Diseño de *layout* de los sistemas automáticos de montaje

PID_00253863

Joan Ramon Gomà Ayats

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 3 horas

Universitat Oberta de Catalunya

Joan Ramon 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. En la actualidad es también profesor en la ESUP.

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

Introducción 5

1. Sistema de transporte 9
1.1. Mesas y coronas giratorias 9
1.2. Sistemas lineales 11
1.3. Palés 13

2. Estaciones de trabajo 20
2.1. Identificación y posicionamiento de las piezas 20
2.2. Sujeción de las piezas 24
2.3. Movimiento e inserción de las piezas en el conjunto 26
2.4. Otras operaciones de montaje 29
2.5. Flexibilidad de las estaciones de montaje 30

Bibliografía 33

Introducción

Tradicionalmente el montaje no era un problema de ingeniería de producción sino de organización y gestión de la producción porque se trataba de una actividad eminentemente manual. La forma de organizar el montaje manual en el caso de cantidades pequeñas de productos se basa en ir aportando las piezas que componen el producto en un lugar fijo donde una o más personas las van añadiendo al conjunto hasta tener el producto montado.

En el caso de productos de grandes dimensiones (figura 1), en que trabajan simultáneamente varios equipos, esto conlleva todo un problema de gestión del montaje, por lo que se han desarrollado técnicas específicas de gestión del proyecto.

Figura 1. Montaje de una aeronave

Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010

En el otro extremo se encuentra el caso de productos de pequeñas dimensiones que se montan en grandes cantidades. En este caso se impuso el concepto de líneas de montaje, en que los productos semimontados van avanzando con un sistema de transporte que los mueve a una velocidad que marca el ritmo de producción y van pasando por diferentes estaciones donde un operario o un pequeño equipo de operarios aporta un componente o un pequeño conjunto de componentes más; es decir, hace una operación de montaje.

Este enfoque ha sido muy eficiente debido a que aprovecha las ventajas de la división del trabajo y la consecuente especialización, además de aspectos psicológicos como el hecho de que la misma línea marca el ritmo de producción y presiona a los operarios a mantener el nivel de actividad elevado. Para definir estas líneas de montaje se divide la operación de montaje en tareas elementales e identifica cuáles deben haber sido hechas antes de poder montar cada una. En función del ritmo de producción deseado para la línea se determina el tiempo de ciclo deseado para cada estación y se busca agrupar las tareas elementales en grupos que tengan el tiempo de carga de trabajo lo más cercano posible al tiempo de ciclo deseado. Entonces se asigna cada grupo de tareas a una estación de trabajo. Esto es lo que se llama *equilibrado de líneas*. La línea se puede equilibrar por diferentes rimas de producción a base de poner

más o menos estaciones de trabajo y entonces gestionar la producción mintras se va adaptando el ritmo de producción a la demanda del mercado en cada momento.

Una situación intermedia entre las líneas de montaje y el montaje de productos en una ubicación fija es el caso del montaje de productos en un grupo de ubicaciones, donde el producto queda fijo en su ubicación y los equipos de montaje van rotando entre las ubicaciones. Así cada equipo se especializa en una parte del montaje. Este enfoque es adecuado, por ejemplo, para máquinas herramienta. El equipo 1 monta las bancadas; el 2 los accionamientos; el 3 los sensores y el cableado eléctrico, de señal, neumático e hidráulico; el 4 monta el control y hace los ensayos de verificación, y el 5 hace el embalaje y expedición. En la planta se dispone de 5 o 6 ubicaciones donde se monta una máquina en cada una y cada día o cada dos días los equipos van cambiando de ubicación y trabajan en una máquina diferente.

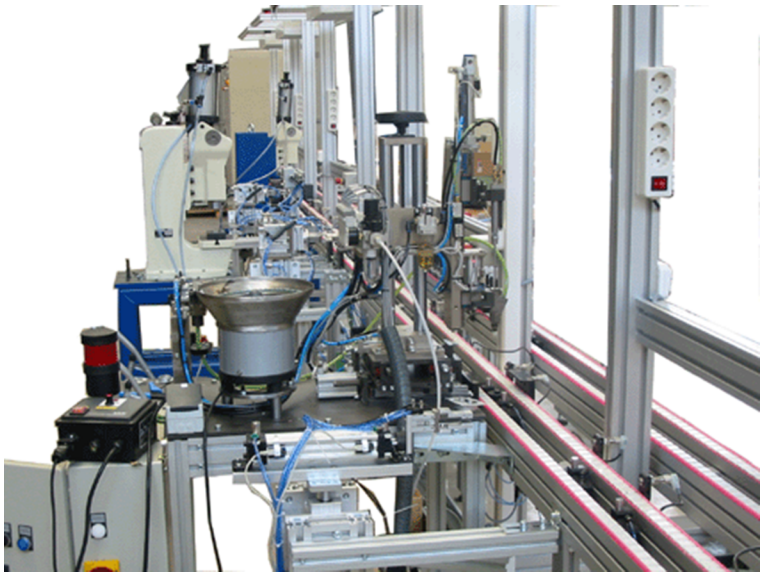
De estas tres formas de organizar el montaje, la que más se adapta a la automatización es la de la línea de montaje. La línea de montaje permite que los equipos que realizan las operaciones de montaje queden fijas en un lugar concreto y les asigna un número pequeño de tareas, lo que simplifica su trabajo hasta el punto de permitir la automatización.

En productos complejos el grafo que representa el montaje no tiene forma lineal sino arborescente. En estos casos cada rama del grafo corresponde a un componente que hay que montar antes de insertarlo en el tronco de cada producto. La solución es montar primero por separado los componentes en líneas automáticas de montaje y luego montar los componentes en el producto final como si cada uno fuera una pieza más.

Las líneas automáticas de montaje están compuestas por una línea de transporte y un conjunto de estaciones de montaje ubicadas a lo largo de esta línea. La línea de transporte lleva los productos semimontados de estación en estación hasta que su montaje está terminado. Las estaciones hacen las operaciones de montaje, que consisten fundamentalmente en ir añadiendo piezas al producto que se está montando. También hay algunas operaciones auxiliares que no comportan el hecho de añadir pieza, como por ejemplo hacer puntos de soldadura o presionar las piezas para que queden encajadas o ensayos funcionales del producto montado.

A continuación, se estudian primero los sistemas de transporte dentro de las líneas de montaje y luego las estaciones. Finalmente se comenta el sistema de control de las líneas de montaje.

Figura 2. Montaje de una aeronave

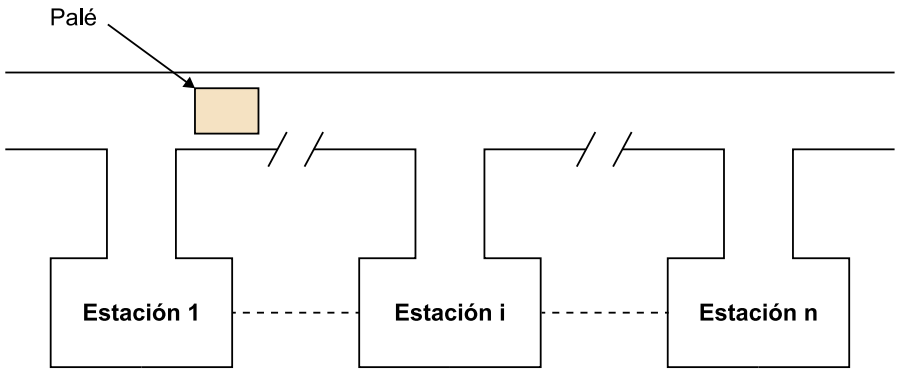


Fuente: J.R. Gomà Ayats et al., 2010.

1. Sistema de transporte

El *layout* de una línea de montaje se puede esquematizar con la figura 3.

Figura 3. *Layout* de una línea de montaje



Fuente: elaboración propia.

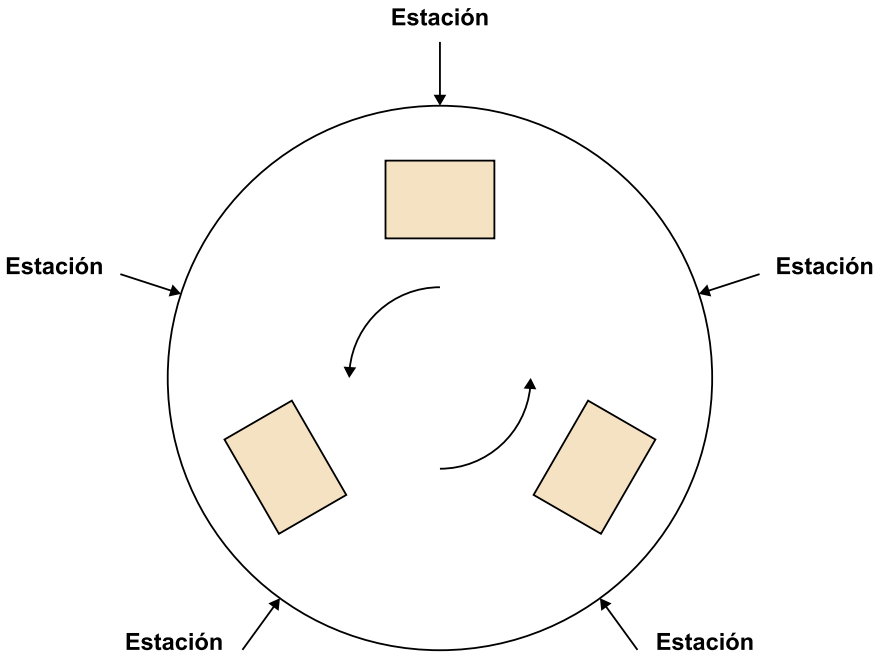
El sistema de transporte debe mover los productos semimontados de estación en estación hasta que su montaje se termina. Este movimiento se puede hacer siguiendo diversas distribuciones en planta, desde una línea recta hasta una circunferencia. Otra función del sistema de transporte es la de fijar con precisión el producto ante cada estación para que las operaciones que hace esta se puedan desarrollar en el lugar del producto donde hay. Para lograr esto el transporte de los productos no se hace llevándolos directamente, sino a través de unos palés que se ajustan tanto al producto como a los puntos de fijación de referencia de cada estación. Todos estos palés se pueden mover simultáneamente o pueden moverse independientemente unos de otros a lo largo del sistema de transporte. Cuando los palés pueden moverse libremente, el propio sistema de transporte hace la función de almacén, que amortigua las variaciones de ritmo entre las estaciones.

En los siguientes apartados se estudian estos tres aspectos: el *layout* de la línea de transporte, los palés y la selección entre palés fijos que se mueven todos simultáneamente o palés independientes que se mueven cada uno libremente, y el sistema de control de la línea de montaje.

1.1. Mesas y coronas giratorias

La forma más sencilla de mover los palés es atornillarlos a una mesa circular y hacerla girar en torno a su eje (figura 4). Simplemente con unos rodamientos en el eje se restringen todos los grados de libertad de la mesa excepto la rotación en torno al eje, y con un motor reductor se le aplica el par que la hace girar. A menudo se añaden mecanismos de bloqueo preciso para garantizar la parada con exactitud.

Figura 4. Mesa giratoria

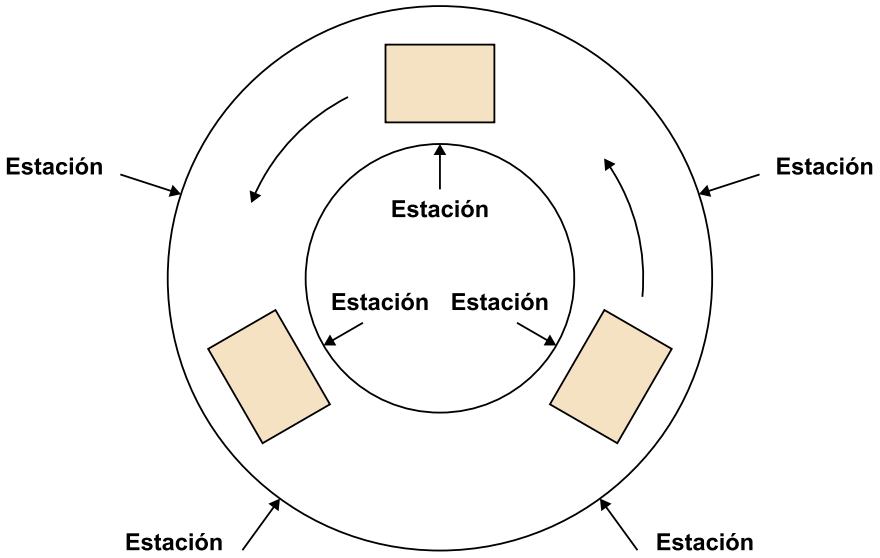


Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

En este tipo de sistema de montaje, dado que los palés están atornillados a la mesa, se mueven todos al mismo tiempo y todas las estaciones deben trabajar en sincronía. Un factor que limita su uso es que, si el número de estaciones necesarias es muy grande, el diámetro de la tabla necesaria crece de forma que se hace impracticable.

Una manera de reducir el tamaño de la tabla es utilizar una corona giratoria en vez de una mesa (figura 5). De esta manera se pueden poner estaciones tanto en el exterior como en el interior y el diámetro necesario con el mismo número de estaciones es menor.

Figura 5. Corona giratoria



Fuente: J.R. Gomà Ayats et al., 2010.

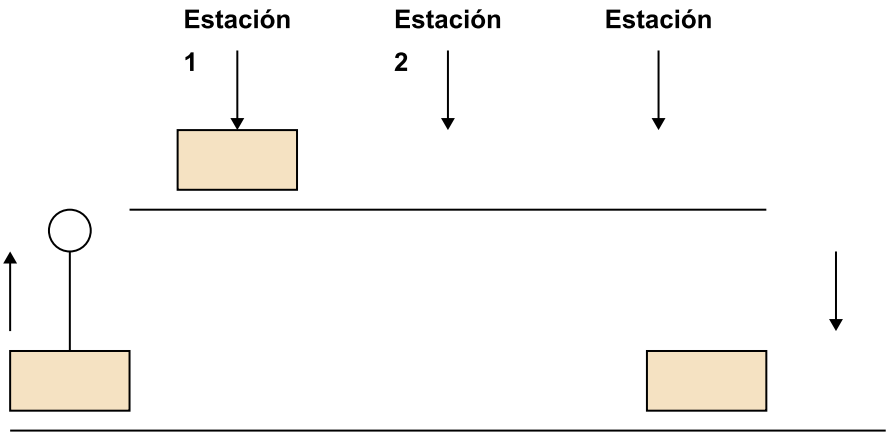
Mecánicamente es más complejo. Al no disponer de un eje central se necesitan guías giratorias y transmitirle el par a través de una rueda dentada. Además, aportar piezas en las estaciones interiores es más complicado que en las exteriores. Pero a menudo se necesitan estaciones donde no se aporta ninguna pieza; estaciones donde solo se hacen puntos de soldadura, en que se presiona una pieza introducida en una estación anterior, donde se voltea el producto para insertar piezas por otra cara, etc. En estos casos la configuración en corona permite meter estas estaciones en donde no se aporta ninguna pieza en el interior y reducir dimensiones del sistema de montaje de forma eficiente.

1.2. Sistemas lineales

La alternativa para obtener líneas de montaje que no sufran las limitaciones de las tablas o las coronas giratorias con respecto al número de estaciones es hacer el sistema de transporte que siga una línea recta (figura 6). De esta forma, a base de hacerla tan larga como sea necesario, no hay limitación práctica en el número de estaciones.

Una posibilidad es simplemente una cinta transportadora o un camino de rodillos por donde vayan avanzando los productos semimontados encima de palés. Más adelante se comenta el motivo por el cual, para las líneas automáticas, es importante que los productos semimontados se muevan dentro de palés que los sujeten con precisión. Una vez montado el producto, en la última estación de la línea se retira el producto y se deposita en una caja en una mesa de trabajo similar a las estudiadas en las células flexibles de fabricación para desacoplar el ritmo de montaje de la línea del ritmo del sistema de transporte de la fábrica. En esta estación los palés quedan vacíos y deben devolver al principio de la línea para iniciar el montaje de otro producto. Hay sistemas que hacen el retorno de los palés a base de ubicar una cinta inferior a la de montaje y los palés vacíos vuelven por debajo al principio.

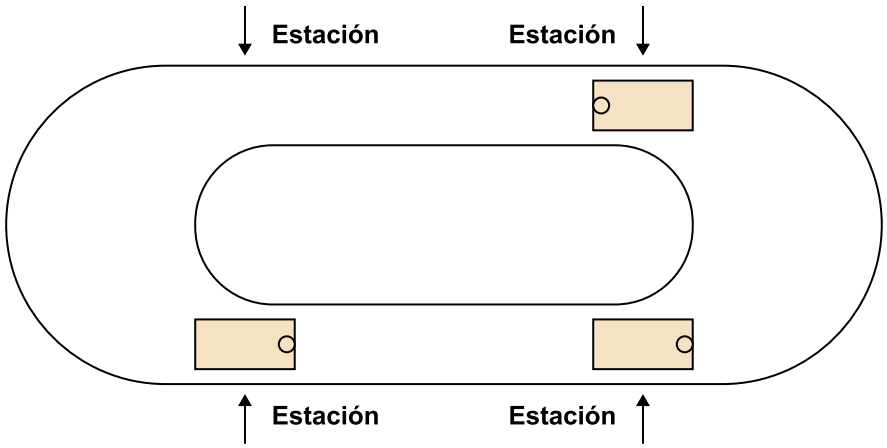
Figura 6. Sistema lineal de montaje



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

En este planteamiento es una lástima que la cinta de retorno de los palés sea una inversión que hay que hacer y que no se aproveche para introducir estaciones de trabajo. Una alternativa que busca aprovechar el regreso de los palés son las líneas de montaje de dos canales paralelos, como se indica en la figura 7.

Figura 7. Sistema de montaje de dos canales paralelos



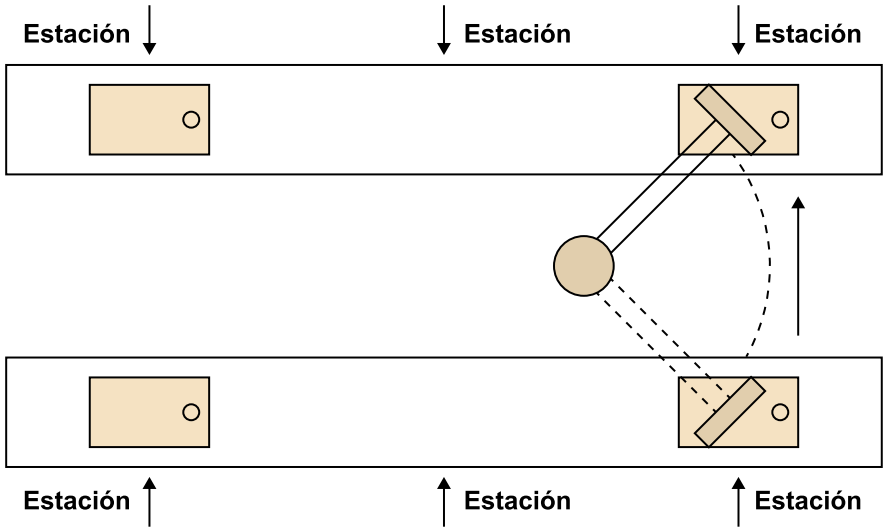
Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Además de aprovechar la cinta de regreso, el resultado es que la longitud de la línea es aproximadamente la mitad del caso anterior a cambio de hacerla más ancha, lo que muchas veces es una ventaja al permitir ubicar de forma más racional las líneas de montaje en la planta. En este tipo de líneas, la estación final, que es donde se retira el producto terminado, queda junto a la inicial donde se mete la primera pieza, que suele ser la carcasa del producto. A menudo se pueden hacer las dos maniobras en la misma estación y reducir en una el número de estaciones.

Las estaciones se pueden ubicar tanto en el exterior como entre las dos cintas, pero es mucho más práctico para aportar las piezas que estén al exterior, y solo se acostumbran a introducir entre las cintas estaciones que no aportan piezas.

En la solución que se ilustra esquemáticamente en la figura, el cambio de los palés de una cinta a la otra se hace con un giro en los extremos. Esto provoca que los palés presenten siempre la misma cara en el exterior. A veces, para facilitar la inserción de las piezas, conviene que la cara que presentan los palés en el exterior cambie. Si este es el caso, en este tipo de cintas hay que meter una estación que voltee los palés. Una alternativa es que el traslado de los platillos entre las cintas paralelas en vez de hacerse con un giro se haga con unos manipuladores en los extremos, como se ilustra en la figura.

Figura 8. Sistema de montaje de líneas paralelas con manipuladores



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

En este caso el manipulador puede provocar que la parte del palé que mire al exterior cambie. Entonces las estaciones que necesitan que el palé esté en una determinada ubicación se sitúan junto a la línea en que ya presenta esta ubicación y así a veces se puede ahorrar una estación de volteo de los palés.

1.3. Palés

En las líneas de montaje manuales los operarios tienen mucha habilidad en introducir las piezas en el lugar adecuado del producto, lo que permite que los productos se muevan por la línea sin necesidad de garantizar su posición con alta precisión. En cambio, en las líneas de montaje automáticas es muy complejo conseguir que la estación de montaje inserte las piezas correctamente si el producto no se encuentra en una posición y orientación precisas y firmemente sujeto. La sujeción de los productos no siempre es sencilla porque su forma exterior viene condicionada por la función que tienen que hacer y por la estética. Por tanto, no se puede dar por supuesto que presentarán caras planas paralelas o superficies cónicas o cilíndricas que faciliten su sujeción y posicionamiento. La manera de superar esta dificultad es construir un juego de palés que hacen de interfaz entre el producto y la línea de montaje.

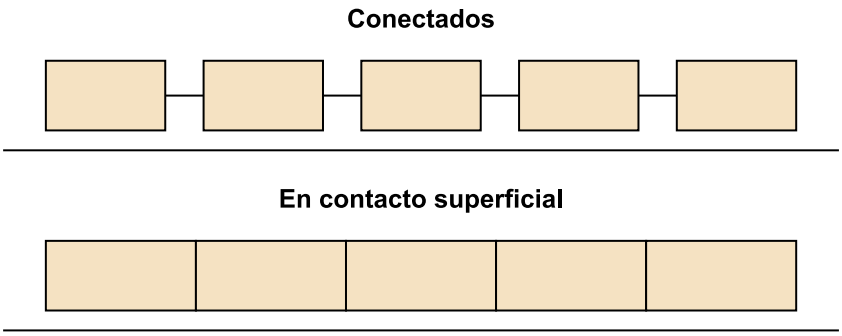
La parte exterior se diseña para garantizar un posicionamiento y una orientación precisa del palé respecto de la estación de montaje y la parte interior para garantizar una sujeción firme y precisa del producto.

En las líneas de montaje flexibles los palillos son un utillaje que hay que cambiar cuando se cambia de producto. Se puede cambiar todo el palé o se pueden diseñar de forma que el interior sea postizo y solo se cambie este.

Los palés pueden ir fijos al sistema de transporte y moverse todos a la vez o moverse independientemente unos de otros. En el caso de palés fijos, el número máximo de palés viene determinado por su tamaño, la longitud de la

línea de transporte, la velocidad del sistema de transporte y el tiempo de ciclo de la línea. Pueden ir haciendo contacto los unos con los otros o conectados con elementos intermedios (figura 9).

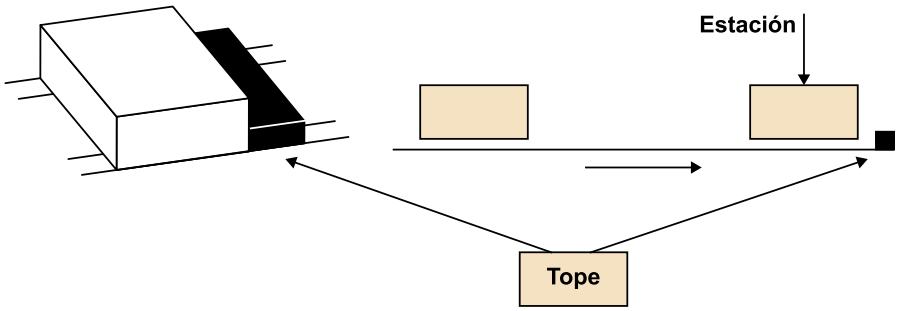
Figura 9. Palés sobre la línea



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Para que los palés se muevan libremente entre ellos se colocan encima de una cinta transportadora. Cuando nada lo impide se mueven solidariamente con la cinta, pero si se quiere detener un palé basta con que un actuador coloque un tope en su camino, y entonces el palé se desliza sobre la cinta y se mantiene quieto.

Figura 10. Palés detenidos sobre la línea por un tope



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

En el caso de palés móviles, hay que determinar el número de palés cuidadosamente para maximizar el rendimiento de la línea, y esto se puede hacer con un sistema de simulación. Si se ponen pocos palés no es suficiente para hacer de almacén intermedio que absorba las irregularidades en los tiempos de ciclo de las estaciones; si hay demasiados, el sistema acaba comportando casi como si los palés estuvieran fijados.

Para entender el efecto de utilizar palés con movimiento independiente o palés que se mueven todos a la vez hay que examinar la interacción entre el sistema de transporte y las estaciones. En la siguiente tabla 1, se detallan las acciones del sistema de transporte y los palés en paralelo a las acciones del manipulador que inserta una pieza. Se supone que el manipulador siempre encuentra una pieza disponible y no requiere tiempo de espera, una hipótesis aceptable si el sistema de alimentación de piezas está bien dimensionado. También se supone que se trata de un sistema en que el manipulador tiene una pinza neumática

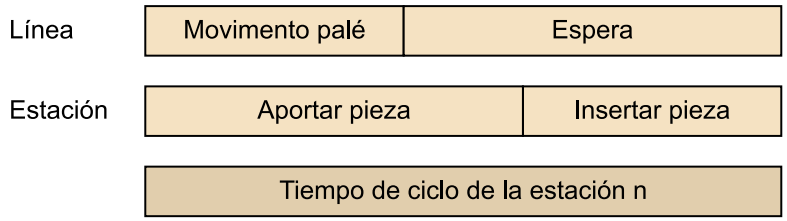
que se cierra para coger la pieza y se abre para dejarla (a veces es una ventosa o un electroimán, pero la maniobra es equivalente), y la maniobra del manipulador consta de dos trayectorias (una vertical y otra horizontal) de forma que se desplaza en horizontal para ir a coger la pieza en el sistema de alimentación de piezas y la coge y la deja con un movimiento vertical. Hay casos en los que la trayectoria puede ser más compleja, pero la maniobra de ir a buscar la pieza y devolverla siempre tiene una parte del trayecto en el que puede haber interferencia con el palé y, por tanto, es necesario que el palé quede parado, y otra parte en la que no hay interferencia con el palé y, por tanto, el palé se puede mover simultáneamente con el movimiento del manipulador.

Tabla 1. Acciones del sistema de transporte y los palés en paralelo a las acciones del manipulador que inserta una pieza.

Manipulador	**Transporte - Palés**
• Desplazamiento horizontal para buscar una nueva pieza. • Desplazamiento vertical hacia abajo para coger la nueva pieza. • Cerrar las pinzas. • Desplazamiento vertical hacia arriba con la pieza. • Desplazamiento horizontal llevando la pieza en el punto de inserción.	• Bajar la plataforma de apoyo del palé. • Quitar el tope de retención del palé. • Acelerar el palé y avanzar. • Subir el tope para retener el siguiente palé. • Subir la plataforma de apoyo del palé.
• Desplazamiento vertical hacia abajo insertando la pieza. • Abrir las pinzas. • Desplazamiento vertical hacia arriba.	• Palé parado

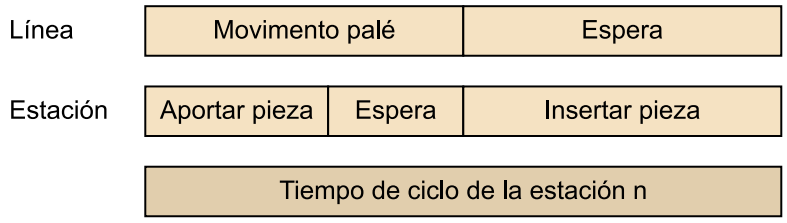
Este reparto de tareas lleva a un diagrama de tiempo en el que el tiempo de ciclo (tiempo desde que se inserta una pieza el producto hasta que se inserta la siguiente pieza en el siguiente producto) está condicionado por los dos componentes. La tarea más lenta de las que se ejecutan en paralelo es la que determina el tiempo de ciclo de la estación.

Figura 11.



En el gráfico anterior se presenta el caso en el que por la estación "n" el tiempo para aportar piezas es más lento que el movimiento del palé. En este caso, la estación domina la línea y el tiempo de ciclo solo depende de la estación, pero si el tiempo necesario para mover el palé es superior al tiempo necesario para aportar pieza, entonces se presenta una situación como la que ilustra el siguiente gráfico:

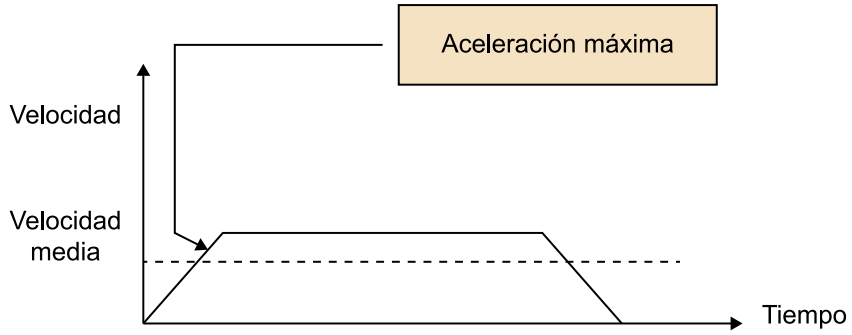
Figura 12.



En este caso, el tiempo necesario para mover el palé obliga a añadir un tiempo de espera en el tiempo de la estación y ralentiza el tiempo de ciclo de esta estación.

El tiempo necesario para mover el palé depende de la aceleración máxima que se le puede aplicar. El movimiento consta de una rampa de aceleración, un movimiento a velocidad constante (si da tiempo a alcanzar la velocidad máxima) y una rampa de desaceleración. La aceleración provoca fuerzas de inercia a las piezas del conjunto semimontado que hay en el palé, que puede hacerlas salir de su ubicación. Esto impone una primera limitación a la aceleración máxima que se puede imprimir en el palé y, por tanto, el tiempo mínimo con que se puede mover.

Figura 13. Movimiento del palé



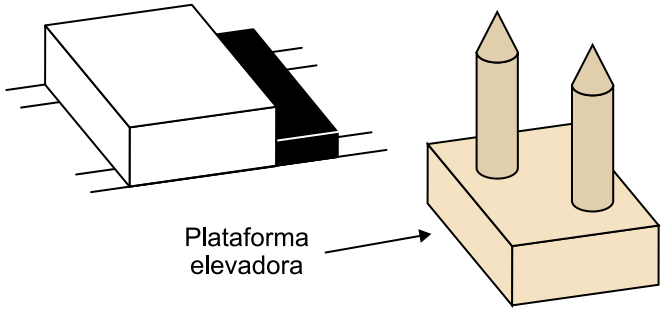
Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

En el caso de los palés que se mueven juntos simultáneamente, se pueden diseñar sistemas que los empujen con la fuerza que sea necesario para alcanzar esta aceleración máxima. En el caso de los palés que se mueven de forma independiente unos de otros, la aceleración queda limitada por el coeficiente de rozamiento entre el palé y la cinta. Esta limitación suele ser inferior a la aceleración máxima admisible para evitar que las piezas se muevan.

Además, en los palés que se mueven de forma independiente unos de otros hay que evitar que mientras se hace la inserción de la pieza el palé esté rozando contra la cinta, y también hay que garantizar que la posición relativa entre el palé y la estación de trabajo tenga suficiente precisión para garantizar el éxito de la inserción de la pieza. Para resolver esto una solución es que el palé se mueva por dos cintas en los extremos que dejan libre el centro. Esto permite que una plataforma elevadora levante el palé metiéndose entre las dos cintas.

Esta plataforma elevadora (figura 14) tiene unos pivotes cónicos que provocan que el palé quede centrado con precisión respecto de la misma plataforma. En la figura siguiente se ilustra este concepto.

Figura 14. Plataforma elevadora para el palé



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Esto implica que además del movimiento del palé existe el tiempo de accionar el tope y de subir y bajar la plataforma elevadora.

Por todo ello, el tiempo necesario para mover el palé es mayor en los sistemas con palés independientes que los sistemas con palés que se mueven conjuntamente.

Si el tiempo de ciclo de las estaciones es determinista, es decir, siempre el mismo, los palés independientes no tienen ninguna ventaja. Con palés que se mueven simultáneamente, el ritmo de trabajo de la línea de montaje lo marca la estación más lenta. Con palés que se mueven independientemente unos de otros, todos los palés se acumulan detrás de la estación más lenta. Las anteriores deben ralentizar el ritmo para que los palés no puedan salir, dado que la línea de transporte se llena de palés y las posteriores deben ralentizarse porque siempre tienen que esperar a que les lleguen los palés a medida que la estación más lenta los va entregando. Por lo tanto, al final de la línea acaban saliendo tantos productos montados como los que pasan por la estación lenta y el ritmo es el mismo que si los palés se movieran todos a la vez.

Si el tiempo de ciclo es una variable aleatoria, es decir, en cada ciclo hay una cierta probabilidad de que tenga varios valores posibles, entonces los palés con movimiento independiente tienen ventaja. El motivo se entiende analizando el siguiente ejemplo simplificado.

Suponiendo una línea que tiene dos estaciones, en cada estación las piezas pueden llegar orientadas correctamente o pueden llegar de forma que necesitan un giro. Si llegan orientadas, la estación tarda 1 segundo en el tiempo de ciclo, pero si llegan con orientación opuesta, entonces tarda 2 segundos. La probabilidad de que una pieza llegue en una orientación es del 50 %.

En el caso de la línea con palés que se mueven todos al mismo tiempo, cada ciclo el movimiento de la línea tiene que esperar a la estación más lenta. Se darán cuatro casos equiprobables (tabla 2):

Tabla 2.

Probabilidad	**Ciclo estación 1**	**Ciclo estación 2**	**Ritmo de la línea**
¼	1	1	1
¼	1	2	2
¼	2	1	2
¼	2	2	2

Por tanto, de media, el ritmo de trabajo de la línea será: ¼ * 1 + ¾ * 2 = 1,75 s.

Si los palés se mueven independientemente unos de otros, mientras haya palés en medio entre las dos estaciones, la segunda estación trabajará sin parar con su tiempo de ciclo y la línea sacará producto montados al ritmo correspondiente al tiempo de ciclo de la segunda estación. Como que la mitad de las veces tardará 1 segundo y la otra mitad dos, el ritmo será de ½ * 1 + ½ * 2 = 1,5.

Como media, el número de palés entre las estaciones se mantendrá constante, dado que cuando las dos estaciones tardan lo mismo el número de palés medio no varía, y cuando tardan diferente, la mitad de veces es porque la primera es más rápida que la segunda y la otra mitad de veces es porque la segunda es más rápida que la primera. Por lo tanto, la mitad de veces el número de palés medio aumenta en una unidad y la otra mitad disminuye en una unidad.

La probabilidad de que se vacíe en una jornada de trabajo en que hacen M piezas si hay N palés será la probabilidad de que el número de veces que la segunda estación haya resultado más rápida que la primera en los M ciclos de trabajo sea N o más. La probabilidad de que se llene si caben O será la de que la primera haya resultado más rápida que la segunda sea O-N o más. Si el número de palés que caben entre las estaciones es lo suficientemente grande, estas probabilidades son suficientemente pequeñas como para que el ritmo medio de la línea sea muy aproximadamente 1,5.

La clave está en que los palés separados desacoplan las estaciones. Si el número de palés y el espacio entre estaciones es lo suficientemente grande, en la práctica el ritmo de la línea viene dado por aquella estación que como media sea la más lenta, mientras que si los palés se mueven todos al mismo tiempo, en cada ciclo la estación que ha resultado la más lenta es la que marca el ritmo y el ritmo es la media de las que han sido más lentas cada vez.

En el caso general, cuando los tiempos de ciclo siguen variables aleatorias complicadas, la forma práctica para elegir entre los dos sistemas es utilizar un programa de simulación por ordenador.

2. Estaciones de trabajo

A lo largo de la línea de montaje se encuentran las estaciones de trabajo. Estas se pueden clasificar en dos tipos: las que aportan piezas el producto y las que realizan operaciones auxiliares.

Las estaciones que realizan operaciones auxiliares puede que hagan puntos de soldadura, que presionen el producto para provocar el remachado o el encaje de las piezas ya introducidas, que giren el palé para hacer que se presente en otra orientación a la línea, que aporten adhesivo, etc. En general son más sencillas que las estaciones que aportan piezas porque solo necesitan una herramienta terminal y un manipulador que aplica esta herramienta sobre el producto de forma repetitiva cada vez que un palé se detiene en la estación.

Las estaciones que aportan piezas al producto básicamente hacen tres funciones sucesivas:

1) **Posicionamiento**. Conseguir que una pieza esté en una posición y orientación controladas dentro de tolerancias suficientemente estrechas para garantizar que el elemento de sujeción la podrá coger sin atascarse.
2) **Sujeción**. Conseguir que la pieza quede fija al elemento terminal del manipulador para que la pueda mover teniendo siempre su posición y orientación controladas.
3) **Manipulación**. Mover la pieza desde el punto en que estaba posicionada hasta el punto del producto en que se ha de montar y dejarla en la orientación adecuada.

A continuación, se estudian las soluciones tecnológicas a cada una de estas tres funciones.

2.1. Identificación y posicionamiento de las piezas

Cuando se fabrica una pieza, en la mayoría de procesos de conformado su posición y orientación están perfectamente controladas por las propias necesidades de proceso. Una vez la pieza se ha fabricado normalmente hay que almacenarla antes de pasar a la línea de montaje. Este almacenamiento puede ser por un período de tiempo más o menos breve, pero casi siempre es necesario porque el ritmo de producción de mínimo coste de fabricación no coincide con el de montaje, ni tampoco los ritmos de fabricación de mínimo coste de cada una de las piezas que se han de montar en el mismo producto coinciden entre sí.

Las piezas se pueden almacenar y transportar de fabricación a montaje conservando o sin conservar el control de la posición y orientación. Si no se conserva, habrá que hacer una operación específica para recuperar este control durante el montaje. Cuando el montaje es manual el operario tiene mucha habilidad en reconocer las piezas, entender dónde están y cómo están orientadas y al mover la mano de forma que la coja independientemente de cómo vengan. Si están bien orientadas y posicionadas gana un poco de tiempo, pero la diferencia a menudo es pequeña. En cambio, en el montaje automático si las piezas no tienen controlada su posición y orientación hay que invertir en dispositivos específicos que recuperen este control.

Hay tres motivos por los que las piezas pasan de fabricación montaje y pierden el control de la posición y la orientación, aunque ello conlleve un aumento de inversión y de coste:

1) Algunos procesos de fabricación, por su propia naturaleza, pierden el control de la posición y la orientación de las piezas. Por ejemplo, el tratamiento superficial de lapidado consiste en que las piezas se mezclan con piedras y se mueven en una cuba para provocar que golpeen entre ellas y las piedras, y así mejorar sus propiedades superficiales.

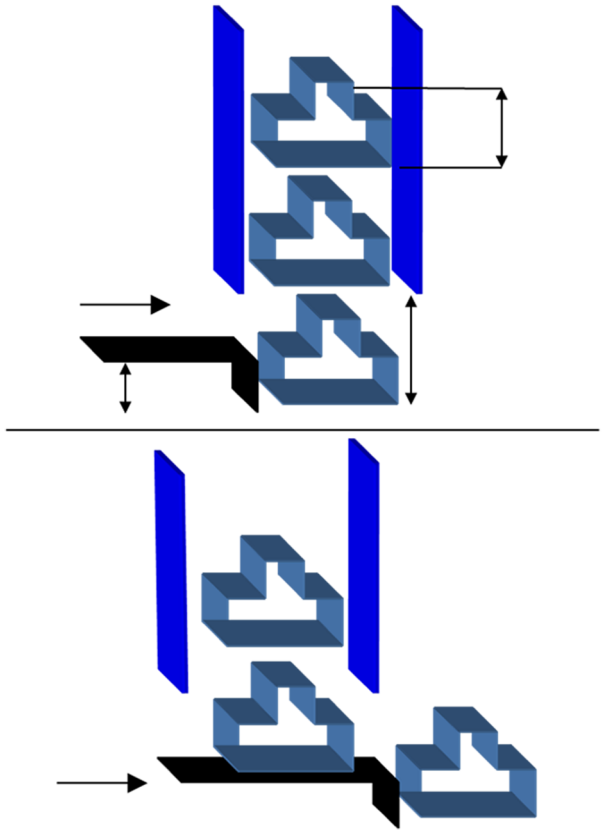
2) En algunos procesos el hecho de conservar el control de la posición y orientación provoca un aumento del tiempo de ciclo y, por tanto, del coste de la pieza. Por ejemplo, en un proceso de inyección de piezas de plástico, para conservar el control necesario, que cuando se abra el molde un robot introduzca el brazo, tome las piezas y las saque, y estas maniobras conllevan más tiempo que lo que tardan las piezas a caer por gravedad en un contenedor.

3) El hecho de mantener el control de la posición y orientación obliga a que las cajas que contienen las piezas se diseñen de forma específica para cada pieza y eso tiene un coste, mientras que si las piezas se guardan a chorros se pueden utilizar contenedores únicos por todas las piezas de la fábrica.

En los dos últimos casos hay que hacer un cálculo de costes y decidir si se mantiene el control de la posición y ubicación en función de qué coste es menor: si el de mantenerla o el de recuperarla en la hora del montaje.

Cuando las piezas conservan su posición y orientación desde el proceso de fabricación, la función de posicionamiento puede desaparecer si se utiliza un robot que las va a coger cada una en su sitio de la caja. Si en vez de un robot se utiliza un manipulador que debe encontrar todas las piezas siempre en la misma posición, entonces la función se puede resolver sencillamente. Por ejemplo, con petacas que son cajas donde las piezas se meten de abajo hacia arriba y luego se sacan todas por abajo dejando siempre la pieza que se saca el mismo lugar, tal como se ilustra en la figura 15.

Figura 15. Uso de petacas



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Hay otras soluciones; por ejemplo, en electrónica es habitual pegar los componentes en bandas de papel y suministrarlos en rollos que se cargan en carritos que los van desarrollando y el manipulador va cogiendo el componente siempre en el mismo sitio.

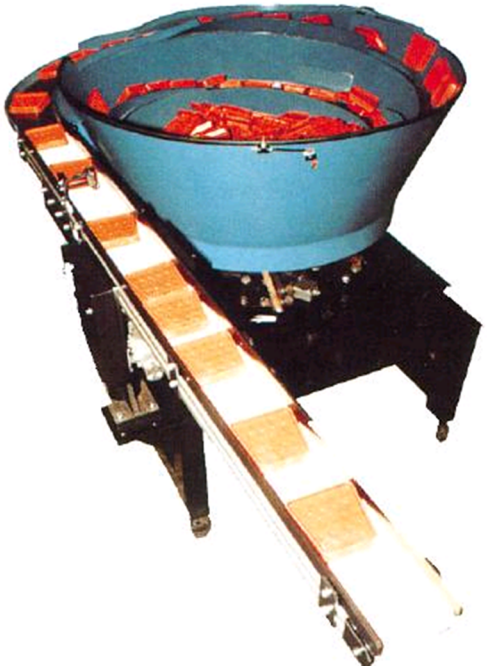
Cuando las piezas se presentan a raudales en un contenedor, entonces hay un sistema dentro de la estación que consigue separarlas y presentarlas en una posición y una orientación conocidas.

Una solución se puede obtener metiendo las piezas en una tolva e instalando una cinta transportadora inclinada sumergida en las piezas por un lado. Entonces a base de poner obstáculos debidamente estudiados se pueden hacer caer las que no suban bien orientadas y acabar consiguiendo que salgan todas con la misma orientación. No obstante, este esquema tiene el inconveniente de que una cara de la pieza queda siempre en contacto con la cinta y no se puede actuar sobre esta cara. Por eso el sistema que se utiliza mucho más habitualmente se basa en una idea similar, pero las piezas en vez de moras arrastradas por una cinta se hacen mover por vibración. Se trata de una vibración orientada de forma que la cuba primero sube y gira en un sentido y luego baja y gira en sentido contrario; las piezas saltan hacia el sentido en que gira la cuba al subir y así van avanzando. Como el movimiento tiene una amplitud muy pequeña, en observar las piezas no se ven los saltos y parece como si se movieran solas avanzando hacia arriba del camino de la cuba. Esto permite poner trampas y obstáculos tanto en los laterales como por encima o por de-

bajo de las piezas. Estas trampas pueden realizar la función de selectores de las piezas que ya vienen bien orientadas y de esta manera descarten las otras piezas haciéndolas caer otra vez a la cuba; o puede que hagan la función de orientación, de modo que las piezas, al pasar por ellas, si no vienen bien orientadas sean forzadas a cambiar de posición para orientarse bien.. En la figura 16 se ilustra un vibrador.

Los sistemas de vibración son eficientes y permiten posicionar piezas en una gran cadencia y fiabilidad pero son específicos para cada pieza. Si se quiere cambiar de pieza hay que cambiar la cuba, los parámetros de la vibración y las guías de los vibradores lineales de salida. Esto hace que este sistema requiera un cambio lento de utillajes y hace que el montaje automático sea un sistema rígido.

Figura 16. Vibrador

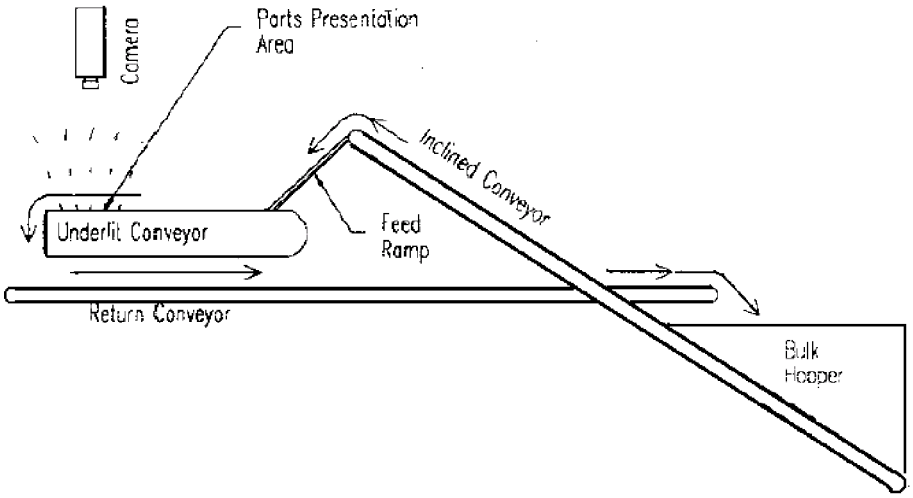


Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Una alternativa flexible consiste en utilizar la visión por ordenador en combinación con un robot para identificar y determinar la posición y la orientación de las piezas. En la figura se presenta un sistema que se basa en una cuba, tres cintas transportadoras y un sistema de visión por ordenador. Las piezas salen de la cuba arrastradas por la cinta inclinada que las deja caer resbalando por una rampa hacia otra cinta horizontal que se mueve más rápida que la primera. El hecho de que la segunda cinta se mueva más rápido que la primera provoca que las piezas que podían venir amontonadas tengan tendencia a separarse. Entonces una cámara capta la imagen de las piezas que hay sobre la cinta horizontal y un algoritmo encuentra primero su perfil después su centro de gravedad, el área los ejes principales de inercia y la inercia respecto a estos ejes.

Con estos datos se busca en una base de datos, se identifica la pieza de que se trata y se pasa la información de la posición y la orientación de los ejes a un robot que las va a coger cada una en su posición. Las piezas que no se pueden identificar vuelven a la cuba a través de la tercera cinta. En la figura 17 se ilustran estos conceptos.

Figura 17. Uso de visión por ordenador



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

2.2. Sujeción de las piezas

La sujeción de las piezas para conseguir que queden fijadas en el elemento terminal del robot o del manipulador requiere contacto con las piezas. Este contacto puede ser:

1) En una única superficie si la sujeción se basa en una ventosa que hace el vacío o en un electroimán.
2) En más de una superficie si se basa en pinzas que se abren y se cierran.

El contacto en una única superficie tiene muchas ventajas porque deja libres todas las caras de la pieza y facilita mucho la inserción sin que el elemento de sujeción interfiera con las otras piezas ya montadas en el producto pero no garantiza una fijación tan rígida como la sujeción con pinzas. La vibración o los golpes pueden provocar ligeras desviaciones de la posición relativa de la pieza respecto del brazo del robot o manipulador.

No se puede usar siempre dado que para utilizar electroimán las piezas deben ser de material ferromagnético y no siempre se da. Además, a veces aun siendo de material ferromagnético no interesa cogerlas con electroimán para evitar que les quede una magnetización remanente que podría perjudicar su funcionalidad en el producto. En el caso de la ventosa es necesario que la superficie de la pieza sea lisa sin porosidad y que no esté untada de fluidos, lo que no siempre puede ser.

Figura 18. Ventosas

Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Se trata de coger piezas que presentan una superficie plana por donde cogerlas. Se puede utilizar un único electroimán o una única ventosa para todas las piezas que estén dentro de unos límites de tamaños y peso. Esto hace que este sistema de sujeción hasta cierto punto sea universal. Pero si la superficie por la que se deben coger las piezas presenta curvatura, entonces hay que fabricar a medida el elemento terminal y pasa a ser un utillaje que hay que cambiar si se quiere coger una pieza diferente.

La sujeción con pinzas consta de dos partes: la pinza, que es el elemento que se abre y se cierra, y los dedos, que son la pieza en que se atornilla la pinza y que es la que hace contacto con la pieza. Hay varios tipos de pinzas, fundamentalmente las de dos y las de tres dedos (figura 19), y en el caso de dos dedos, las que se abren y se cierran manteniendo los dedos paralelos y las que lo hacen moviéndolos pivotando en ángulo.

Figura 19. Pinza de tres dedos

Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Las pinzas de tres dedos son adecuadas para coger piezas cilíndricas asegurando el autocentrado. Las de dos dedos para coger piezas presentan dos caras opuestas.

Cuando se cogen las piezas con pinzas es de prever que haya espacio para abrir y cerrar los dedos tanto en el punto de recogida como en el de inserción de la pieza en el producto. En el punto de recogida no representa un gran reto ya

que se puede diseñar de forma adecuada, pero el producto está diseñado para cumplir las funciones y eso lo condiciona mucho y puede provocar formas muy complejas en la parte exterior de los dedos.

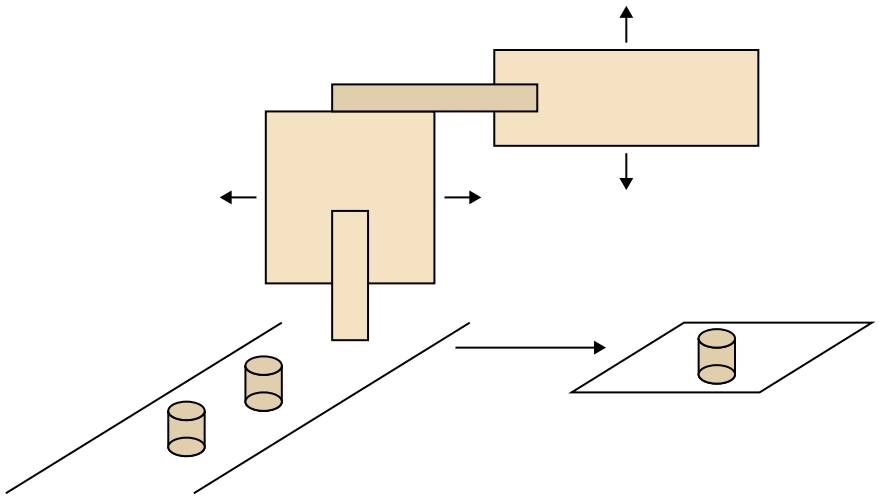
Si las piezas presentan caras planas los dedos pueden servir para varias piezas, pero si presentan caras curvas hay que fabricarlos a medida para cada pieza y cambiarlos si se quieren sujetar piezas diferentes.

En cuanto a proyectos de investigación, se ha trabajado en el desarrollo de pinzas universales basadas en dedos con múltiples pivotes que se puedan adaptar a las diferentes formas de las piezas o con manos de múltiples dedos que intentan reproducir la movilidad de la mano humana. Pero en la práctica industrial en el estado actual de la técnica la solución empleada es la pinza con dedos hechos a medida y sistemas automáticos de cambio de la mano completa si se quiere que la misma estación pueda coger piezas diferentes.

2.3. Movimiento e inserción de las piezas en el conjunto

La manipulación de las piezas desde el punto en el que se tiene controlada su posición y orientación hasta el punto del producto en el que se insertarán en la orientación adecuada para que entren se puede hacer con dos sistemas: empleando manipuladores o empleando robots.

Figura 20. Manipulador



Fuente: Vivancos, J.; Gomà, J. R., 1996.

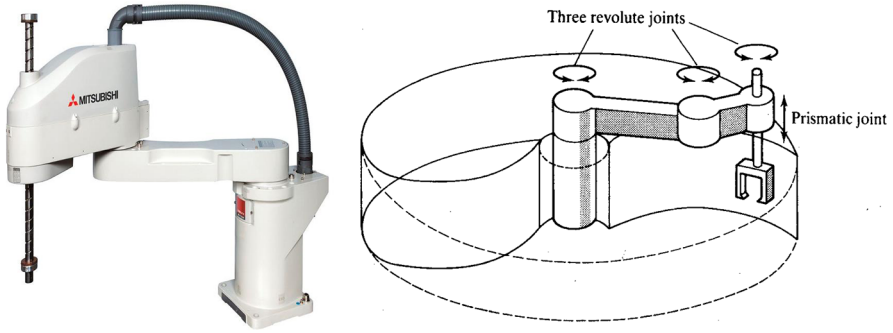
La solución más económica son los manipuladores formados por un par de cilindros neumáticos montados uno al extremo del otro con las correspondientes guías, de forma que el primero da el movimiento horizontal y el segundo, el movimiento vertical.

En la figura 20 se presenta un esquema de la configuración. Para poder emplear esta solución es necesario que las piezas se puedan insertar siguiendo una trayectoria recta vertical de arriba a abajo y que el sistema de identificación y posicionamiento entregue las piezas siempre todas en el mismo punto. A

veces cuando las piezas pueden venir con dos orientaciones diferentes se puede introducir un actuador de giro en el extremo del segundo cilindro y girar selectivamente las piezas que no lo necesitan.

Este sistema no es adecuado para coger piezas de una caja, aunque se presenten bien ordenadas y posicionadas con precisión en varios puntos de la caja. Las posiciones inicial y final en las trayectorias vertical y horizontal vienen limitadas por los cilindros neumáticos y admiten una cierta regulación moviendo los topes de final de carrera de los cilindros, pero esta regulación es manual. Por todo ello esta solución se utiliza en líneas de montaje automáticas rígidas que están pensadas para montar siempre la misma pieza. Para líneas de montaje automático flexibles se tiende a utilizar robots.

Figura 21. Robot Scara



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Un tipo de robot muy empleado en estaciones de montaje es el robot SCARA (figura 21), que tiene tres grados de libertad de rotación en torno a ejes verticales y un movimiento rectilíneo a lo largo de un eje vertical. En la figura se muestra un robot SCARA i el área de trabajo donde puede acceder.

Con este tipo de robot también está limitado a montajes en los que la pieza se pueda insertar moviéndola a lo largo de una línea recta vertical, pero se puede recoger la pieza en cualquier punto de su área de trabajo, se puede controlar cualquier cambio de orientación de la pieza que consista en un giro en torno al eje vertical y se puede cambiar para programar los puntos de recogida sin necesidad de ajustes manuales. Cuando se diseña un producto para ser montado de forma automática uno de los principios básicos que se tienen en cuenta es el de minimizar las direcciones de montaje y por ello a menudo muchos productos se pueden montar íntegramente utilizando este tipo de robots.

Figura 22. Robot Delta

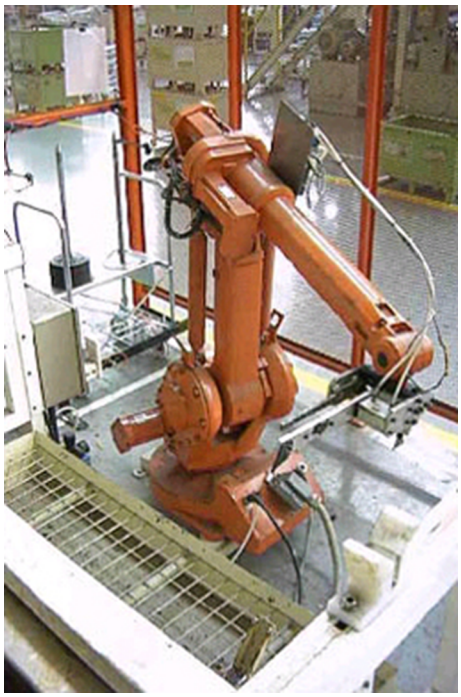
Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

Una alternativa a los robots SCARA son los robots paralelos y en particular el robot Delta. Este robot controla la posición de la mano con tres grados de libertad rotativos fijados en la bancada. Esto hace que los tres motores estén fijos en la bancada y que los elementos móviles sean muy ligeros; de esta forma se pueden conseguir grandes aceleraciones y velocidades. El inconveniente del robot Delta es que las barras que unen los motores con la mano barren el volumen que hay encima del plano en que se mueve la mano, pero esto no es un problema para aplicaciones de montaje. En la figura se muestra la imagen de un robot Delta.

Con estos robots se puede insertar la pieza siguiendo cualquier trayectoria y se puede ir a buscar en cualquier punto y cambiar los puntos y las trayectorias por programa.

Lo único que no se puede modificar con el robot Delta es la inclinación relativa entre el eje de la pieza y el del producto durante el movimiento que sigue la trayectoria de inserción. Cuando se necesita esto o que el robot pueda esquivar obstáculos se puede recurrir al robot antropomórfico (figura 23), que tiene un mínimo de 5 grados de libertad rotativos. En la figura se presenta un robot antropomórfico.

Figura 23. Robot antropomórfico



Fuente: J. R. Gomà Ayats et al., 2010.

2.4. Otras operaciones de montaje

En la línea de montaje la mayoría de estaciones lo que hacen es ir añadiendo piezas al producto, pero hay algunas que hacen otras cosas. Fundamentalmente se pueden identificar las siguientes:

1) Extracción de los productos acabados.
2) Cambios de posición del producto dentro del palé o del palé respecto de la línea para que las siguientes estaciones puedan insertar piezas en una dirección y posición diferentes.
3) Aportación dosificada de fluidos: lubricantes, adhesivos, aceites hidráulicos, etc.
4) Operaciones de unión: prensado, puntos de soldadura.
5) Ensayos funcionales del producto para verificar su calidad.

La **estación de extracción** de productos acabados necesita sujetar los productos y trasladarlos, pero no necesita el posicionamiento de piezas. Esta estación debe poderse coordinar con el sistema de transporte y, por lo tanto, debe tener un sistema que permita almacenar un número suficiente de productos entre maniobra y maniobra del sistema de transporte. En muchas líneas se puede hacer que esta estación también introduzca en el palé la primera pieza, que es la carcasa del producto. En este caso pasa a comportarse de forma idéntica a las estaciones de carga y descarga de máquinas herramienta y se puede diseñar una mesa de trabajo con un funcionamiento análogo.

Las **estaciones de cambio de posición** solo necesitan tomar el producto o el palé, moverlo y volverlo a dejar, por lo que no tienen que realizar el posicionamiento de piezas.

Las de **dosificación de fluidos**, al igual que las de **operaciones de unión**, solo tienen que mover el elemento que hace la función (la boquilla del fluido, el terminal del sonotrodo o del electrodo, etc.) en el punto del producto donde se ha de realizar la operación. En el caso de dosificación de fluidos, se necesitan bombas dosificadoras como elemento terminal, que se deben elegir con la precisión y volumen requeridos para cada caso y prever sistemas antigoteo.

Los **ensayos funcionales** pueden ser muy complejos y requieren un diseño específico para cada producto. Pueden comportar robots o manipuladores que hacen maniobras cogiendo el producto, contactos eléctricos que alimentan el producto, sensores que detectan que el producto se mueve correctamente, fototransistores que detectan que *leds* del producto encienden adecuadamente, inyección de aire a presión y medida de las pérdidas de carga para verificar la estanqueidad del producto o sistemas de visión por ordenador para comprobar que el producto es completo y no tiene defectos visibles.

Aparte de estas estaciones, las e**staciones que aportan piezas que no son sólidos rígidos** presentan especiales dificultades. Es el caso de gomas elásticas, telas o cables e hilos. Estos componentes requieren tecnologías específicas para cada uno y en algunos casos no se ha resuelto el problema genérico de automatización de su manipulación. Los sistemas en los que manualmente se prepara la pieza son mixtos para facilitar después su montaje automático.

2.5. Flexibilidad de las estaciones de montaje

Tradicionalmente las líneas automáticas de montaje eran rígidas. Esto significa que se diseñaban para montar un único producto. Si había que montar un producto diferente se debía diseñar y montar una nueva línea y como mucho se podían reaprovechar algunos componentes de la anterior. Por eso las empresas, cuando sacaban un nuevo producto al mercado, inicialmente hacían el montaje manual. Solo decidían pasar el montaje automático cuando comprobaban que el producto tenía aceptación en el mercado y tenían dimensionado el volumen de la demanda y confiaban en que el producto tendría una vida suficientemente larga para justificar la amortización de la inversión.

Con líneas de montaje flexibles se puede acudir al montaje automático incluso en el caso de productos con volúmenes pequeños de producción. En cuanto a la línea de transporte, para cambiar de producto hay que cambiar los palés que son un utillaje e imponen un tiempo de cambio. En el caso de palés que se mueven independientes unos de otros el cambio de estos es más rápido y se puede hacer automáticamente. Este es un motivo adicional para utilizar este tipo de palés.

En cuanto a las estaciones, a lo largo del texto se han ido comentando las soluciones que se utilizan en las estaciones de montaje para resolver las tres funciones de posicionamiento, de sujeción y de manipulación indicando cuáles son flexibles en el sentido de que permiten cambiar de montar una pieza montar otro sin tiempo para hacer modificaciones físicas a la estación y cuáles no. A continuación se resumen, en la tabla 3, estas soluciones clasificadas según su flexibilidad.

Tabla 3. Resumen de las soluciones que se utilizan en las estaciones de montaje para resolver las tres funciones.

Función	**Soluciones rígidas**	**Soluciones flexibles**
Posicionamiento	Petacas -> Piezas que conservan la posición desde la fabricación *Vibradores* -> Piezas que han perdido la posición.	Cajas -> Piezas que conservan la posición. *Visión por ordenador* -> Piezas que han perdido la posición.
Sujeción	Pinzas, ventosas, electroimanes.	Sistemas de cambio automático de la mano del robot. Pinzas universales.
Inserción	Manipulador formado por dos cilindros neumáticos.	Robots SCARA, Delta o antropomórficos.

En el caso de soluciones rígidas cada estación solo puede montar una única pieza dado que cada uno de los componentes que realizan cada una de las tres funciones es específico para una pieza. Esto hace que la línea tenga tantas estaciones como piezas tiene el producto más las necesarias para las operaciones auxiliares. La estación más lenta es la que marca el ritmo de la línea y su eficiencia. No se puede hacer nada para equilibrarla aparte de intentar aumentar al máximo la velocidad de las estaciones lentas. Si una estación se avería toda la línea se detiene y no se puede seguir el montaje de productos hasta que se haya reparado.

En el caso de soluciones flexibles, se puede hacer que cada estación monte una sola pieza o más de una. Cuantas más piezas monte cada estación menor será el ritmo de montaje, pero menos estaciones necesitará la línea. La línea debe equilibrarse asignando piezas a las estaciones a fin de maximizar su eficiencia. Si una estación se avería se puede tratar de asignar el montaje de las piezas que hacía aquella estación a las otras y seguir montando productos a un ritmo menor hasta que la estación averiada haya sido reparada.

Bibliografía

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