot D \cdot T_p \cdot P_{hp}}{C_s}$$

$$\frac{L^2 \cdot C_s}{2 \cdot D \cdot P_{\text{hp}}} \ge T_p$$

$$\frac{10^2 \cdot 10}{2 \cdot 500 \cdot 20} = \frac{1}{20}h = 3$$
 minutos.

Por lo tanto, una manera de poder trabajar de forma eficiente con lotes pequeños es buscar procesos de fabricación alternativos que no necesiten preparación de máquina (Tp=0). Y otra manera es conseguir que el tiempo de preparación de la máquina sea muy pequeño, del orden de pocos minutos.

Cuando el tiempo de preparación de máquina es del orden de horas, entonces lo más eficiente económicamente es trabajar por lotes. Estos dos sistemas comportan organizaciones de la producción completamente diferentes.

En la fabricación por lotes y contra *stock*, se calcula para cada operación el lote óptimo. Con el fin de satisfacer la demanda, cuando se prevé que pronto se agotarán las piezas acabadas que hay en el almacén, se lanza al taller una orden de fabricación de un lote de piezas de la última operación. Este lote se hace empleando piezas semielaboradas en que ya están hechas de antemano todas las operaciones excepto la última. Estas piezas se tienen en el almacén de producto semielaborado. Cuando se prevé que se terminarán las piezas semielaboradas para la última operación de conformado (se debe garantizar que

siempre hay como mínimo un *stock* igual al lote óptimo de la última operación) entonces se lanza una orden de fabricación de un lote óptimo de la penúltima y así sucesivamente.

En la fabricación con pieza única (también **lotes pequeños del número de piezas que caben en una unidad de transporte interno de la fábrica**) o fabricación *just in time*, la demanda se satisface a partir de la materia prima, haciendo pasar la pieza (o la caja de piezas) una tras otra por las diferentes máquinas que se necesita para fabricarla. Las piezas no van ni vienen del almacén, no se almacenan piezas semielaboradas; el único *stock* que hay son las piezas que están siendo fabricadas y las que están en tránsito de una máquina a otra o haciendo cola para entrar en una máquina. Esto disminuye mucho el tamaño de los almacenes y los recorridos de las piezas a transportar dentro de la fábrica y hace más rentable la automatización del almacenamiento y el transporte.

2. Fábrica flexible

El objetivo de la fabricación flexible es el desarrollo de procesos productivos que estén total o altamente automatizados y al mismo tiempo puedan cambiar de pieza fabricada muy rápidamente.

2.1. Célula de fabricación flexible

El objetivo de una célula de fabricación flexible es que se pueda realizar una fase, dentro del proceso de fabricación de las piezas, sin atención de ningún operario.

Una célula de fabricación flexible (Figura 4) está compuesta por un robot que alimenta una máquina de control numérico con intercambio automático de herramientas (cuando es posible, sin perder rendimiento, el mismo robot puede dar servicio a más de una célula) con una mesa de trabajo. La mesa de trabajo hace las funciones de almacén para el intercambio, identificación y paletización de piezas en bruto, piezas acabadas, herramientas y elementos terminales del robot (manos).

Figura 4. Célula de fabricación flexible



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Conjuntamente con estos tres elementos físicos, la célula tiene que poder gestionar el desgaste de las herramientas y la calidad de las piezas.

El funcionamiento de la célula es el siguiente:

- La mesa de trabajo recibe cajas de piezas en bruto del sistema de transporte y entrega cajas de piezas acabadas al sistema de transporte. Esporádicamente también recibe del sistema de transporte cajas con herramientas nuevas y entrega cajas con herramientas gastadas; también recibe cajas con los elementos terminales del robot que se utilizarán y entrega cajas con los elementos que no se utilizarán.
- El **robot** coge las piezas acabadas de la máquina y las deposita en cajas encima de la mesa de trabajo, después coge piezas en bruto de las cajas que están sobre la mesa de trabajo y las introduce en la máquina. Ocasionalmente hace esta maniobra con las herramientas o cambia su propio elemento terminal de sujeción de las piezas.

La máquina de control numérico con cambio automático de herramientas realiza todas las operaciones necesarias para hacer la fase del proceso de fabricación de la pieza.

Si la máquina genera viruta, residuos o chatarra conviene que disponga de un elemento automático de extracción conectado hacia un circuito de transporte, siempre que se quiera tener un sistema automatizado que no requiera intervenciones frecuentes de los operarios.

No debe confundirse con las células de trabajo del Lean manufacturing.

En *Lean manufacturing*, se denomina *célula de trabajo* a un conjunto de máquinas y operarios que fabrican una familia de piezas. La fábrica se organiza en células de trabajo y es un sistema de organización de la producción pensado para sistemas productivos que no estén 100% automatizados. Este concepto se explica en el apartado dedicado a las líneas de fabricación flexibles.

A continuación, se estudia la decisión de asignar más de una máquina al mismo robot, las maniobras de carga y descarga de las piezas, la estructura y funciones de las mesas de trabajo y los sistemas de gestión de herramientas y de la calidad.

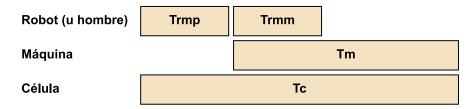
Las piezas se transportan por la fábrica en cajas llamadas también palés. Las cajas o palés con que se transportan las piezas se estudian en el apartado de las líneas de fabricación flexibles junto con los sistemas de transporte. En este texto se hará referencia a ellas con el nombre de cajas para distinguirlas de los palés formados por una plataforma sobre la que se ubica una pila de cajas.

2.1.1. Número de máquinas atendidas por el mismo robot

El tiempo de ciclo es el tiempo que pasa desde que la máquina acaba de trabajar con una pieza (o con un conjunto reducido de piezas que hace simultáneamente) hasta que termina de trabajar con la siguiente. El número de piezas fabricadas en un determinado período de tiempo es igual al número de ciclos que se han fabricado en ese periodo de tiempo (o al número de ciclos multiplicado por las piezas que se hacen en cada ciclo).

En una máquina de control numérico se puede distinguir dentro del ciclo el tiempo durante el cual está trabajando la máquina y el tiempo durante el cual está trabajando el robot (o el operario que alimenta la máquina). Algunas de las tareas que tienen que hacer estos dos agentes se pueden solapar en el tiempo, pero otros deben hacerse secuencialmente. Así se puede representar la actividad de la máquina y la del robot con un diagrama de tiempo como el siguiente:

Figura 5.



En que:

- TRMP Es el tiempo de trabajo del robot, que debe hacerse con la máquina parada (sacar la pieza terminada, meter la pieza en bruto).
- TRMM Es el tiempo de trabajo del robot, que se puede hacer con la máquina en marcha (dejar la pieza en la caja, preparar la pieza siguiente).
- TM Es el tiempo que tarda la máquina en hacer el trabajo.
- TC Es el tiempo de ciclo. TC = TRMP + TM
- *TR* Es el **tiempo** durante el cual el **robot** está trabajando. TR = TRMM + TRMP

Si el tiempo del robot (TR) es muy pequeño comparado con el tiempo de máquina (lo cual sucede a menudo), el robot pasa una parte significativa del tiempo parado, lo que hace plantear la posibilidad de que un mismo robot dé servicio a más de una máquina. En el caso de que haya varias máquinas haciendo siempre el mismo trabajo, es sencillo determinar el número de máquinas que pueden ser atendidas por el mismo robot. Basta con dividir el tiempo de ciclo entre el tiempo de máquina y redondear al número entero inferior o superior al resultado.

$$N = TC/TM = (TM + TRMP) / (TRMP + TRMM)$$

Si se asignan N máquinas, las máquinas no paran nunca y el robot tiene un poco de tiempo ocioso, por eso este caso se denomina *asignación de máquina saturada*. Si se le asignan N + 1 máquinas, el robot no para nunca y las máquinas tienen un poco de tiempo ocioso, por eso esta asignación se denomina *asignación de robot saturado*. En el caso particular en que el cociente sea cero, solo es un caso de asignación particular donde tanto el robot como las máquinas están saturados y no paran nunca de trabajar.

En el caso en que las máquinas no produzcan la misma pieza y además cada una de ellas no produzca siempre las mismas piezas, esta asignación no es tan clara. Además, físicamente no es sencillo ubicar un robot de forma que tenga al alcance muchas máquinas para poder atenderlas a todas. En la práctica a menudo se asignan dos máquinas a cada robot porque es la forma práctica de que el robot las tenga las dos al alcance; a menudo el tiempo del robot es pequeño comparado con el tiempo máquina en marcha, de forma que es poco probable que el robot haga perder tiempo a ninguna de las dos máquinas. Este

es un tema a tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema de producción y hay que tener una estadística de tiempo de máquina y de robot para acabar de determinar la decisión.

En la figura 6 se pueden ver dos robots que atienden tres máquinas cada una.

Figura 6. Robots atendiendo varias máquinas



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Para facilitar el acceso del robot a más de una máquina se puede recurrir a robots móviles, ya sea en el suelo o colgados como se muestra en las figuras 7a y 7b.

Figura 7a y 7b. Robots móviles



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

2.1.2. Maniobra de carga y descarga

La carga y descarga de la pieza requiere un robot o un manipulador que cumpla los siguientes requisitos:

- Tener en su zona de alcance la pieza en bruto, el punto de fijación de la pieza en la máquina y el lugar donde dejar la pieza acabada.
- Poder seguir la trayectoria adecuada para introducir la pieza en la máquina evitando obstáculos y siguiendo la trayectoria adecuada para poder dejarla.
- Garantizar que coge y deja las piezas en posición con la precisión necesaria correspondiente a cada proceso de fabricación y sistema de sujeción.

Estas características convenientemente cuantificadas por las piezas que previsiblemente se realizarán en la célula conducen a la selección del robot adecuado.

El elemento terminal del robot se llama manoy debe ser adecuado para poder coger las piezas. La forma geométrica de las piezas se diseña para que cumplan las funciones que se les requiere para el producto en que se han de montar. A menudo esto no deja grados de libertad para facilitar la sujeción de la pieza durante el proceso de conformación. Por eso es difícil que una misma mano de robot pueda coger todas las piezas que se tienen que fabricar. Puede haber manos que puedan coger un conjunto de piezas caracterizadas por tener alguna característica geométrica común: caras planas paralelas separadas entre x e y mm de distancia, superficies cilíndricas de entre x e y mm de diámetro, etc. Pero en el caso general no hay más remedio que diseñar una mano especial para coger cada pieza. Es una línea de investigación interesante el diseño de una mano universal capaz de coger cualquier pieza. Pero a nivel industrial, hoy en día la solución más práctica consiste en que el mismo robot intercambie la mano cuando tiene que coger piezas diferentes. Por lo tanto, en el caso general, la célula flexible debe estar preparada con un conjunto de manos ubicadas adecuadamente para que el robot se las pueda intercambiar.

La forma más eficiente de hacer la maniobra de carga y descarga de las piezas es que el brazo del robot termine con un actuador de giro a 180° con dos manos una a cada lado. De esta manera la maniobra es la siguiente (Tabla 1):

Tabla 1. Maniobra de carga y descarga de las piezas

Robot	Máquina
Coge con una de las manos una pieza en bruto.	Marcha (terminando la pieza).
Aproxima la pieza justo hasta la puerta del carenado de la máquina.	Marcha (terminando la pieza).
Introduce el brazo dentro de la máquina.	Parada. (Abriendo la puerta del carenado. Sin- cronizada con la maniobra del brazo garanti- zando que no hay colisión.)
Toma la pieza acabada con la mano libre.	Parada.
Parado.	Parada. (Abriendo las mordazas de sujeción de la pieza.)
Retira la pieza terminada, gira el brazo e introduce la pieza en bruto.	Parada.
Parado.	Parada. (Cerrando las mordazas de sujeción de la pieza.)
Retira el brazo de la máquina.	Parada. (Cerrando la puerta del carenado sin- cronizada con el robot para garantizar que no hay colisión.)
Deja la pieza terminada.	Marcha. (Haciendo la siguiente pieza.)

La máquina debe estar equipada con un sistema automatizado de fijación de las piezas, ya sea neumático, hidráulico o eléctrico.

Hay procesos de fabricación en los que no se parte de una pieza en bruto sino de material a granel, como por ejemplo la granza de plástico; en los que la máquina tiene un depósito lleno de material fundido, como en la fabricación de piezas metálicas por inyección; o en los que se parte de rollos largos de chapa o barras o rollos de alambre, etc. En estos casos la automatización de la carga de materia prima sigue un circuito independiente de la retirada de las piezas terminadas y requiere menos maniobras, lo que provoca que la rentabilidad de automatizar sea menor que en el caso de piezas discretas.

En estos casos se deben analizar dos opciones para la retirada de las piezas acabadas. Una es una maniobra similar a la descrita pero sin introducir pieza en bruto. La otra es la de dejar caer en un contenedor la pieza terminada por gravedad o impulsada por un expulsor de la propia máquina.

Cuando se dejan caer las piezas en un contenedor, estas quedan al azar y para poder manipularlas en posteriores operaciones se necesitan equipos de identificación y posicionamiento que se explicarán en el tema de montaje. Estos equipos requieren una inversión e incorporan una operación añadida al proceso. Aun así, dejar caer las piezas a granel tiene dos ventajas respecto de sacarlas cogiéndolas con un robot:

- Se ahorra la inversión del robot.
- El tiempo de ciclo se acorta porque solo hay que esperar el tiempo que tarda la pieza en salir de la zona de trabajo de la máquina para iniciar el siguiente ciclo, mientras que si se quita con un robot antes de iniciar el siguiente ciclo, es necesario introducir el brazo del robot, coger la pieza con la mano del robot, y quitar la pieza y el brazo del robot.

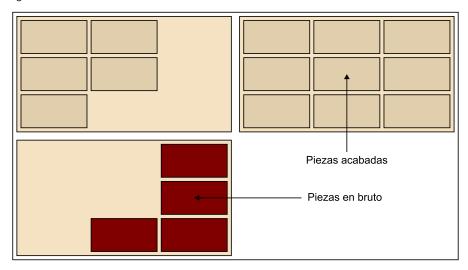
2.1.3. Mesa de trabajo

La mesa de trabajo conviene que tenga cuatro estaciones con espacio para una caja en cada una de ellas. Debe posicionar las cajas con precisión y poder moverse entre las estaciones. Tiene tres modos de trabajo:

- Intercambio de cajas con el sistema de transporte. Esto se hace simultáneamente mientras se fabrican piezas.
- Fabricación de piezas.
- Cambio de posición de las cajas en la tabla. Esto se hace cuando se ha terminado la fabricación de las piezas que caben en una caja.

En las siguientes Figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se ilustran de forma esquemática la mesa en estas maniobras.

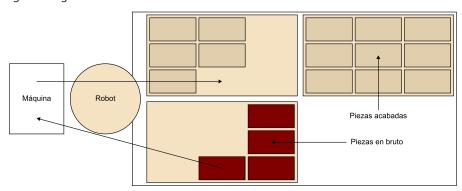
Figura 8. Primera maniobra



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En la situación que se representa hay una caja llena de piezas acabadas y dos cajas medias. En esta situación el robot puede ir alimentando la máquina tomando piezas de la caja de piezas en bruto y dejándolas terminadas en la caja correspondiente:

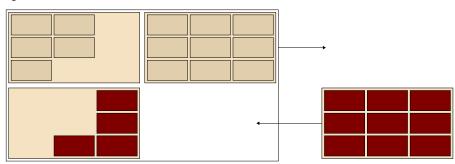
Figura 9. Segunda maniobra



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En esta situación, sin que paren de trabajar la máquina ni el robot, el sistema de transporte puede llevarse la caja de piezas acabadas y dejar otra caja de piezas en bruto.

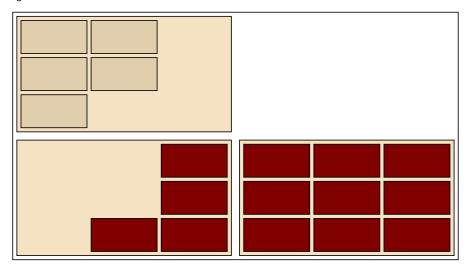
Figura 10. Tercera maniobra



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

De forma que queda:

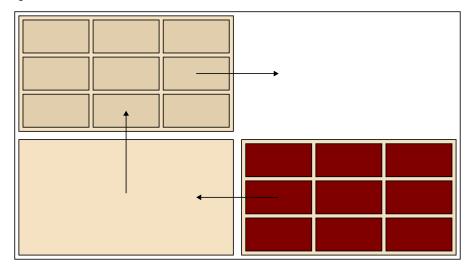
Figura 11. Cuarta maniobra



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Cuando se acaban de fabricar las piezas de una caja, la mesa hace la maniobra de separar la caja con piezas terminadas y poner la nueva caja con piezas en bruto para seguir la producción.

Figura 12. Quinta maniobra



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

2.1.4. Gestión de herramientas

A medida que una herramienta se gasta las piezas que produce van cambiado ligeramente de tamaño a menos que el control numérico compense el desgaste modificando ligeramente la trayectoria de la herramienta respecto de la pieza. Llega un punto en que el desgaste es tal que la herramienta ya no puede hacer piezas de buena calidad y no hay más remedio que cambiarla.

Para que el sistema pueda trabajar de forma automática hay que prever la sustitución de las herramientas gastadas antes de que empiecen a producir piezas defectuosas. Hay varios enfoques para prever el desgaste de una herramienta:

- 1) Contar el número de piezas que lleva hechas.
- 2) Contar el tiempo que lleva trabajando.
- 3) Contar los mm³ de material que ha arrancado.
- 4) Medir la fuerza de corte.
- 5) Medir el tamaño de las piezas que fabrica.
- 6) Medir el tamaño de la herramienta.

Los tres primeros enfoques están midiendo lo mismo de formas diferentes. De los tres, el factor que tiene una correlación más directa con el desgaste de la herramienta son los mm³ de material arrancado. Pero el número de piezas es el mismo si se multiplica cada pieza por los mm³ que la herramienta arranca en la pieza y el tiempo es el mismo si cada periodo de tiempo se multiplica al volumen de material arrancado por unidad de tiempo. Es una cuestión de organización de la base de datos y del nivel al que se hace el control. La información del número de piezas está disponible a nivel del sistema de gestión de la producción, mientras que el tiempo de corte y los mm³ de material arrancado están disponibles en cuanto a las instrucciones de detalle escritas en el programa de control numérico. El problema de estos enfoques es que dan por hecho que todas las herramientas tienen la misma resistencia al desgaste y que todas las piezas provocan en la herramienta el mismo desgaste. Se procura que los materiales de las herramientas y de las piezas tengan propiedades uniformes y que esta hipótesis se aproxime a la realidad, pero no se puede conseguir nunca la uniformidad perfecta, por lo tanto hay que acabar con un compromiso entre cambiar la herramienta antes y perder parte de su vida útil o cambiarla más tarde y correr el riesgo de que algunas herramientas empiecen a fabricar piezas defectuosas antes de ser cambiadas.

Los tres últimos enfoques requieren que se disponga de sensores adicionales que no todas las máquinas de control numérico tienen de serie.

La medida de la fuerza de corte es una forma indirecta de determinar el desgaste de las herramientas. A medida que las herramientas se gastan la fuerza de corte aumenta y de esta manera se puede determinar el momento óptimo para cambiar la herramienta de forma que se haya agotado toda su vida útil sin que haya empezado a fabricar piezas defectuosas. Una ventaja de este enfoque es que la fuerza de corte provoca deformaciones elásticas en el mango de la herramienta, en el carro portaherramientas y la bancada de la máquina en general. Si se dispone de sensores que den información del vector fuerza de corte en cada momento el control puede diseñarse de forma que compense total o parcialmente estas deformaciones y de esta manera obtener una máquina con una capacidad de fabricación de piezas de superior calidad. El problema es que la fuerza de corte no solo varía al gastarse la herramienta, sino que también

varía si las propiedades del material de la pieza tienen ciertas irregularidades o si varía la temperatura. Además hay que tener determinada la fuerza de corte de la herramienta nueva y de la herramienta gastada para que el sistema pueda tomar la decisión de hacer la sustitución de la herramienta por una nueva. En combinación con la medida de la fuerza de corte se han propuesto sistemas de medida de las vibraciones o el ruido del corte.

La **medida del tamaño de la pieza** es un requisito para la gestión de la calidad. Se puede hacer en la misma máquina montando una herramienta que hace de sensor o en una estación de medida diferente. Más adelante se comentan estos dos casos. El problema es que la variabilidad en el tamaño de la pieza depende de más factores aparte del desgaste de la herramienta.

La **medida de la herramienta** es el método directo para determinar el momento óptimo de cambio. No obstante, necesita que la máquina tenga instalado un sensor con capacidad para determinarla.

2.1.5. Gestión de la calidad

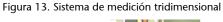
En los sistemas de fabricación convencionales en los que las máquinas son atendidas por operarios, se pueden definir sistemas de autocontrol en que los mismos operarios que hacen las piezas las verifican y detectan cuando un proceso sale fuera de control. De este modo se evita seguir produciendo piezas defectuosas y que las piezas defectuosas sigan el proceso de fabricación, con lo que se gasta dinero en unas piezas que no cumplen los requisitos. En los sistemas automáticos y flexibles no se dispone de un operario a pie de máquina a quien se pueda dotar de instrumentos de medida y asignarle esta tarea. Además, cuando hay operarios verificando la calidad, aunque no se haya definido un protocolo de verificación detallado de las piezas, cuando aparecen defectos que son muy aparentes a la vista, los operarios reaccionan y evitan que los problemas vayan a más. Esto en los sistemas automáticos no existe y hay que preverlo todo.

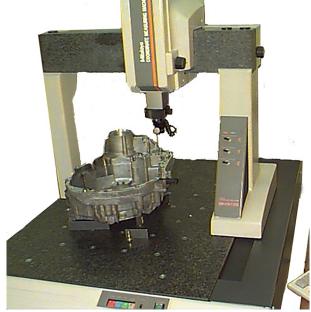
Por eso, cuando se fabrican piezas con sistemas automáticos hay que hacer un análisis de modos de fallo (AMFE) y diseñar un proceso de control de calidad en cada fase del proceso de fabricación. Para realizar este control es necesario utilizar instrumentos de medida universales que se puedan automatizar. Para ello se pueden utilizar sensores dispuestos en la misma máquina o se pueden poner en la línea de producción estaciones de trabajo de verificación.

Los sensores dispuestos en la misma máquina son una solución sencilla y que sirve también para fijar automáticamente el decalaje del origen de las piezas. Pero tiene el problema de que no pueden detectar con seguridad los defectos. Si un defecto es debido a que la máquina no está bien calibrada el sensor repite el mismo error que al mover la herramienta y no detecta la diferencia. Si el error se debe a la pieza o la fuerza de corte entonces sí que lo detecta.

Las estaciones de verificación tienen la ventaja de ser sistemas independientes de la máquina que ha fabricado la pieza. Hay que tener en cuenta el tiempo que pasa desde que la pieza ha sido fabricada hasta que llega a la estación de verificación y en caso de detectar un defecto se debe tener en cuenta el hecho de que todas las piezas que ha hecho la estación de trabajo hasta ese momento pueden estar comprometidas si es que el defecto se ha debido a un desajuste de la máquina.

Las estaciones de verificación son estaciones flexibles como las de fabricación. Disponen de una mesa de trabajo, de un robot y de la máquina, que en este caso es una máquina de verificación. Puede ser una máquina de medición tridimensional como la de la figura 12 o un sistema basado en visión por ordenador.





Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

2.2. Línea de fabricación flexible

Una línea de fabricación flexible está compuesta por un conjunto de células de fabricación flexibles conectadas con un sistema de transporte automático. Las células de la línea contienen máquinas diferentes que trabajando sucesivamente permiten hacer piezas acabadas de una determinada variedad (Figuras 14 y 14b).

El sistema de transporte coge y deja cajas de piezas entre estaciones o con el almacén automático tal como se comenta más adelante.

Figura 14a y 14b. Líneas de fabricación flexible





Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Cada pieza tiene que pasar por las máquinas en el orden determinado por el proceso tecnológico de fabricación. Pero hay un grado de libertad a la hora de decidir el orden en que las máquinas procesan las diferentes piezas que hay en la cartera de pedidos. Escogiendo adecuadamente este orden se puede optimizar la productividad de las instalaciones. El sistema de gestión de la línea utiliza algoritmos que resuelven "el problema del taller mecánico" (workshop problem) para optimizar este rendimiento. (Hay mucha literatura que ilustra estos algoritmos.)

Con el fin de configurar una línea flexible de fabricación, es necesario combinar varias células de fabricación flexibles con un sistema de transporte y tener definidas unas cajas estándar que puedan contener cualquiera de las piezas a fabricar en la línea.

2.2.1. Cajas

Las cajas con que se almacenan y se transportan las piezas tienen un papel importante en todo el concepto de la fábrica flexible. Son un elemento común que interacciona con las células de fabricación, con los sistemas de transporte y con los almacenes automáticos.

Las cajas se posicionan por su exterior en las mesas de trabajo y alojan en su interior las piezas. La precisión con que se hacen estos dos posicionamientos garantizará que los robots puedan coger las piezas. La parte exterior se puede diseñar libremente con superficies de anclaje y de contacto que garanticen la posición con precisión, pero la parte interior debe adaptarse a la forma de las piezas, que no puede quedar condicionada por el sistema de fabricación dado que deben cumplir los requerimientos de funcionalidad dentro de los productos en los que se han de montar. La solución a este problema es la fabricación de plantillas con chapas metálicas intercambiables en que se corta el perfil de las diferentes piezas que han de moverse por el taller.

2.2.2. Sistemas de transporte

Los sistemas de transporte automático se pueden clasificar en dos grupos. Por un lado, están todos los que se pueden llamar "caminos activos": cintas (Figura 14a), caminos de rodillos (figura 14b), cadenas, monorraíles, transportadores magnéticos, etc. Por otro lado, están los vehículos automáticos.

Figuras 15a y 15b. Cinta transportadora y rodillos



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Los caminos activos son rígidos en cuanto al recorrido dado que solo pueden transportar cajas a lo largo del recorrido donde se han instalado. Su flexibilidad se limita a la libertad de escoger entre las estaciones de entrada y salida de las cajas. La capacidad de transporte queda determinada por la velocidad y el tamaño de las cajas y es independiente de la distancia. Por ejemplo, si una cinta transportadora se mueve a una velocidad de 1 m/s i las cajas que transporta están separadas 0,5 m tendrá una capacidad de transporte de 2 cajas/segundo independientemente de la distancia entre estaciones. La distancia solo influirá en el número de cajas encima de la cinta, pero cada segundo pueden entrar dos cajas por un extremo y saldrán dos por el otro. La inversión será proporcional a la longitud del recorrido a seguir e independiente de la cantidad de producto a transportar.

Los vehículos automáticos (AGV, del inglés *Automatic Guided Vehicle*) (Figura 16), se mueven conjuntamente con las cajas que transportan; por tanto, su capacidad de transporte depende de la distancia entre las estaciones, la velocidad de los vehículos y el número de vehículos disponibles. La inversión será proporcional al número de vehículos y, por tanto, también proporcional a la capacidad de transporte necesaria. En general para distancias cortas con necesidad de gran capacidad de transporte serán más económicos los caminos activos, mientras que para distancias largas con poca necesidad de capacidad de transporte serán más económicos los vehículos automáticos.

Figura 16. AGV



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

La flexibilidad en las rutas de transporte de los vehículos automáticos depende del sistema de guiado. Los robots filoguiados y los optoguiados siguen un camino establecido previamente con un hilo enterrado o con una raya pintada en el suelo. Estos vehículos deben seguir necesariamente rutas preestablecidas por las guías y para cambiarlas hace falta una intervención más o menos compleja en la infraestructura de la fábrica. Los vehículos radioguiados y los que emplean sistemas de navegación automática tienen la flexibilidad de poder cambiar y definir nuevas rutas sin necesidad de modificar las infraestructuras.

2.3. Taller flexible

El taller flexible está compuesto por varias líneas de fabricación flexible con almacenes automáticos y líneas de montaje flexibles. Las líneas de montaje se estudiarán en otro tema. En este punto se comentan solo los almacenes automáticos.

Aunque las células de fabricación flexible trabajen con lote unitario o mínimo y las piezas pasen directamente de una célula a otra de la línea hasta ser terminadas, hay que tener cierta capacidad de almacenaje; fundamentalmente por dos motivos: el transporte y el montaje. Por un lado, las materias primas y los productos terminados se envían y se reciben en cantidades adecuadas para optimizar los costes de transporte (cajas, palés o contenedores enteros). Además, entre transporte y transporte pasa un tiempo; por lo tanto, hay que tener capacidad de almacenaje para permitir un flujo de producción regular, aunque el transporte sea a intervalos discretos. Por otra parte, el montaje requiere la confluencia de varias piezas y componentes en un mismo producto. Cada pieza se fabrica al ritmo que minimiza sus costes de acuerdo con la tecnología disponible en cada momento, por lo cual no todas las piezas se fabrican al mismo ritmo. Si no hubiera un almacén intermedio entre la fabricación y el montaje todas las piezas se deberían producir al mismo ritmo que

el montaje de productos y esto haría trabajar algunas líneas por debajo de su capacidad. Por tanto, conviene tener capacidad de almacenamiento, de forma que las piezas que se puedan fabricar a un ritmo superior al necesario se puedan acumular, y destinar la capacidad de producción a hacer piezas diferentes mientras la línea de montaje nos nutre de piezas almacenadas.

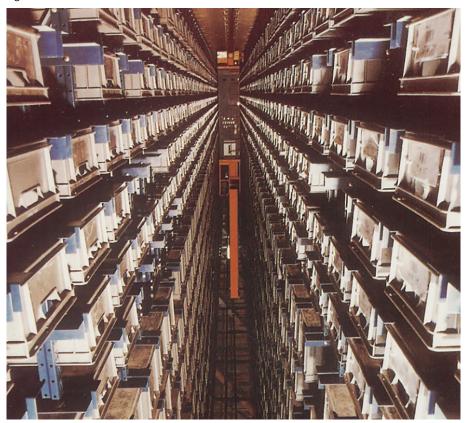
La capacidad de almacenamiento se calcula en función de estos dos factores: volúmenes de envíos de materias primas y productos acabados, y necesidades de almacenamiento de piezas en espera de ser montadas.

2.3.1. Almacenes automáticos

Los almacenes automáticos (Figura 17) constan de:

- Un conjunto de estanterías dimensionado de forma que tengan la capacidad requerida.
- Robots transelevadores en cantidad adecuada para garantizar el número necesario de maniobras de entrada y salida del almacén por unidad de tiempo.
- Una o más mesas de trabajo (una por cada transelevador) similar a la de las estaciones de trabajo para desacoplar las maniobras del almacén del movimiento del sistema de transporte.
- Un sistema de gestión que mantiene actualizado el contenido de cada ubicación, determina las ubicaciones para las cajas entrantes y optimiza los recorridos de los transelevadores.

Figura 17. Almacén automático



Fuente: Gomà J. R., et al., 2010

3. Procesos directos versus procesos indirectos

Al principio del tema se ha dicho que el tiempo de preparación de la máquina conduce a la producción por lotes, lo que dificulta mucho la producción automática, flexible e integrada. Una forma de atacar el problema es reducir al mínimo el tiempo de preparación de la máquina, pero la manera de eliminar el problema es emplear procesos de fabricación que no utilicen utillajes.

Los procesos que no utilizan utiliajes se llaman *procesos directos* porque pueden fabricar las piezas directamente con máquinas y herramientas universales, mientras que los que necesitan utiliajes se llaman *indirectos*, dado que no pueden fabricar las piezas directamente, sino que primero deben fabricar los utiliajes para después emplearlos para fabricar las piezas.

Una reflexión interesante a la hora de analizar los procesos directos e indirectos se basa en el hecho de que para cambiar la forma de la materia hace falta aplicar energía. La energía para cambiar la forma se puede aplicar concentrada en un punto concreto y, progresivamente en el tiempo, ir cambiando de punto hasta barrer todo el volumen o toda la superficie de la pieza.

Una alternativa es aplicar esta energía simultáneamente en todo el volumen de la pieza. Pues bien, los procesos que aplican energía concentrada en un punto concreto no necesitan utillajes porque la herramienta que actúa sobre la pieza se puede controlar para que se mueva en el espacio y vaya aplicando la energía donde haga falta. Por ejemplo, están los procesos de torneado, fresado, rectificado, deposición de hilo fundido, sinterizado selectivo por láser, mecanizado láser, etc. En cambio, los que aplican energía simultáneamente en todo el volumen necesitan un elemento que tenga la forma de la pieza final para controlar esta aplicación; es el caso de los procesos de fundición, forja, estampación, extrusión, etc.

El proceso de fabricación de una pieza viene condicionado por la forma en que se tiene que obtener y el material de la pieza. Este proceso, además de dar forma a la materia, también afecta a menudo a sus propiedades físicas. Esto hace que el proceso quede altamente condicionado por la pieza. Pero muchas veces existe la posibilidad de escoger entre procesos alternativos para fabricar la misma pieza, por lo que puede aparecer el dilema entre escoger un proceso de fabricación directo o alternativamente uno indirecto.

Para los casos en que el estado actual de la técnica no ofrece más alternativa que emplear un proceso de fabricación indirecto, hay un alto interés en poner en marcha proyectos de investigación y desarrollo de procesos de fabricación directos que permitan obtener las mismas piezas y así facilitar la aplicación los conceptos de fabricación automática, flexible e integrada, produciendo con lotes pequeños.

A continuación, se hace un repaso de los principales procesos de fabricación de piezas mecánicas y se identifican las posibles alternativas de fabricación directa o las líneas de investigación y desarrollo tecnológico que están en desarrollo.

Finalmente se cuenta cómo determinar cuándo conviene más aplicar los procesos directos o indirectos en aquellos casos en que se puede elegir entre dos alternativas.

3.1. Procesos sustractivos

Los procesos que se basan en sustraer material de la superficie de la pieza tienen una gran importancia en la industria porque permiten obtener piezas de cualquier tipo de material y con precisiones geométricas muy altas. Estos procesos separan el problema de obtener la materia prima y sus características y propiedades del problema de darle forma. Para ello se aplican a cualquier tipo de material, desde metales, plásticos, vidrio, cerámica, madera o piedra natural.

Figuras 18a y 18 b. Sustracción de material: fresado y láser

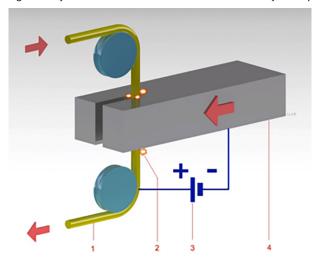


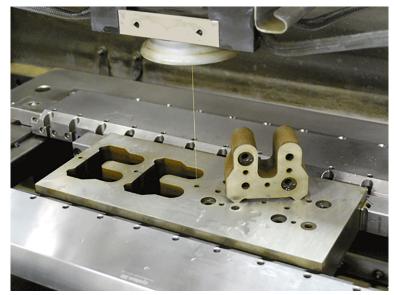
Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Además, son los que permiten garantizar una precisión y exactitud dimensional más altas a base de utilizar la estrategia de ir arrancando material sin pasarse en cantidades tan pequeñas como sea necesario hasta alcanzar la forma deseada con precisión.

Dentro de esta familia de procesos hay procesos clásicos como el torneado, el fresado (Figura 18), el taladrado o el rectificado, y procesos que se han desarrollado en el siglo XX como el mecanizado láser (Figura 18b), la electroerosión o el corte por chorro de agua (Figuras 19 y 20).

Figuras 19 y 20. Sustracción de material: electroerosión y corte por chorro de agua





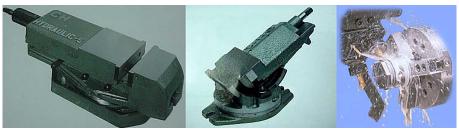
Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

La diferencia entre unos y otros radica en el principio físico que emplean para conseguir la eliminación del material. El fresado, el torneado o el taladrado se basan en que una o unas cuchillas de corte de material más duro que el de la pieza arañan su superficie arrancándole material. El mecanizado láser se basa en focalizar en un punto muy reducido de la superficie del material un haz de luz láser de alta potencia que provoca un aumento repentino de la temperatura y esto hace que se desprenda una partícula de material. La electroerosión se basa en hacer saltar chispas entre un electrodo y la pieza. El electrodo se hace de un material que sea buen conductor del calor y de la corriente y que resista temperaturas muy altas de forma que la intensidad de la corriente de la chispa provoque un aumento repentino de la temperatura en la superficie de la pieza y se desprendan partículas de la pieza pero no del electrodo. El corte por agua se basa en hacer chocar un chorro de agua a alta velocidad, a veces con partículas de material abrasivo en suspensión, contra la superficie de la pieza.

En general estos procesos de fabricación aplican energía en un punto concreto de la superficie de la pieza y, comprobando con control numérico la posición de este punto, se pueden fabricar piezas diferentes sin necesidad de utillaje. Por lo tanto, son procesos de fabricación directos y son los que se utilizan para fabricar los utillajes de los procesos indirectos.

Sin embargo, exigen a veces la utilización de utiliajes para la sujeción de la pieza en la máquina. Cuando las piezas en bruto tienen formas geométricas sencillas, fundamentalmente cilíndricas o prismáticas, las piezas se pueden sujetar con sistemas universales como las mordazas o las garras.

Figuras 21a, 21b y 21c. Sistemas de sujeción universales



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Cuando las piezas tienen formas complejas, si presentan superficies planas, en donde fijarlas con bridas, se pueden sujetar también con sistemas universales apretando con bridas directamente en la mesa de la máquina o con los llamados *utillajes universales*, que en función de la combinación de escuadras y bridas permiten obtener multitud de combinaciones de posición de fijación.

Figuras 22. Sujeción por bridas



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En el caso más genérico en que las piezas presentan superficies curvas por todas partes, no hay más remedio que recurrir a utillajes de sujeción específicos diseñados y fabricados expresamente para cada pieza.

3.2. Moldeo

Los procesos de obtención de piezas por moldeo se basan en el principio de que los líquidos adoptan la forma del recipiente que los contiene. La estrategia consiste en crear un recipiente con la forma adecuada, llenarlo de líquido y de alguna manera lograr que el líquido pase a sólido conservando la forma. La manera de conseguir que el líquido pase a sólido puede basarse en reacciones químicas como cuando se amolda una mezcla de poliol con isocianato que es líquida pero que reacciona químicamente para formar poliuretano, que es sólido. Pero el método más frecuente es fundir primero un material calentándolo, llenar el molde con el material fundido y luego dejarlo enfriar para que solidifique dentro del molde. Por eso, a menudo estos procesos se denominan de fundición.

Dentro de los procesos de moldeo, se distinguen los que usan un molde permanente y los que para cada pieza hacen un molde que se rompe para extraerla.

Los **procesos con molde permanente** (Figuras 23 y 24) se pueden aplicar tanto a metales como plásticos.

Figuras 23 y 24. Procesos con molde permanente





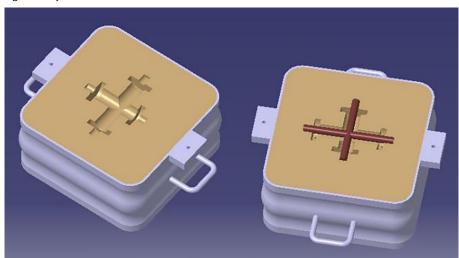
Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Estos procesos, por su propia naturaleza, son indirectos y requieren la fabricación previa del molde antes de poder fabricar las piezas. Cada vez que se quiere fabricar piezas hay que montar el molde en la máquina y eso requiere

un tiempo de preparación que conduce a lotes de fabricación relativamente grandes. En algunos casos se fabrican moldes con postizos que se pueden retirar o introducir y permiten fabricar pequeñas variantes de una pieza y eso da una cierta flexibilidad al molde, pero es muy limitada.

El **moldeo con molde de tierra** (Figuras 25 y 26) se puede considerar un proceso doblemente indirecto. Primero, a partir de placas modelo y cajas de noyos se fabrican los medios moldes y los noyos que se montan para formar los moldes.

Figuras 25 y 26. Moldeo con molde de tierra





Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Después los moldes se llenan de metal fundido (Figura 23) y cuando solidifica se rompen.

Figura 27. Llenado de moldes



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En las fundiciones altamente automatizadas, el molde se puede considerar como parte de la pieza. El proceso es totalmente automático y para cambiar de pieza solo hay que cambiar las placas modelo, las cajas de noyos, los programas de los robots que montan los noyos, los moldes y que también realizan el desbarbado. Se puede hacer con robots con muelas en lugar de hacerlo con prensas y matrices. Por tanto, el proceso puede convertirse en un proceso directo si los moldes, en vez de obtenerse a partir de modelos y cajas de noyos, se obtienen con procesos directos aditivos o sustractivos. Hoy en día los procesos directos para obtener los moldes de tierra son mucho más lentos que los indirectos y esto hace que solo se utilicen procesos directos para la fabricación de prototipos. Pero si la investigación tecnológica consigue aumentar la velocidad de fabricación de moldes con procesos directos, la fundición con molde de tierra podría pasar a ser un proceso directo.

El **fundido a la cera perdida o microfusión**. La obtención de piezas por el proceso de la cera perdida (Figura 28) u otros análogos es un proceso doblemente indirecto. Primero se obtiene el modelo de cera con un molde y luego con el modelo de cera se obtiene un molde de escayola y se quita el modelo fundiéndolo. Con este molde se obtiene la pieza que se extrae destruyendo el molde. Finalmente se realiza el desbarbado.

Figura 28. Fundido a la cera perdida



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En sistemas automatizados se puede considerar que tanto los modelos como los moldes son parte de la pieza que se rechaza en el proceso y que el utillaje no es más que el molde inicial para obtener el modelo. Obteniendo este modelo con procesos directos (por ejemplo, con impresoras 3D) este proceso pasa a ser un proceso de fabricación directo. Hoy en día, fabricar los modelos con impresoras 3D es mucho más lento que hacerlos con molde, sobre todo si la calidad superficial debe ser alta. Por eso solo se utiliza para prototipos, pero si la tecnología progresa en el sentido de hacer piezas de forma más rápida y económica, con impresión 3D este proceso puede pasar a ser directo.

3.3. Forja

El proceso de forja, así como el de extrusión, se basa en someter las piezas de material dúctil a un estado de tensión que supere su límite elástico, de forma que sufra una deformación permanente.

Figura 29. Forja de estampa



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En el caso de la forja, este estado de tensión se logra o bien comprimiendo el material entre dos piezas que pueden tener formas sencillas (martillo y yunque) –en cuyo caso se denomina forja libre– o bien comprimiéndolo entre dos piezas que tienen la forma de la pieza a obtener (estampas). En este caso se llama forja con estampa (Figura 30).

Figura 30. Forja con estampa



La forja libre se utiliza normalmente como un proceso previo a la forja con estampa para dar una preforma al material. La forja con estampa es, por naturaleza, un proceso indirecto que necesita hacer primero las estampas antes de fabricar la primera pieza.

Tradicionalmente se había practicado la forja artística, que es una variante de la forja libre, en la que un artesano a base de golpear varias veces con martillos de diferentes formas consigue ir dando forma al material hasta alcanzar la forma final de la pieza deseada. Un proceso de control numérico que imitara la forja artística podría ser una posible alternativa a la forja con estampa para obtener piezas forjadas y hacer que la forja pasara a ser un proceso directo. En el estado actual de la técnica no se ha alcanzado este desarrollo.

3.4. Chapa

La fabricación de piezas a partir de chapa tiene un interés económico e industrial muy grande debido a que se pueden obtener con una calidad alta y unos costes muy competitivos. Por eso hay una serie de procesos de fabricación especializados al usar esta materia prima.

Las piezas se obtienen combinando tres operaciones básicas:

- 1) corte,
- 2) doblar y curvar,
- 3) embutir.

Para cortar la chapa se la somete a un esfuerzo cortante que supera el límite elástico y provoca la aparición de grietas que se propagan por el espesor de la chapa hasta encontrarse y separarla.

Para doblarla o para curvarse se la somete a un momento flector que le provoca un estado de tensión que supera el límite elástico, lo cual provoca una deformación plástica en que unas fibras se contraen y otros estiran resultando el pliego o la curvatura.

La embutición permite obtener piezas con curvatura doble. Por ejemplo, pasar de una chapa plana a una esférica. Para lograrlo se la obliga a deslizarse entre dos cavidades que se cierran. El estado de tensión a que se somete el material es de tracción en una dirección y compresión en el otro.

Combinando estas tres operaciones fundamentales se pueden obtener piezas muy complejas con una sola maniobra de un utillaje llamado matriz, hecho a medida para fabricar cada pieza concreta.

La fabricación de piezas de chapa (Figura 31a y 31b) con prensa y matriz obtiene gran cantidad de piezas en poco tiempo, pero es un proceso indirecto por su propia naturaleza. La matriz puede ser un mecanismo de alta complejidad y precisión.

Figura 31. Fabricación de piezas de chapa



Fuente: Gomà Gomà, J. R. et al., 2010

Las cizallas (Figura 32) son un proceso directo empleado tradicionalmente para el corte de chapa. Están limitadas a cortes rectos y normalmente se usan en una operación previa antes de alimentar la chapa en las matrices.

Figura 32. Cizalla



Con la aparición del control numérico se desarrollaron procesos directos de corte de chapa que permiten cortar contornos arbitrarios (Figura 33). Básicamente hay que mencionar las punzonadoras, el corte por láser y el corte por chorro de agua.

Figura 33. Otros cortes de chapa



Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

Las **punzonadoras** funcionan con el mismo principio de corte que las matrices, pero con un conjunto de punzones y matrices estándar que pasan a ser herramientas. La punzonadora cambia automáticamente estas herramientas desde un almacén para alcanzar los diferentes tipos de corte. La máquina mueve la chapa por debajo del punzón haciendo los cortes en las posiciones adecuadas; solapando varios cortes consigue cortar los perfiles de las piezas.

Las punzonadoras son muy eficientes para hacer cortes en líneas rectas pero en líneas curvas hay que solapar muchos cortes con punzones circulares, con lo que se ralentiza el proceso.

Figura 34. Cortes de chapa con láser



Una alternativa para aumentar la velocidad de los cortes en línea curva es el **corte por láser**, que se basa en focalizar en un punto la luz de un láser de alta potencia, lo que provoca un aumento repentino de la temperatura y hace que se desprenda el material de este punto.

Hay máquinas que tienen simultáneamente dos cabezales, uno de punzonado y un láser. De esta manera ganan velocidad en los cortes rectos empleando el punzonado y en los curvos con el láser.

A veces es un problema utilizar el láser para cortar ya que el aumento de temperatura en el punto de corte provoca cambios en las propiedades del material que se corta.

Una alternativa al láser, que elimina este problema, es el **corte por chorro de agua**. Se basa en proyectar un chorro de agua a alta velocidad en el punto que se quiere cortar. En el caso de corte de láminas de plástico, con agua sola es suficiente, pero para cortar metales o materiales cerámicos el agua lleva partículas abrasivas en suspensión que son las que provocan el corte.

Las tecnologías mencionadas anteriormente permiten transformar en un proceso directo el corte de chapa. Para plegar chapa, tradicionalmente ha habido plegadoras que permiten obtener pliegues de un ángulo fijo. La aplicación del control numérico a estas máquinas ha permitido desarrollar plegadoras de control numérico que combinan tres características:

- 1) Plegado al aire de alta precisión gracias a sensores que permiten medir el retorno elástico y compensarlo.
- 2) Cambio automático de herramientas (punzón y matriz) para diferentes tipos de pliegues.

3) Manipulador que presenta automáticamente la chapa en el punto de pliego para alcanzar diferentes pliegues y combinarlos en la misma pieza.

Figura 35. Plegadora de chapa



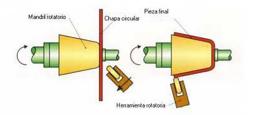
Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

La combinación de las tecnologías directas de corte de chapa con plegadoras de control numérico permite fabricar con proceso directo muchas piezas que antes se tenían que fabricar con el proceso de prensa y matriz, que es indirecto.

En la embutición de chapa también se han desarrollado alternativas para obtener las piezas con procesos directos. El caso más sencillo se da cuando las piezas tienen simetría de revolución. En este caso, tradicionalmente, se disponía del proceso de **repujado** (Figura 36a y 36b), que consistía en hacer girar la chapa con una máquina como un torno y empujarla con unas barras haciendo que se fuera deformando progresivamente hasta hermanarla con un modelo que se montaba junto con la chapa. Con el desarrollo del control numérico han aparecido tornos de repujado de control numérico en que la herramienta se mueve por control numérico y puede tener dos herramientas, una por cada lado, que acompañan a la chapa y la obligan a deformarse sin necesidad de modelo.

Figuras 36a y 36b. Repujado





Fuente: Gomà, J. R. et al., 2010

En el caso general, ha habido un gran interés en el desarrollo del proceso de conformado con múltiples puntos (Figura 37) que se puedan cambiar de posición por control numérico (*multi-point forming*). La idea consiste en reproducir una matriz que cambia su forma y sirve para embutir cualquier pieza dentro de ciertos límites de tamaños y curvaturas.

Figura 37. Multi point forming



Actualmente, este proceso no pasa de ser una línea de investigación y no hay equipamiento industrial, basado en este concepto, disponible en el mercado.

3.5. Procesos de fabricación aditiva

A lo largo del último cuarto del siglo XX se fueron desarrollando una serie de procesos de fabricación conocidos por la expresión genérica de *procesos de fabricación aditiva*, que consisten en ir añadiendo material por capas hasta obtener la pieza de la forma deseada.

Estos procesos, por su propia naturaleza, son procesos directos y además, en el estado actual de la técnica, tienen una ventaja muy importante respecto de los procesos de fabricación sustractiva: hay un algoritmo muy sencillo que permite obtener el programa de control numérico necesario para fabricar la pieza directamente a partir del dibujo en tres dimensiones. Esta ventaja es lo que provocó el interés en el desarrollo de estas tecnologías, que se han empleado inicialmente para la fabricación de prototipos.

Las diferentes tecnologías se diferencian en los principios físicos y químicos que utilizan para ir añadiendo las capas de material. En general tienen dos inconvenientes: por un lado, el proceso en sí condiciona mucho el tipo de material del que pueden estar hechas las piezas y, por otro lado, el tiempo de fabricación es muy lento comparado con alternativas sustractivas, y aún más si se compara con sistemas indirectos.

Además, permiten hacer piezas con formas geométricas imposibles con otros procesos o con materiales que varían su composición de forma progresiva en el espacio, abriendo la puerta al diseño de piezas que exploten estas dos características.

En este texto no se dedica más detalle a estudiar estas tecnologías dado que requieren un texto completo aparte.

3.6. Selección entre procesos directos e indirectos

Los procesos de fabricación directos tienen dos ventajas claras: no requieren una inversión inicial en tiempo y dinero en la construcción de ningún utillaje y no requieren el tiempo necesario de preparación de la máquina para cambiar el utillaje cuando se quiere hacer una pieza diferente. Esta última ventaja, además, facilita mucho la automatización y también consigue que el lote óptimo pase a ser unitario, lo que hace cambiar totalmente el enfoque de la gestión de la producción.

Esto los hace muy atractivos desde el punto de vista industrial, pero en la industria aún se usan muy a menudo procesos indirectos. Como se ha discutido en el apartado anterior hay casos en que, debido a la forma de la pieza o a las propiedades del material, no hay alternativa tecnológica, en el estado actual de la técnica, a un proceso indirecto. Pero en muchos casos sí hay alternativa y de esta manera los dos procesos conviven y son competitivos en la industria.

Está claro que el único motivo para que convivan es que los procesos directos, o bien son más lentos, o bien requieren una inversión en maquinaria superior que los indirectos; de otro modo los procesos indirectos habrían quedado obsoletos.

Se trata de estudiar cuando conviene aplicar los directos y cuando los indirectos en estos casos donde conviven ambos tipos de procesos. La respuesta a esta cuestión es un poco ambigua porque el resultado es diferente si el análisis se hace desde un punto de perspectiva corto, en que solo se comparan las dos alternativas; o si se hace con un punto de perspectiva más largo, en que se tiene en cuenta que la alternativa de utilizar el proceso directo facilita la automatización flexible de la fábrica.

Además se pueden contemplar dos objetivos de interés industrial. Uno es la capacidad de respuesta rápida ante un pedido de un cliente: ¿Qué proceso permite entregar antes el pedido de un lote de piezas L? El otro es el coste de producción de las piezas: ¿Qué tecnología conduce a un coste unitario menor?

Denominaciones:

• *L* (número de piezas): El lote con que se fabrican las piezas que para simplificar se supone que coincide con el lote del pedido que hace el cliente.

- *S* (número de piezas): Serie de piezas a fabricar a lo largo de la vida útil del producto.
- *Tp* (minutos): Tiempo de preparación de la máquina en el proceso indirecto.
- *Tci* (minutos): Tiempo de ciclo del proceso indirecto.
- *TCD* (minutos): Tiempo de ciclo del proceso directo.
- *Ti* (minutos): Tiempo de fabricación de un lote con el proceso indirecto.
- *Td* (minutos): Tiempo de fabricación de un lote con el proceso directo.
- *Imi* (euros): Inversión en máquina del proceso indirecto.
- Am (años): Periodo de amortización en años de la máquina.
- *Chmi* (euros / minuto): Coste por minuto de la ocupación de espacio, consumo de energía y mantenimiento de la máquina del proceso indirecto.
- *Iu* (euros): Inversión en utillajes del proceso indirecto.
- IMD (euros): Inversión en máquina del proceso directo.
- *Chind* (euros / minuto): Coste por minuto de la ocupación de espacio, consumo de energía y mantenimiento de la máquina del proceso directo.
- IPD (euros): Inversión en programa de control numérico del proceso directo.
- Pam (años): Período de amortización de la maquinaria en años.
- *Ch* (euros / minuto): Coste por minuto de la mano de obra.
- Cs (euros / año): Coste de conservar en stock una pieza durante un año.
- *Ht* (horas): Horas anuales de cada turno de trabajo.
- *Ta*: Número de turnos de trabajo en un sistema automatizado.
- *Tm*: Número de turnos de trabajo en un sistema manual.
- Oa: Número de máquinas que lleva cada operario en un sistema automatizado.
- V (años): Años de vida del producto durante los que se prevé hacer la serie S.

3.6.1. Análisis basado en el proceso concreto

En una perspectiva corta, la selección sin tener en cuenta el hecho de que los procesos directos facilitan la automatización flexible e integrada de la fábrica es un planteamiento conservador. Si el resultado es que el sistema directo es preferible, la decisión seguro que es acertada porque puede que aún tenga más ventajas que las que se han tenido en cuenta en el análisis. Pero si el resultado es que es preferible el proceso indirecto, solo se tiene la garantía de que es un resultado acertado si no hay expectativas razonables de pasar de un sistema de fabricación convencional a uno automático, flexible e integrado.

Capacidad de respuesta rápida

El tiempo necesario para completar un lote con el proceso indirecto será el necesario para preparar la máquina más el tiempo necesario para hacer los ciclos hasta fabricar el lote:

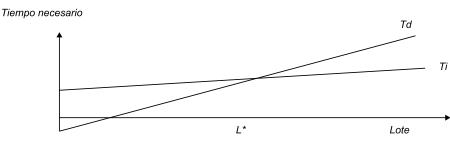
$$Ti = Tp + L * Tci$$

En cambio, el tiempo con el proceso directo no requiere tiempo de preparación y solo necesita el tiempo de realizar los ciclos:

$$Td = L * Tcd$$

Si el tiempo de ciclo del proceso directo fuera igual o inferior al del proceso indirecto, entonces siempre acabaría de fabricar el lote antes del indirecto y solo tendría sentido considerar el directo. Suponiendo que el tiempo de ciclo del proceso indirecto sea menor que el del proceso directo y representando gráficamente en la Figura 38 estos dos tiempos en función del tamaño del lote resulta:

Figura 38. Proceso directo e indirecto



Fuente: elaboración propia

El proceso indirecto parte del tiempo de preparación de la máquina, mientras que el directo no tiene ese tiempo. Esto hace que, para lotes menores que un determinado valor, sea más rápido el proceso directo, mientras que para lotes superiores a este valor sea más rápido el indirecto. Denominando L* lote crítico a este valor resulta:

$$L^* = Tp / (Tcd - Tci)$$

Para lotes menores a L^* se acaba antes con el proceso directo, mientras que para lotes superiores L^* se acaba antes con el proceso indirecto.

O sea, para lotes pequeños el proceso directo, es decir, sin utillajes y por lo tanto más flexible, es más rápido; mientras que, para lotes grandes, el proceso indirecto, aunque necesite utillajes y por tanto sea más rígido, al final termina antes de hacer el lote.

Minimización de costes

Si el objetivo es minimizar el coste por pieza producida, hay que determinar el coste por pieza. Suponiendo que el coste de la materia prima es el mismo para los dos procesos, basta con comparar el resto de costes.

En una primera aproximación se puede descuidar el coste de *stock* y suponer que en el proceso indirecto se hacen todas las piezas que se necesitarán al largo de la vida del producto de una sola vez.

Esta aproximación es favorable al proceso indirecto; por lo tanto, la conclusión solo será válida si el resultado es que conviene emplear el proceso directo, de lo contrario habrá que entrar en más detalle. El coste del proceso indirecto incluirá:

- El **coste de los utillajes**. Dado que se analiza toda la vida del producto, el coste de los utillajes se debe absorber con toda la producción independientemente de que al final aún tengan capacidad de producción.
- el tiempo de ciclo deberá absorber en proporción al tiempo, el coste de la mano de obra y los de mantenimiento de la máquina, energía y los vinculados con el espacio de la fábrica que ocupa la máquina. También deberá absorber el coste de amortización de la máquina. Dado que el coste de mantenimiento se contempla en ambos casos, suponiendo que la máquina se mantiene sustituyendo periódicamente todos los componentes que sufren desgaste, la amortización debe permitir recuperar la invasión hecha en la máquina en el período de tiempo que se prevea su obsolescencia. Por lo tanto, la amortización se trasladará al coste horario en proporción a las horas de trabajo previstas durante la vida útil de la máquina antes de devenir obsoleta. El coste por minuto debido a la amortización de la maquinaria será el coste de la maquinaria dividido por el número de minutos que trabajará antes de quedar obsoleta. Estos minutos se pueden calcular multiplicando los años de amortización por el número de turnos de trabajo y por 60. Por lo tanto, el coste por minuto de la estación de trabajo será:

Chmi + Ch + Imi/(Am*(Ht*Tm)*60) = Cmi

El tiempo necesario:

S * Tcd

Y el coste total:

Ipd + Cmd * S * TCd

Existe un valor de S, que se denominará serie crítica, S*, que provoca que estos dos costes sean iguales:

$$S^* = (Iu + Cmi * Tp - Tpd) / (Cud * Tcd - Cmi * Tci)$$

Por lo tanto, si la serie de piezas a fabricar a lo largo de la vida útil del producto es inferior a esta, entonces seguro que el proceso directo es más económico que el indirecto. Pero si la serie es mayor, entonces hay que utilizar un modelo más detallado teniendo en cuenta que en el proceso indirecto se fabrica por

lotes económicos; por tanto, la máquina se prepara más de una vez a lo largo de la vida del producto y esta fabricación por lotes genera un *stock* que tiene un coste a añadir.

Suponiendo que el lote óptimo sea L, entonces el proceso indirecto provocará que la máquina tenga que preparar S / L veces a lo largo de la vida útil del producto y que haya que tener un *stock* medio de

L / 2 piezas durante los años de vida del producto

El coste total del proceso indirecto será:

$$Iu + Cmi * (Tp * (S/L) + S * Tci) + (L/2) * V * Cs$$

Ahora bien, encontrar la serie crítica no es tan sencillo porque L es necesario sustituirlo por la fórmula del lote óptimo. Pero en un caso concreto, dados los valores, es sencillo calcular si es más económico el proceso directo o indirecto.

A menudo la serie de piezas que se fabricarán durante la vida útil del producto es incierta. Esto hace que el coste por pieza del proceso indirecto sea incierto, mientras que el del proceso directo es prácticamente exacto (excepto la absorción del coste de desarrollo del programa de control numérico). Este es un argumento añadido a favor de los procesos directos.

3.6.2. Análisis basado en la fabricación integrada

El análisis anterior no ha tenido en cuenta que los procesos directos facilitan la automatización y la fabricación integrada y flexible.

En caso de que al estudiar la alternativa resulte que el proceso indirecto implique un sistema de fabricación clásico mientras que el proceso directo conduzca a un sistema de fabricación automatizado e integrado, entonces en el análisis hay que añadir tres factores que impactarán en los costes a favor de esta opción:

- 1) reducción de la mano de obra,
- 2) reducción del tiempo de ciclo, y
- 3) aumento del número de turnos de trabajo.

Reducción de la mano de obra

El impacto más evidente de la automatización es la sustitución de trabajos desarrollados por los operarios por sistemas automáticos. No es realista suponer que el coste de la mano de obra se reduce a cero, pero el trabajo en la fábrica cambia de enfoque y se pasa de tener un operario dedicado a cada máquina a la situación en que cada operario pueda estar pendiente de atender las

incidencias de un conjunto de máquinas. Por lo tanto, a la hora de determinar el coste por minuto de trabajo de cada máquina solo se debe aplicar una fracción del coste del operario.

Reducción del tiempo de ciclo

En el tiempo de ciclo, la máquina interfiere con el operario o el robot que la alimenta. Cuando las maniobras de alimentación están robotizadas son más rápidas por los motivos que se explican en el apartado de las células flexibles. Esta reducción hay que tenerla en cuenta en el cálculo.

Aumento del número de turnos de trabajo

La mayoría de fábricas clásicas trabajan 2 turnos al día, de 8 horas cada uno, 5 días a la semana. En total, son 80 horas a la semana. Pero la semana tiene 168 horas. Desde un punto de vista abstracto cualquier fábrica se podría plantear equiparse con la mitad de las máquinas, ocupar la mitad del espacio y obtener la misma producción a base de hacer 4 turnos de 40 horas (y aún quedan 8 horas semanales para tareas programadas de mantenimiento y renovación de máquinas). En la práctica esto no se hace debido al factor humano. Son mucho más costosos los turnos de trabajo de las noches y los fines de semana. Pero en un sistema altamente automatizado, el personal estrictamente necesario es muy inferior y se pueden abrir los turnos de noche y de fin de semana con una dotación mínima de personal. Esto tiene dos efectos positivos; por un lado, la inversión adicional para automatizar se ve compensada en parte por la reducción de inversión en máquinas y edificios (a veces la inversión total puede ser incluso menor); por otro lado, si se hace un mantenimiento de las máquinas en buenas condiciones de forma prácticamente indefinida, aquello que determina su sustitución y su periodo de amortización es la obsolescencia. Si durante este período trabajan el doble de horas la repercusión de la amortización sobre el coste horario es la mitad.

La aplicación de estos tres factores hace que el lote crítico se desplace mucho más arriba y que cada vez sea más interesante emplear procesos directos en sustitución de los indirectos.

Bibliografía

Gomà Ayats, J. R.; Vivancos Calvet, J.; Buj Corral, I. (2010). Fabricació Flexible . Barcelona: Serveis Gràfics Copisteria Imatge.

Vivancos, J. (1996). *Fabricación Flexible*. Barcelona: CPDA de la ETSIIB-UPC. ISBN 8489349541.