
Sistemas de producción clásicos versus sistemas integrados automáticos y flexibles

PID_00253859

Joan Ramon Gomà Ayats

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 2 horas



**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.

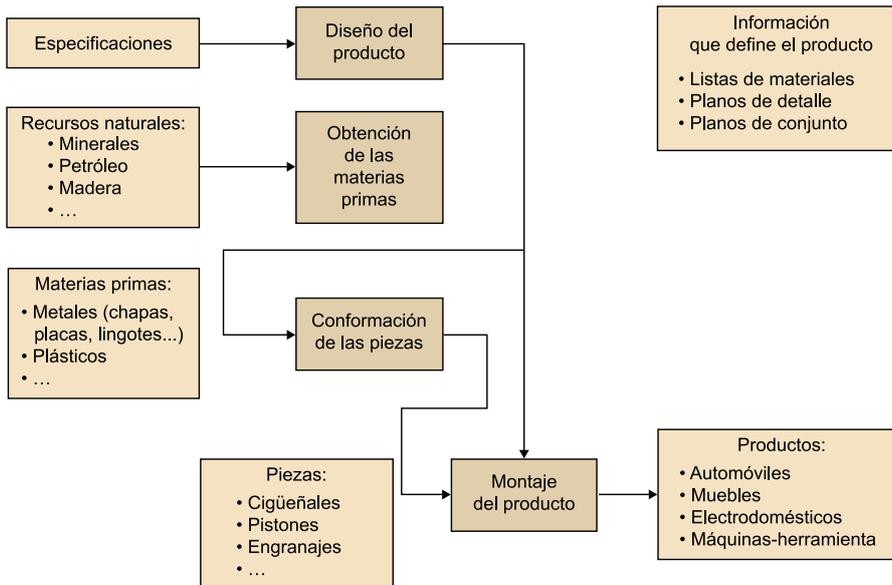
Índice

Introducción.....	5
1. Procesos de conformación de piezas.....	7
1.1. Preparación de la máquina	7
1.2. Operación de las máquinas. El control numérico	9
1.3. Cambio de herramientas	10
1.4. Carga y descarga de las piezas en las máquinas	10
2. Montaje.....	12
3. Logística interna de la fábrica.....	15
3.1. Almacenamiento	15
3.2. Transporte de las piezas	16
4. Control de la calidad.....	18
5. Mantenimiento.....	22
6. Supervisión, control y gestión integrada del sistema.....	24

Introducción

El objetivo de un sistema de producción es materializar los productos que han sido previamente diseñados. Para ello parte de las informaciones que se generan en el diseño de los productos siguiendo un esquema como el de la figura 1.

Figura 1. Diagrama del proceso de diseño y producción



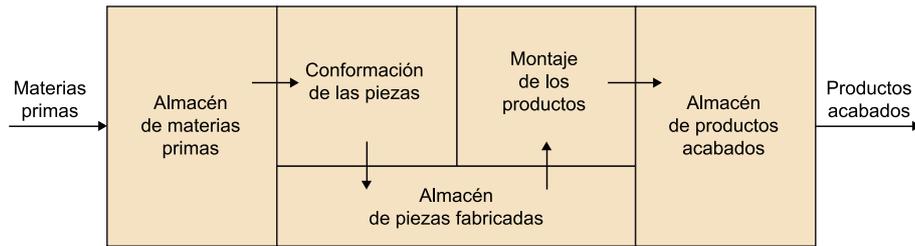
Fuente: elaboración propia

El primero de estos procesos suele ser una actividad que genera grandes cantidades de materias primas con formatos estandarizados y que en muchos casos recurre a transformaciones químicas para obtener estas materias a partir de los recursos que se encuentran en la naturaleza. Por ejemplo, la obtención de plásticos a partir del petróleo o la obtención de barras de acero a partir de los minerales. Para cada una de estas materias primas se ha desarrollado una tecnología específica a lo largo de la historia y requiere un estudio particular de cada caso. Las empresas que se dedican a esta actividad son grandes empresas y hay un número limitado.

Los otros dos procesos se desarrollan en una gran cantidad de empresas industriales diferentes que abarcan todo tipo de ámbitos tecnológicos con empresas de tamaños muy variables: pequeñas, medianas y grandes. La mayoría de empresas industriales centran su actividad en estos dos procesos: la conformación de piezas y su montaje con el fin de obtener productos.

El *lay-out* de una fábrica que concentre sus actividades en estos dos procesos se puede esquematizar como el de la figura 2.

Figura 2. Lay-out de una fábrica



Fuente: elaboración propia

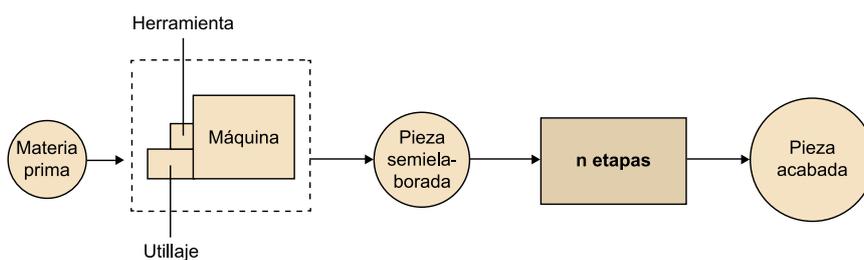
En los sistemas de producción clásicos, el desarrollo tecnológico se ha concentrado en la parte de la conformación de las piezas. Se han aplicado todo tipo de fenómenos físicos y químicos que tienen la capacidad de cambiar la forma de la materia para obtener procesos de conformado de piezas. La automatización se ha centrado en las máquinas que realizan estos procesos, mientras que la alimentación de estas máquinas, así como el almacenamiento y el transporte de las piezas y su montaje para dar lugar a productos acabados tradicionalmente, se ha realizado de forma manual asistida con elementos mecánicos pero controlada por operarios.

1. Procesos de conformación de piezas

La conformación de una pieza se puede representar de forma abstracta como una sucesión de procesos en que cada uno se realiza en una máquina. Esta máquina normalmente es universal, en el sentido de que es capaz de fabricar infinitas piezas diferentes dentro de unas determinadas limitaciones de dimensiones, formas, características, etc. Esta máquina, con el fin de hacer las operaciones, en muchas ocasiones requiere de unas partes que sufren desgaste. Normalmente porque actúan directamente sobre la pieza. Estas partes, a fin de poderlas sustituir por otras nuevas cuando se gastan, se construyen separadas de la máquina y se denominan *herramientas*. Estas herramientas también son universales en el sentido de que las mismas herramientas, si se utilizan de diferentes maneras, tienen la capacidad de fabricar muchas piezas diferentes. En algunos procesos de fabricación, además de las herramientas, se necesitan elementos específicos que solo sirven para contribuir a la fabricación de una pieza concreta o de una familia o un grupo específico de piezas. Estos elementos se pueden denominar de forma genérica como *utillajes* e incluyen los moldes, las matrices, las estampas y los utillajes de sujeción de piezas. Los utillajes, a diferencia de las herramientas, no sufren un desgaste tan significativo y no requieren una sustitución tan a menudo pero hay que cambiarlos de la máquina cuando se desea fabricar una pieza diferente.

En la figura 3 se muestra el esquema abstracto de un proceso de conformación de una pieza.

Figura 3. Esquema de un proceso de conformación de una pieza



Fuente: elaboración propia

1.1. Preparación de la máquina

En los sistemas de fabricación clásicos, antes de fabricar una pieza, los operarios deben preparar la máquina. Las tareas de preparación de la máquina consisten fundamentalmente en:

- Sacar los utillajes que servían para hacer la pieza anterior y montar los de la pieza actual. Montar las herramientas necesarias para hacer la pieza

sustituyendo las gastadas sacando las que no se utilizarán y poniendo las que se necesitan que no estaban montadas.

- Fijar los parámetros de operación de la máquina (fuerza de cierre, presión, temperatura de trabajo, etc.).
- Hacer las primeras piezas, verificarlas, ajustar posicionamientos y alineaciones de utillajes y herramientas y valores de los parámetros hasta que las piezas salen correctamente.

Una vez preparada la máquina ya puede comenzar la fabricación de las piezas. En los sistemas clásicos se pueden encontrar procesos de fabricación que tienen tiempo de preparación de la máquina típicos del orden de varias horas, mientras que una vez preparada la máquina el tiempo de ciclo para fabricar cada una de las piezas (o un pequeño lote de piezas) puede ser de fracciones de segundo o de algunos segundos.

Se denomina *lote* al número de piezas que se hacen cada vez que se prepara la máquina.

Los costos de la preparación de la máquina repercuten en las piezas fabricadas. Si el número de piezas que se hacen cada vez que se prepara la máquina (el lote) es muy pequeño, la repercusión del coste de preparación sobre cada pieza es muy grande, pero si el lote es muy grande, entonces las piezas hechas hay que almacenarlas e ir enviándolas a montaje a medida que se requieren. Esto hace que el coste de almacenar estas piezas crezca a medida que crece el lote. Hay un lote para el que la suma de los costes de preparación más los de almacenamiento son mínimos. Este se denomina *lote óptimo* y es el que se utiliza en los sistemas de fabricación clásicos. Cada vez que se requieren piezas se fabrica un *lote óptimo* y se almacenan para ir sirviendo al montaje o al siguiente proceso hasta que se acaban, momento en que se vuelve a hacer otro *lote óptimo*.

Normalmente, debido a que los lotes son grandes, la máquina se prepara pocas veces al año para hacer la misma pieza y las empresas, en los sistemas de fabricación clásicos, suelen dejar en manos de la experiencia de sus operarios estas tareas de preparación. Pero como no se hace con mucha frecuencia, a menudo cada vez que tienen que preparar la máquina para hacer una pieza caen en ineficiencias y errores que se podrían evitar.

En los sistemas integrados de fabricación, la preparación de las máquinas es un problema que dificulta mucho la automatización y el trabajo con *stock* cero o sin *stock*. Por eso hay dos líneas de trabajo: evitar la tarea de preparación de las máquinas o reducir su impacto.

Para evitar la preparación de la máquina se han desarrollado tecnologías que permiten conformar las piezas sin necesidad de tener un utillaje específico para cada pieza. Así, por ejemplo, en vez de cortar una chapa de acero con una

prensa y una matriz, se puede cortar con una máquina de corte por láser; o en vez de fabricar un molde e inyectar plástico, se puede plantear la alternativa de utilizar una impresora 3D.

En los casos en que el desarrollo de la tecnología todavía no ha encontrado alternativas a los procesos que necesitan un utillaje específico para cada pieza, se aplica la metodología SMED para reducir al mínimo el tiempo de preparación de máquina y obtener una situación similar a la de los procesos que no necesitan utillaje. Esta metodología consiste en un trabajo sistematizado con tres etapas y diferentes aspectos de estudio en cada etapa que acaba consiguiendo reducciones muy grandes del tiempo de preparación.

1.2. Operación de las máquinas. El control numérico

Durante la mayor parte del siglo xx, en los sistemas de producción clásicos era habitual que cada máquina fuera controlada por un operario excepto en el caso de máquinas automáticas, que hacían siempre la misma pieza en grandes cantidades. Este esquema se fue cambiando en sustituir las máquinas clásicas por máquinas de control numérico.

Las máquinas de control numérico permiten hacer piezas de forma automática (sin la necesidad de la atención permanente de un operario) y al mismo tiempo permiten hacer piezas diferentes simplemente a base de ejecutar diferentes programas.

Estas máquinas en muchos casos han sustituido las máquinas clásicas incluso en sistemas de producción que mantienen los esquemas organizativos y de trabajo clásicos. Esto se debe a que gracias al control numérico permiten a veces aumentar la productividad (por ejemplo, operando un torno en condiciones de corte óptimas independientemente del diámetro de corte), aumentar la capacidad de fabricar piezas con geometrías complejas o aumentar la calidad.

Aparte de las ventajas antes mencionadas, **el control numérico es el núcleo de los sistemas de fabricación automáticos, flexibles e integrados**. El hecho de que los movimientos de una máquina para conformar las piezas no estén determinados por elementos mecánicos tales como levas, plantillas o modelos, esto permite hacer de forma automática piezas y cambiar de pieza sin necesidad de modificar la estructura física de la máquina, así como una automatización flexible en el sentido de poder cambiar de pieza producida. Pero además permite una comunicación directa de información procedente de la máquina y hacia la máquina. De esta forma se puede coordinar la operación de la máquina con la de un robot que la alimenta, se puede extraer información de la producción y de la calidad para alimentar el sistema de gestión y se pueden enviar órdenes a la máquina directamente desde el sistema de gestión, supervisión y control.

1.3. Cambio de herramientas

En los sistemas de fabricación que tienen un operario asignado a cada máquina, el cambio de herramientas es una acción que ocupa una fracción relativamente pequeña del tiempo del operario.

Lo mismo ocurre en procesos en que la misma herramienta está trabajando durante largos períodos de tiempo. Esto hace que sea poco interesante, desde el punto de vista económico, la automatización del cambio de herramientas. Esta es la situación habitual en los sistemas de fabricación clásicos.

Cuando las máquinas trabajan automáticamente y el tiempo de operación de cada herramienta es relativamente corto, sería un inconveniente que se requiriera la intervención del operario. Por eso muchas máquinas de control numérico disponen de sistemas automáticos de cambio de herramientas.

Hay dos tipos de sistemas automáticos de cambio de herramientas. Uno se basa en tener una torreta revólver con un número de herramientas montadas que gira y presenta en cada momento la herramienta necesaria, y el otro se basa en un almacén de herramientas y un manipulador. El almacén está motorizado y presenta, en la posición de entrega, la herramienta, mientras que el manipulador extrae la herramienta del almacén y del cabezal de la máquina y las intercambia. En ambos casos la clave se basa en que la herramienta consta de una parte activa, que es la que trabaja sobre la pieza y que tiene la geometría adecuada para cada tipo de trabajo, y una parte auxiliar, que es la que se fija a un portaherramientas. Los portaherramientas, a su vez, tienen una fijación estándar, que es la que se fija al cabezal de la máquina.

En los sistemas de fabricación integrados, automáticos y flexibles es clave que todas las máquinas dispongan de sistemas automáticos de cambio de herramientas.

1.4. Carga y descarga de las piezas en las máquinas

Las operaciones de descargar de las máquinas las piezas terminadas y cargar las piezas en bruto se encuentran en una situación similar al cambio de herramientas.

En los sistemas clásicos, en los que las máquinas están controladas permanentemente por un operario, cada máquina tiene asignado un operario y una de sus tareas es esta función de carga y descarga.

En el caso de máquinas de control numérico, el operario no tiene que hacerse cargo del control de la máquina. Entonces, en los sistemas de fabricación clásicos se pueden asignar varias máquinas a cada operario de forma que mientras el operario hace la carga y descarga de cada una, las otras trabajan automáticamente.

En los sistemas de fabricación integrados, dejar a cargo de un operario la función de carga y descarga de piezas, además del coste, introduce irregularidad en el ritmo de trabajo e impide que el sistema de control y gestión se base íntegramente en comunicaciones de señales entre máquinas imponiendo interfaces hombre-máquina. Por este motivo, **la tendencia es que esta función de carga y descarga esté automatizada empleando manipuladores o robots.**

El principal reto con el que se enfrentan los sistemas automáticos de carga y descarga de piezas es que el elemento terminal del robot o del manipulador (la mano) se adapte a la forma geométrica de la pieza. Existen diferentes soluciones a este problema, que van desde agrupar las piezas para familias con formas geométricas similares que permiten ser sujetadas con la misma mano del robot hasta sistemas de cambio de la mano del robot.

2. Montaje

En los sistemas de fabricación clásicos, el proceso de montaje de los productos a partir de las piezas es esencialmente manual. Por ello, se trata en el ámbito de gestión del proceso de producción más que en el de su diseño. Básicamente se puede identificar tres tipos de *lay-out*¹ del montaje: productos únicos de gran tamaño, series cortas de productos grandes y productos que se fabrican en grandes cantidades.

⁽¹⁾*Lay-out*: es la disposición en planta de la maquinaria que efectuará la producción. Esta disposición en el espacio viene determinada por el proceso, las áreas de trabajo, la circulación de los productos y personas y por el propio espacio.

En el caso de productos de gran tamaño y producción única o en cantidades pequeñas, el producto se monta en una ubicación fija donde se aportan sucesivamente los diferentes componentes. Se monta un único producto al mismo tiempo y si se tiene que producir una pequeña serie, no se comienza el montaje del producto siguiente hasta que se termina el del anterior. Es el caso, por ejemplo, de edificios, barcos, tuneladoras, locomotoras de ferrocarril...

Cuando son productos de gran tamaño pero las cantidades son superiores, se montan simultáneamente en ubicaciones cercanas varios productos. Las diferentes etapas del montaje de cada uno se desplazan en el tiempo de forma que equipos de montaje especializados puedan ir cambiando de ubicación.

Este sistema se aplica, por ejemplo, en el montaje de aeronaves o de máquinas herramienta. En este caso, un equipo especializado en el montaje de la bancada la monta en una ubicación vacía el primer día. El segundo día este equipo monta una bancada en otra ubicación vacía, mientras que un segundo equipo especializado en el montaje de guías y motores los monta en la ubicación donde ya está la bancada. El tercer día el primer equipo pasa a una tercera ubicación vacía, el segundo en la segunda y un tercer equipo especializado en el montaje de sensores y cableado trabaja sobre la primera ubicación. Y así sucesivamente hasta que al final un equipo de ensayos de verificación y embalaje retira la máquina de la primera ubicación y la deja vacía para que el primer equipo vuelva a iniciar el ciclo. Este sistema permite mejorar la productividad gracias a la división del trabajo y la especialización.

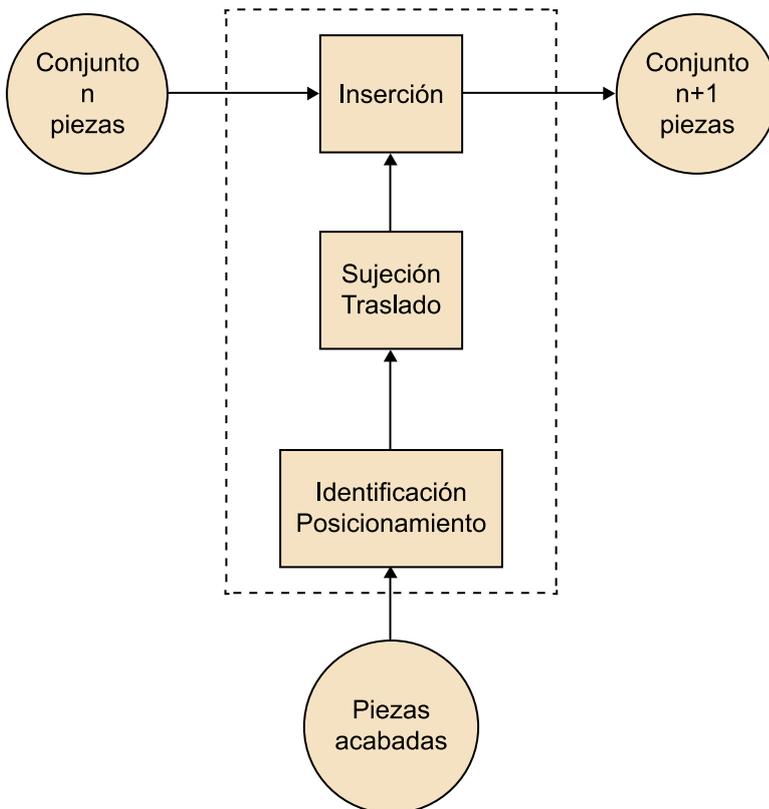
Si los productos para montar son de menores dimensiones y las cantidades son muy grandes, la solución habitual es la cadena de montaje. En este caso, se encuentran desde electrodomésticos hasta automóviles o camiones. Los productos se transportan siguiendo una ruta que se detiene en una serie de estaciones. En cada estación se hace una operación de montaje que consta de un conjunto de tareas elementales. El transporte del producto semimontado se hace con sistemas mecánicos como cintas transportadoras o mesas giratorias y las tareas de las estaciones de montaje pueden ser automatizadas o manuales con asistencia de utillajes y herramientas. Este enfoque lleva al máximo el potencial de aumento de productividad debido a la división del trabajo y

la especialización, añadiendo la facilidad para la automatización. Aparece el problema de *equilibrar la línea*, que consiste en diseñar cada operación agrupando un conjunto de tareas elementales tales que el tiempo necesario en cada estación sea el mismo que en las otras y en evitar ineficiencias debidas al cuello de botella.

El montaje automático, flexible e integrado plantea retos tecnológicos importantes. La principal dificultad radica en la flexibilidad. Es decir, en la capacidad de un sistema automático de montaje de cambiar de producto.

Examinamos primero el problema de la automatización. Es un problema resuelto desde hace mucho tiempo para el caso de productos que se fabrican en grandes cantidades. Los sistemas se basan en que, en la línea de montaje con transporte automático (figura 4), las estaciones que añaden piezas, en vez de ser manuales, lo hacen por medio de un manipulador o un robot. La mayoría de estaciones de montaje lo que hacen es añadir una pieza al conjunto semimontado. Unas pocas estaciones realizan acciones complementarias tales como puntos de soldadura, dosificación de adhesivos, grabación de etiquetas, remache o presionado para encajar las piezas.

Figura 4. Línea de montaje con transporte automático



Estas acciones complementarias, aparte de que son un número relativamente pequeño del total de estaciones, son sencillas de automatizar dado que no deben manipular piezas. Las estaciones que deben aportar una pieza, básicamente hacen tres funciones:

- 1) Garantizar que las piezas se encuentran en una posición y una orientación controlada.
- 2) Sujetar la pieza.
- 3) Desplazar la pieza hasta el punto de inserción y dejarla.

Las dos primeras están muy condicionadas por la forma geométrica de las piezas para posicionar y coger. Como la forma de las piezas se debe diseñar para que hagan su función en la máquina o producto donde se montan, cada caso es diferente. En el caso de líneas de montaje rígidas (que solo sirven para montar un único producto), los elementos posicionadores y los elementos terminales de los robots que sujetan las piezas se diseñan a medida para cada pieza concreta.

En los sistemas de montaje flexible, los elementos posicionadores buscan utilizar sistemas de visión por ordenador para poder posicionar piezas diferentes y sistemas de cambio automático de las manos de los robots o sistemas de sujeción universales que pueden coger muchas piezas diferentes siempre que tengan unas características geométricas comunes.

3. Logística interna de la fábrica

La logística interna en una fábrica convencional es muy diferente de la de una fábrica flexible, automatizada e integrada.

En una fábrica convencional, tal como se ha explicado en el apartado de procesos de conformación, se trabaja por lotes. El lote óptimo depende de los costes de almacenamiento del producto y de preparación de las máquinas. Esto lleva unos lotes diferentes para cada una de las etapas del proceso de conformado de las piezas. Las consecuencias de ello es que grandes cantidades de piezas semielaboradas se almacenarán en espera de ser procesadas en las sucesivas etapas del proceso de producción. Lo mismo ocurre con las piezas en espera de ser montadas. El resultado es que se deben gestionar *stocks* muy voluminosos y deben transportar grandes cantidades de piezas entre las máquinas y los almacenes y entre los almacenes y las líneas de montaje.

En cambio, en una fábrica flexible se buscan procesos que no necesiten tiempo de preparación de máquina para cambiar de producto o, si lo necesitan, se reducen al mínimo aplicando la metodología SMED. Esto hace que los lotes óptimos sean tan pequeños que en la práctica las piezas se pueden hacer de una en una o en lotes determinados por el tamaño de las cajas o palés que se utilizan para transportarlas. Esto permite que las piezas pasen directamente de un proceso al siguiente sin esperar en almacenes. Normalmente siempre se necesitan almacenes de piezas en espera de ser montadas porque los ritmos óptimos de fabricación de las piezas no coinciden entre ellos. Pero el hecho de que los lotes sean muy reducidos hace que este volumen de almacenamiento también lo sea. Por todo ello, los volúmenes para transportar y almacenar se reducen mucho, así como el tiempo que las piezas deben permanecer almacenadas a la espera de ser montadas.

En cuanto a los almacenes de piezas de materias primas y de productos terminados, en una fábrica flexible que trabaja con lotes mínimos, los volúmenes que necesita almacenar vienen condicionados por los volúmenes de los contenedores en que se transportan para minimizar los costes del transporte. En cambio, en una fábrica convencional, los lotes de producción generan necesidad de almacenar grandes cantidades de materias primas y de productos terminados.

3.1. Almacenamiento

La utilización de almacenes automáticos versus los manuales solo se justifica si el aumento de inversión necesaria es rentable gracias al ahorro de gastos de mano de obra en las operaciones de almacenamiento. Un parámetro clave para determinar si se utilizan almacenes automáticos es la rotación: el número

de veces que los productos deben entrar y salir del almacén en el período de un año. Almacenes con bajas rotaciones requieren poco coste de mano de obra para operar manualmente y hacen que no sea rentable la inversión necesaria para su automatización.

Todo ello lleva a que en los sistemas de fabricación clásicos los almacenes sean de gran tamaño y baja rotación, mientras que en los sistemas flexibles los almacenes son de pequeña dimensión y muy alta rotación.

En los sistemas clásicos esta gran dimensión y baja rotación hace que la posibilidad de emplear almacenes automáticos requiera grandes inversiones que no se pueden justificar por la baja rotación. Al tener pocas maniobras de movimiento de material comparadas con el volumen almacenado, normalmente resulta más económico emplear almacenes basados en estanterías en las que se ubican palés estándar que se depositan y extraen utilizando toros conducidos por operarios.

En los sistemas de fabricación flexible la situación es inversa: la dimensión de los almacenes es muy pequeña y la rotación alta. Por lo tanto, con una inversión pequeña se ahorran muchos costes de operación manual y en la mayoría de casos la inversión es rentable.

3.2. Transporte de las piezas

La fabricación en lotes grandes de los sistemas clásicos o lotes pequeños (o incluso piezas una a una) de los sistemas flexibles tiene sobre el transporte un efecto similar al del almacenamiento. El número total de piezas para fabricar y montar es el mismo tanto si el sistema de fabricación tiene un enfoque clásico como si tiene un enfoque flexible, automático e integrado, ya que viene dado por la demanda del mercado. Por lo tanto, en los sistemas clásicos nos encontraremos con pocas maniobras de transporte de grandes volúmenes, mientras que en los flexibles habrá muchas maniobras de pequeño volumen cada una. Además, los recorridos de los sistemas clásicos serán más largos al tener que pasar por almacenes intermedios, que deben estar dimensionados para volúmenes mayores.

El transporte de grandes cantidades de producto cada vez, pero pocas maniobras de transporte y en largas distancias, lleva a diseñar el sistema de transporte con vehículos conducidos por operarios porque difícilmente se amortiza el sobrecoste de emplear vehículos automáticos y mucho menos de cintas transportadoras.

En cambio, el transporte muy frecuente de pequeñas cantidades de producto a cortas distancias hace más rentables sistemas automáticos de transporte tales como cintas transportadoras o vehículos automáticos.

Además, si el sistema dispone de almacenes automáticos, esto es un incentivo para decantarse por los sistemas de transporte automático dada la posibilidad de integrar el transporte con el almacenamiento.

4. Control de la calidad

La capacidad de un producto para satisfacer las necesidades del cliente es el resultado de dos factores. Por un lado están las expectativas que el cliente tiene y por otro la experiencia que el producto le genera. Por lo tanto, para garantizar esta satisfacción es necesario asegurar que las expectativas del cliente se corresponden con las características del producto. La empresa debe gestionar ambos aspectos. Por una parte, tiene que gestionar la comunicación con el cliente para generar unas expectativas coherentes con las especificaciones del producto y, por otra, tiene que gestionar el proceso de producción para garantizar que las características del producto se corresponden con sus especificaciones.

La parte de la gestión del proceso de producción dirigida a garantizar que las características del producto se corresponden con las especificaciones es lo que se conoce como control o gestión de la calidad.

El control de la calidad (o la gestión de la calidad si se hace un planteamiento más integral) ha tenido varios enfoques en la fabricación. Estos enfoques van desde la verificación solo al final del proceso, para garantizar que no salen productos defectuosos de la fábrica, hasta el control de los parámetros de cada uno de los procesos, para garantizar que los parámetros de los procesos son uniformes y, por tanto, obtienen productos con propiedades constantes, pasando por la verificación de las piezas después de cada uno de los procesos que se les hacen.

Los sistemas de fabricación clásicos normalmente se quedan en el control estadístico de los procesos ² en el que en cada fase del proceso de fabricación de las piezas se verifican los parámetros identificados en un análisis de modos de fallo. En función de las desviaciones de estos parámetros se corrige el funcionamiento de las máquinas para asegurar la calidad de los productos. Esta verificación se puede hacer en algunos casos con sensores que miden los parámetros automáticamente pero a menudo se hace con instrumentos de medida manuales que permiten obtener la información con el concurso de un operario.

⁽²⁾Es el uso estadístico de los datos, normalmente presentado en gráficos de control, para detectar variaciones de fondo en variables importantes de un proceso y así prevenir errores en el proceso.

Las causas que provocan que las características de un producto sean distintas de las especificadas se pueden clasificar en dos clases.

Por un lado, hay desviaciones provocadas por causas aleatorias. Es el caso de errores cometidos aleatoriamente por los operarios o de variaciones aleatorias de la posición de una herramienta debida a vibraciones o a cambios en las propiedades de las materias primas o averías fortuitas. Por otro lado, están las

desviaciones provocadas por fenómenos que provocan la desviación sistemática de los parámetros de producción. Por ejemplo, el desgaste de las herramientas o la dilatación térmica de la bancada de la máquina.

La automatización a menudo comporta como beneficio colateral un aumento de la calidad al eliminar los errores aleatorios cometidos por los operarios pero no garantiza la calidad al permanecer el resto de causas que provocan las desviaciones entre las especificaciones y las características obtenidas. Aunque un sistema de producción se automatice sigue necesitando un sistema de aseguramiento de la calidad.

La gestión de la calidad en los sistemas integrados de fabricación flexible y automática parte de los métodos más avanzados de gestión de la calidad en los sistemas de fabricación clásicos e incorpora sensores en las máquinas y sistemas automáticos y flexibles de verificación de las piezas.

Los métodos más avanzados de gestión de la calidad en los sistemas de fabricación clásicos parten de un análisis detallado de los diferentes modos de fallo que se pueden producir durante el proceso de fabricación (análisis AMFE)³. Entonces se establece un sistema de autocontrol en el que en cada fase del proceso de fabricación y montaje se verifican las características del producto y los parámetros del proceso. Mediante técnicas estadísticas (control estadístico de procesos) se separan las variaciones aleatorias debidas al azar de las variaciones sistemáticas a causa de la degradación del proceso. En cuanto se detectan variaciones sistemáticas se interviene modificando los parámetros del proceso para devolver el proceso a control y garantizar la calidad de los productos. Cuando aparecen fallos no previstos se analizan y se modifica el análisis AMFE y todo el proceso de control y se entra en un sistema de mejora continua.

⁽³⁾AMFE: El análisis modal de fallos y sus efectos es una técnica documental usada, en su origen, para el control y garantía de la calidad que permite identificar, definir, detectar y clasificar los fallos potenciales de un proceso en un producto o en un servicio.

En los sistemas de fabricación integrados se da un paso más. Los parámetros de funcionamiento de las máquinas se monitorizan permanentemente por medio de sensores. Por ejemplo, sensores de temperatura en varios puntos de la bancada de la máquina y en el caso de máquinas de control numérico con control adaptativo corrigen la trayectoria de la herramienta para compensar los efectos de las dilataciones térmicas de la bancada. O sensores de fuerza en máquinas de fabricación por arranque de viruta, con los que se detecta indirectamente el desgaste de las herramientas de corte porque al gastarse las herramientas la fuerza necesaria para cortar aumenta. Cuando se detecta que la herramienta se está gastando, hasta cierto punto se puede corregir la trayectoria para que, incluso con la herramienta gastada, se sigan haciendo piezas de calidad. Pasado este punto, algunas máquinas disponen de las llamadas *herramientas gemelas*, que son réplicas de la misma herramienta en el almacén de

cambio automático de herramientas, y pasan automáticamente a trabajar con la herramienta gemela a la vez que envían una señal de petición de sustitución de la herramienta gastada del almacén.

En cuanto a la verificación de las piezas, se necesitan sistemas de medida universales y automáticos para poder integrar la verificación sin depender de instrumentos de medida manuales ni de sistemas automáticos específicos de una pieza concreta. Para alcanzar esto, en un primer nivel se incluyen, en las mismas máquinas, herramientas especiales que en vez de cortar la pieza hacen contacto con sus superficies y utilizan la misma máquina como instrumento de medida. En la figura 5 se muestra un palpador montado en el cabezal de una fresadora.

Figura 5. Palpador montado en el cabezal portaherramientas de una fresadora de control numérico



Fuente: www.renishaw.es

Este enfoque no permite detectar errores debidos al posicionamiento de la propia máquina porque el palpador comete los mismos errores que la herramienta que se ha utilizado para fabricar, pero sí permite detectar errores debidos al desgaste o rotura accidental de la herramienta, o errores de posición de la punta de la herramienta debido a flexiones producidas por la acción de la fuerza de corte.

Figura 6. Máquina de medida por coordenadas



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Beyond_CrystaC.jpg

Para poder detectar también los posibles errores debidos al sistema de posicionamiento de la máquina se recurre a máquinas de medida universales llamadas también **máquinas de medición por coordenadas**, como la figura 6.

Estas máquinas son máquinas de control numérico que permiten verificar piezas diferentes a base de ejecutar diferentes programas y que se pueden conectar con el sistema de gestión para procesar la información procedente del resultado de la verificación.

Los sistemas de visión por ordenador también se integran dentro de la gestión de la calidad automatizando de forma flexible la verificación de la calidad de las piezas, tanto cuantitativa como cualitativa. Hay defectos que no se pueden determinar con la medida dimensional de las piezas porque afectan al aspecto de su superficie, como por ejemplo la presencia de manchas o imperfecciones en la pintura. En los sistemas clásicos, en que las máquinas están controladas permanentemente por un operario, resulta sencillo que el operario detecte este tipo de defectos. En los sistemas automáticos la visión por ordenador es la opción para poder automatizar.

5. Mantenimiento

Las funciones de mantenimiento de las instalaciones y de las máquinas de la industria abarcan un abanico de actividades que van desde la limpieza hasta la reparación de averías pasando por la sustitución periódica de fluidos lubricantes, etc.

El denominador común de todas estas actividades es mantener los equipamientos y las instalaciones en condiciones de producir con calidad.

La necesidad del mantenimiento es porque hay elementos que al funcionar o por el solo paso del tiempo se degradan y necesitan actuaciones para restaurar su funcionalidad, a menudo cambiándolos por otros nuevos o reparados. Esta degradación se debe a una serie de fenómenos físicos y químicos muy complejos que muchas veces hacen difícil si no imposible calcular con precisión en qué momento la degradación provocará la pérdida de funcionalidad, es decir el fallo, de forma que el momento en que se producirá el fallo tiene un componente en parte aleatorio.

Ante esta situación, en los sistemas de fabricación clásicos se aplican dos enfoques complementarios: el mantenimiento correctivo y el mantenimiento preventivo.

El mantenimiento correctivo se limita a hacer funcionar el equipamiento hasta que falla y entonces se acude a repararlo, mientras que el mantenimiento preventivo consiste en establecer un programa periódico de sustitución de componentes aunque no hayan fallado para prevenir su posible fallo futuro y anticiparse.

Ambos enfoques tienen sus pros y contras. El mantenimiento correctivo tiene la ventaja de que apura la sustitución hasta el último momento y hace trabajar los componentes hasta el límite de su vida útil, pero tiene dos graves inconvenientes. Por un lado, cuando los componentes fallan mientras están trabajando pueden agravar el perjuicio provocado por el fallo. Pueden provocar daños en el producto, en las instalaciones o incluso a las personas. Por otro, dado que los fallos son aleatorios, introducen una dificultad en la gestión tanto de la producción como del mantenimiento al encontrarse con interrupciones no programadas y cargas de trabajo al azar.

El mantenimiento preventivo, por su parte, nunca lo es puro al 100 %. Por mucho que se cambie un componente siempre hay una probabilidad distinta de cero de que se produzca una avería mientras el equipo funciona. La clave del diseño del sistema de mantenimiento preventivo consiste en minimizar los costes calculados teniendo en cuenta, por un lado, que si se programan los

cambios muy a menudo el coste de sustitución aumenta, pero si se programan con poca frecuencia, la probabilidad de avería mientras el equipo trabaja y sus costes asociados aumentan. Una dificultad añadida a esta determinación es conocer las probabilidades de que se produzca el fallo y la diferencia entre los costes si se produce el fallo o se realiza la sustitución, y si la sustitución es durante la producción o si la sustitución es durante una parada programada. Cuando se ha estado trabajando un tiempo con mantenimiento correctivo se pueden usar los datos históricos para estimar estas cuestiones.

En los sistemas de fabricación automáticos e integrados se incorpora un nuevo enfoque que es el mantenimiento predictivo. El mantenimiento predictivo intenta juntar lo mejor de los dos casos anteriores. Se trata de poder predecir el fallo de acuerdo con algún indicador que permita detectarlo antes de que se produzca a fin de poder intervenir de forma programada pero habiendo agotado la vida útil del componente. En los sistemas de fabricación clásicos, de hecho, la habilidad de los operarios detectando que el ruido o la vibración de las máquinas eran anómalas permitía una especie de mantenimiento predictivo pero muy difícil de normalizar y gestionar de forma sistemática. El mantenimiento predictivo se basa en disponer de sensores integrados en las máquinas que monitoricen parámetros que indican de forma anticipada un posible fallo. Por ejemplo, sensores de vibraciones, de fuerza de corte, de consumo eléctrico del motor, de la presencia de partículas en los fluidos lubricantes o de alteraciones en su composición química.

Una asignatura pendiente en los sistemas de fabricación es la automatización de las operaciones de mantenimiento y reparación. Incluso en el caso de sistemas de mantenimiento predictivo, una vez determinado que se tiene que hacer una intervención de sustitución de unos determinados componentes de una máquina, esta tarea se hace manualmente. Lo que sí se ha desarrollado son sistemas de telemantenimiento dirigidos fundamentalmente a la actualización del *software* y también sistemas de teleoperación en que expertos situados en las instalaciones de los proveedores de las máquinas pueden dar asistencia a distancia a operadores presenciales en el taller.

Una necesidad nueva que surge en el mantenimiento de los sistemas de fabricación integrados, que no existía en los clásicos, es la de velar por la seguridad informática y la defensa ante ciberataques.

6. Supervisión, control y gestión integrada del sistema

En los sistemas de fabricación clásicos, la gestión del sistema es un tema posterior y prácticamente independiente del diseño y construcción del sistema productivo.

La gestión es básicamente un problema de gestión de personas que controlan y operan las máquinas. Es una cuestión de motivación, incentivos, ergonomía, métodos y tiempos, liderazgo...

Tanto si la gestión se hace con papel y lápiz como si se hace empleando sistemas informáticos, se basa fundamentalmente en la comunicación entre el sistema de gestión y las personas que operan en el sistema productivo. Las instrucciones se dan a las personas y la información del progreso de la producción y su calidad se recoge de las informaciones que suministran las personas.

En los sistemas automáticos, flexibles e integrados de producción el paradigma de gestión cambia radicalmente. El sistema de gestión, supervisión y control forma parte del sistema productivo en sí mismo y es integrado en el mismo. Las órdenes de producción no se limitan a indicar qué y en qué cantidades hay que producir, sino que hay que enviar sincronizadamente a cada máquina los programas a ejecutar. La información sobre el progreso de la producción no se actualiza a partir de datos suministrados por los operarios, sino de señales obtenidas directamente de las máquinas. Esta integración íntima entre el sistema de gestión y los equipamientos de la planta hace que el sistema de gestión sea parte del sistema de producción y se tenga que diseñar, instalar y poner a punto a la vez que se diseña, instala y se pone a punto el resto del sistema productivo.

La captura de datos procedentes directamente de las máquinas elimina retrasos en su actualización y reduce mucho el nivel de errores. Esto hace que incluso en sistemas de fabricación con un enfoque clásico controlados fundamentalmente por operarios haya una tendencia creciente a sensorizar las máquinas y tomar cada vez más datos directamente del sistema físico.

El mismo hecho de tener actualizado en tiempo real el estado y la evolución de la producción abre la puerta a nuevos paradigmas de relación con clientes y proveedores haciéndoles transparente la parte de la información del progreso de la producción que es de su interés, y ello les permite optimizar sus propios procesos y su relación con la empresa.