Arquitectura física de las máquinas de control numérico

PID_00253860

Joan Ramon Gomà Ayats

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas

Universitat Oberta de Catalunya

Joan Ramon Gomà Ayats

(Santa Coloma de Gramenet, 1960). 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.

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. Comparación de la arquitectura de una máquina de control numérico con la de una máquina convencional 7

2. Accionamientos 10
2.1. Accionamientos lineales 11
2.2. Motores 13
2.2.1. Hidráulicos 13
2.2.2. Neumáticos 13
2.2.3. Eléctricos 14
2.3. Accionamientos giratorios 19

3. Sensores 21
3.1. Señal 21
3.2. Información 22
3.3. Señales normalizadas 23
3.4. Señales analógicas y digitales 24
3.5. Clasificación de los sensores 25
3.5.1. Sensores de posición 26
3.5.2. Sensores de velocidad 30
3.5.3. Sensores de presencia. Finales de carrera 31

4. Control 33

5. Componentes complementarios que habitualmente hay en las máquinas de control numérico y no en las convencionales 42
5.1. Cambio automático de herramientas 42
5.2. Sistemas de carga y descarga de piezas 44
5.3. Sistemas de evacuación de la viruta 46
5.4. Sistemas de lubricación y refrigeración especiales 47
5.5. Sistemas de limpieza 48

6. Conceptos de máquina específicos del control numérico 49
6.1. Tornos con herramientas motorizadas y eje C y tornos con doble torreta 49
6.2. Máquinas multifuncionales 50

Bibliografía 53

Introducción

Lo que caracteriza a una máquina de control numérico es el hecho de que puede trabajar leyendo y ejecutando un programa escrito en una memoria y controlar la máquina de modo que siga las instrucciones escritas en este programa.

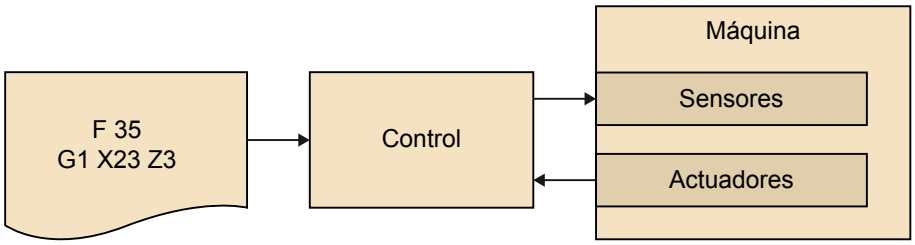
Por ello, para cada una de las acciones que debe poder hacer, la máquina tiene que disponer de un actuador.

Un actuador es un sistema alimentado con una fuente externa de energía, capaz de recibir una señal y regular la aplicación de esta energía, transformándola de tal manera que provoque un cambio de estado de la máquina de acuerdo con la información codificada en la señal recibida. Por ejemplo, un actuador para abrir y cerrar la puerta de la máquina puede estar compuesto por un cilindro neumático y una electroválvula. La fuente de energía externa que lo alimenta es el aire comprimido. La señal viaja por un cable eléctrico, que lo transporta codificado en 0 V o 5 V. Cuando el cable de señal está a 5 V, el electroimán de la electroválvula conecta el aire comprimido al cilindro neumático, de modo que transforma la energía neumática en energía mecánica y provoca la apertura de la puerta. Cuando el cable de señal está a 0 V, la electroválvula se desactiva, conecta el aire comprimido a la inversa y el cilindro neumático provoca el cierre de la puerta.

Además de los actuadores, una máquina de control numérico necesita disponer de sensores que envíen señales con información del estado de la máquina en cada momento. Por ejemplo, en el caso anterior, un par de microrruptores pueden abrir y cerrar un circuito eléctrico alimentado con 5 V en el momento en que la puerta está cerrada o abierta, respectivamente. Los sensores permiten que el control numérico no actúe totalmente a ciegas. Así, cuando uno de los dos sensores está enviando una señal de 5 V, significa que la puerta está abierta o cerrada, y cuando los dos envían una señal de 0 V, significa que la puerta está o bien en proceso de abrirse/cerrarse o bien se ha quedado atascada en medio por algún motivo imprevisto.

Así, la arquitectura conceptual de una máquina de control numérico se puede esquematizar con la de la figura 1. El control lee línea por línea el programa almacenado en una memoria, y ejecuta cada línea leyendo el estado de la máquina con la información que recibe de los sensores y enviando órdenes a los actuadores a través de señales.

Figura 1. Arquitectura conceptual de una máquina de control numérico



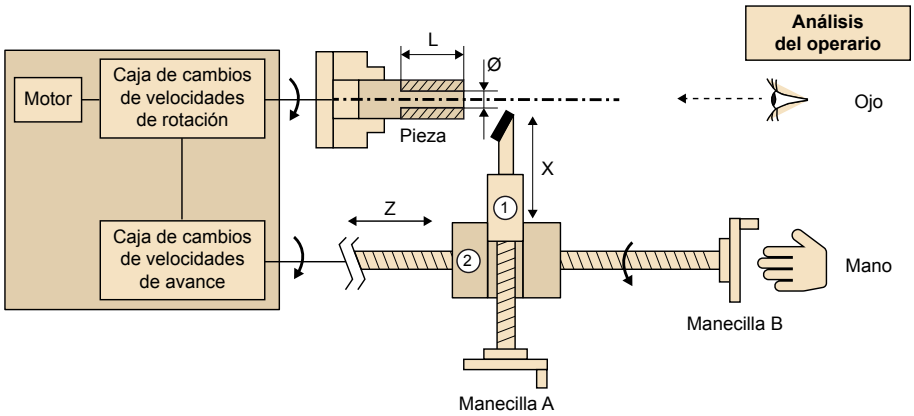
Fuente: Elaboración propia

1. Comparación de la arquitectura de una máquina de control numérico con la de una máquina convencional

Las máquinas convencionales evolucionaron a partir de las de las fábricas con máquina de vapor y embarrado. En aquellas fábricas, una sola máquina de vapor transmitía la potencia a través de unas barras giratorias a todas las máquinas. Cada máquina tenía una polea y una correa que tomaba la potencia del embarrado y la transmitía a todas las partes móviles de la máquina. A finales del siglo XIX y principios del XX, con la electrificación, se sustituyeron las máquinas de vapor y los embarrados por motores eléctricos individuales para cada máquina. Cada máquina tenía su motor eléctrico, que generaba la energía mecánica para mover la máquina, pero el resto de la arquitectura de la máquina, conceptualmente, se conservó.

En la figura 2, se representa un dibujo simplificado de un torno convencional

Figura 2. Esquema de un torno convencional



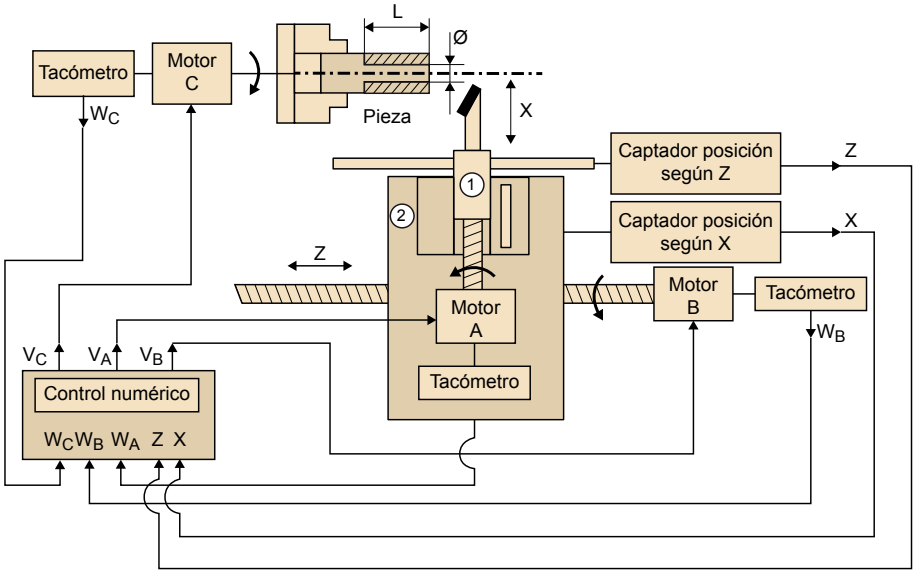
Fuente: J. Vivancos (1997)

El motor mueve el cabezal fijo a través de una caja de cambios que permite que el operario elija la velocidad de giro de la pieza, para poder obtener la velocidad de corte adecuada al material de la pieza y de la herramienta. El mismo motor, a través de otra caja de cambios, transmite el movimiento al carro portaherramientas. Esta segunda caja de cambios permite variar la relación entre la velocidad de giro de la pieza y la velocidad de avance de la herramienta, para poder elegir el avance (distancia recorrida por la herramienta cada vez que la pieza gira una vuelta). El movimiento se transmite al carro portaherramientas a través de una cadena cinemática más o menos complicada, que no se representa en el dibujo. Una palanca selectora permite elegir si el movimiento de avance se transmite al eje de cilindrar (manecilla B, movimiento a lo largo del eje Z) o al de refrentar (manecilla A, movimiento a lo largo del eje X). El eje que no recibe el movimiento del motor principal es accionado por el operario a través de la correspondiente manecilla, para determinar la profundidad de

paso antes de empezar a cortar, y permanece quieto mientras se produce la operación de corte. Empleando instrumentos de medida, el operario observa la diferencia entre la medida de la pieza en bruto y la del plano, y acciona las manecillas para ir eliminando el material. También detiene el movimiento cuando el avance ha hecho todo su recorrido.

La máquina de control numérico se puede representar esquemáticamente en la figura 3.

Figura 3. Representación esquemática de un torno de control numérico



Fuente: J. Vivancos (1997)

La primera diferencia que se observa es que cada movimiento está accionado por un motor independiente que le transmite la potencia directamente, sin pasar por una caja de cambios. Esta diferencia es posible porque la sincronización de los diferentes movimientos ya no se obtendrá gracias a una transmisión mecánica, que los deriva todos ellos del mismo motor, sino que será el control numérico el responsable de garantizar esta sincronía. En segundo lugar, hay sensores que envían señales con información de la velocidad y la posición de estos movimientos a cada instante. Esta información es lo que permite controlar la sincronía entre el movimiento de avance del carro portaherramientas y el de rotación del cabezal fijo, pero también permite controlar la posición del movimiento para dar la profundidad de pasada y sustituir esta función, que en el torno convencional hacía el operario midiendo la pieza y moviendo la manecilla, mirando el desplazamiento medido con el nonio de la máquina.

Esta diferencia conceptual entre la máquina convencional y la máquina de control numérico supone una serie de consecuencias derivadas importantes:

1) La trayectoria de la punta de la herramienta ya no tiene que ser necesariamente paralela a uno de los ejes ni en línea recta. Puede seguir cualquier curva, cosa que en las máquinas convencionales requería el desarrollo de

dispositivos especiales que recorrían una plantilla o un modelo con un palpador.

2) La velocidad de giro del cabezal principal se puede variar continuamente en tiempo real mientras la herramienta está trabajando. En las máquinas convencionales, el cambio de velocidad no es de forma continua. Para hacerlo, hay que detener la operación de corte y cambiar la marcha. En el caso del torneado, esta ventaja es muy importante dado que, cuando se hacen operaciones en las que el diámetro sobre el que se corta varía, se puede mantener una velocidad de corte constante, variando la velocidad de rotación del cabezal.

3) La mayor simplicidad mecánica da mucha libertad, al diseñar máquinas herramienta, lo que abre la puerta a combinaciones y arquitecturas que con máquinas convencionales no eran viables o resultaban muy difíciles, tales como tornos con herramientas motorizadas, máquinas multifuncionales, etc.

4) El hecho de construir una máquina que funcionará sin la atención de un operario abre la necesidad de automatizar acciones que en las máquinas convencionales las hace el operario, como por ejemplo el cambio de herramientas, la extracción de viruta, la carga de piezas en bruto y la descarga de las piezas acabadas a la máquina y desde la misma.

5) Las máquinas convencionales, dado que son controladas por un operario, permiten confiar en su habilidad para compensar dificultades de control que imponen las soluciones mecánicas. Para facilitar el control del movimiento, la parte mecánica de la máquina aplica soluciones distintas de aquellas de las máquinas convencionales. Fundamentalmente, estas diferencias se centran en las transmisiones y las guías. Se implementan guías con rodadura, en lugar de roce y transmisiones con rodadura y sin juego.

6) Por último, el hecho de que la máquina esté controlada automáticamente permite que las condiciones de corte se apliquen sacando el máximo partido de las posibilidades del material de las herramientas, mientras que en máquinas controladas por operarios, por prudencia, a menudo se hacen trabajar por debajo de sus posibilidades. Este trabajo al límite de las posibilidades lleva a fuerzas de corte mayores y potencias superiores. Esto se combina con el hecho de que no se puede confiar en el operario para corregir los errores debidos a que las fuerzas de corte provocan deformaciones elásticas en la bancada de la máquina y los mangos de las herramientas que, a su vez, introducen errores en la forma obtenida en las piezas. Por todo esto, la tendencia es construir estas máquinas con bancadas muy robustas que puedan soportar estas cargas con una deformación elástica mínima.

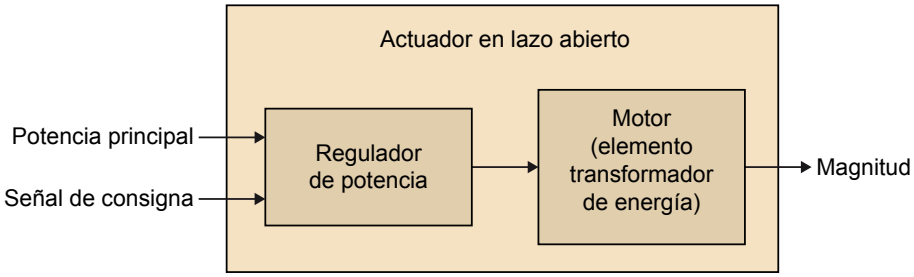
2. Accionamientos

Tal y como se ha comentado en la introducción, un accionamiento es un dispositivo que recibe señales de control y energía de una fuente externa y regula la cantidad de energía de la fuente externa que se aplica a un elemento que la transforma, para garantizar que una determinada magnitud de la máquina sigue la consigna impuesta por la señal recibida.

Hay dos clases de actuadores: los de lazo abierto y los de lazo cerrado. Los actuadores de lazo abierto responden a un esquema como el de la figura 4.

Cuando un actuador debe controlar un movimiento, también se le llama *accionamiento*. En las máquinas de control numérico, la mayoría de los actuadores son accionamientos.

Figura 4. Esquema de un actuador en lazo abierto



Fuente: Elaboración propia

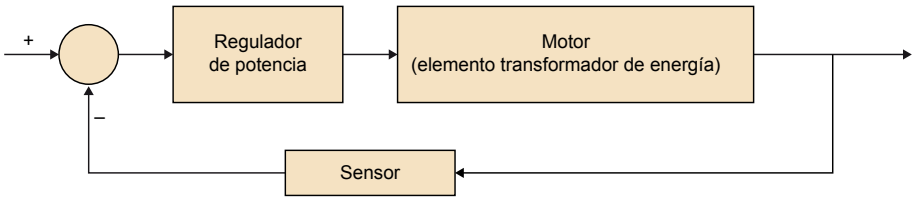
Este tipo de actuadores están compuestos por dos elementos: un regulador de la energía y un elemento transformador de esta energía. El regulador regula la potencia aplicada al transformador y el transformador transforma la energía externa en la forma de energía necesaria para modificar la magnitud de la máquina. Por ejemplo, se puede construir un actuador en lazo abierto que controle el par aplicado a un destornillador, combinando una válvula reguladora de presión con un motor hidráulico. En este caso, la potencia externa es hidráulica. Se parte de una central hidráulica que suministra aceite a presión. La válvula reguladora de presión modifica la presión del aceite, haciendo que sea la indicada en la señal que recibe. Al aplicar este aceite al motor hidráulico, este provoca un par que es proporcional a la presión aplicada. La constante de proporcionalidad es la cilindrada (el volumen de aceite por ángulo girado del motor). Con este actuador, se controla el par aplicado pero no la velocidad de giro. Esta es proporcional al caudal de aceite, que es una variable que no se regula.

Para poder construir un actuador en lazo abierto, es necesario que exista un dispositivo transformador de energía que permita regular la magnitud que se quiere controlar a partir de regular uno de los parámetros que determinan la potencia aplicada.

La potencia aplicada puede ser eléctrica de corriente continua, y los dos parámetros que la regulan son la tensión y la intensidad. O puede ser alterna, y entonces, además de la tensión y la intensidad eficaz, existe la frecuencia. Si la potencia aplicada es hidráulica o neumática, los parámetros son la presión y el caudal.

Los actuadores de lazo cerrado responden al esquema de la figura 5.

Figura 5. Esquema de un actuador en lazo cerrado



Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los actuadores en lazo abierto, además del elemento regulador y el transformador, estos actuadores contienen un sensor que retroalimenta el regulador. Este tipo de actuador es necesario cuando la magnitud sobre la que se quiere actuar no está directamente relacionada con la potencia aplicada al elemento transformador. Por ejemplo, si se quiere controlar la posición angular empleando un motor de corriente continua, la posición no está directamente relacionada ni con la intensidad ni con la tensión aplicada al motor. Entonces, el regulador compara la posición deseada con la posición real y alimenta el motor para que gire a derecha o izquierda más o menos rápido, en función de la diferencia entre la posición deseada y la real y la evolución en el tiempo de esta diferencia, hasta que la diferencia es cero o muy pequeña.

Los actuadores en lazo cerrado son más complejos y más caros que los actuadores en lazo abierto, porque necesitan el sensor, y además el regulador es más complejo. Por eso, es interesante estudiar los componentes disponibles para construir los diferentes actuadores y examinar las posibilidades de conseguirlo con actuadores en lazo abierto.

2.1. Accionamientos lineales

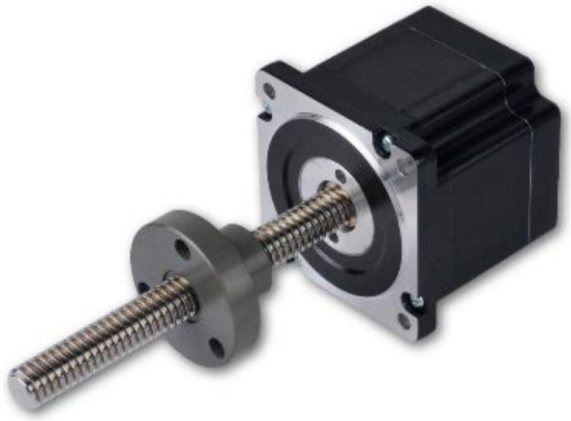
A veces, es posible modificar la posición lineal conectando directamente la máquina con un motor eléctrico lineal como el de la figura 6.

Figura 6. Accionamiento lineal

Fuente: www.kml-technology.com

Sin embargo, las características de los imanes permanentes y los electroimanes de los que se dispone hoy día permiten construir motores lineales que hacen una fuerza relativamente pequeña comparada con la utilización de un motor eléctrico rotativo, y una transmisión que transforme el movimiento rotativo en uno lineal. Esta transformación se puede hacer con un mecanismo de tornillo-tuerca, como en la figura 7.

Figura 7. Transformación de tornillo-tuerca



Fuente: www.omsinmotion.com

En los dos casos, hay unas guías que obligan al elemento móvil a seguir una trayectoria recta. En general, el accionamiento constará de:

1) Un motor que genera movimiento de rotación.
2) Una transmisión que transforma el movimiento de rotación en movimiento lineal.
3) Unas guías que obligan al elemento móvil a moverse a lo largo de una línea recta.

2.2. Motores

Los motores son los elementos que transforman la potencia primaria en potencia mecánica. Los motores se pueden clasificar en función del tipo de potencia primaria con la que trabajan. Si la potencia primaria es eléctrica, serán motores eléctricos; si es hidráulica, hidráulicos; y si es neumática, neumáticos. Estos tres tipos de motor se utilizan con mayor o menor profusión en la construcción de accionamientos para máquinas de control numérico.

2.2.1. Hidráulicos

Los motores hidráulicos presentan un buen ratio peso/potencia y permiten construir actuadores en lazo abierto para controlar par o velocidad (con una válvula reguladora de presión o de caudal). El problema que presentan es que la fuente primaria de potencia en la industria no es hidráulica, por lo que en realidad, para usarlos, hay que implementar primero una central hidráulica en la máquina, accionada por un motor eléctrico. Aun así, el hecho de poder instalar esta central en la bancada de la máquina, cuando el actuador muchas veces debe estar sobre elementos móviles, hace que sea una opción que se utiliza habitualmente para máquinas de grandes dimensiones que deben mover grandes pesos aplicándoles grandes fuerzas.

2.2.2. Neumáticos

Los motores neumáticos tienen una relación peso/potencia peor que los otros, porque el aire comprimido no se puede usar a altas presiones. Al aumentar la presión del aire, baja el rendimiento energético y aumenta el peligro. Utilizar el aire comprimido para transportar energía entre dos puntos requiere, por un lado, comprimir el aire y, por otro, impulsar el aire comprimido por la tubería. La energía empleada en comprimirlo se pierde después, al entregarlo a la atmósfera, y solo se aprovecha la energía empleada para impulsarlo por la tubería. En instalaciones donde el aire se comprime a 6 atmósferas, el rendimiento energético no puede ser superior al 25 % y si se intentara utilizar aire comprimido a 100 atmósferas, el rendimiento sería inferior al 1 %. Esta energía almacenada en el aire comprimido es un peligro, porque si revienta alguna tubería, se libera de repente y se puede emplear en proyectar partes sólidas a altas velocidades, que pueden provocar graves accidentes.

Aun así, muchas instalaciones industriales disponen de instalación de aire comprimido, y las máquinas que utilizan motores neumáticos pueden confiar en conectarse a la instalación general de la fábrica sin necesidad de incorporar un compresor del aire en la propia máquina. Además, son muy adecuados para obtener ejes que giren a altas velocidades.

Por todo ello, los motores neumáticos se usan poco en las máquinas de control numérico, aunque para movimientos auxiliares, se emplean con relativa frecuencia herramientas motorizadas.

2.2.3. Eléctricos

La energía primaria disponible en las fábricas es eléctrica, y esto favorece la utilización de motores eléctricos para construir los accionamientos, salvo los casos que se han comentado antes, en los que está claramente justificado elegirlos de otro tipo. Además, en el caso de motores hidráulicos o neumáticos, para controlarlos necesitan electroválvulas que, a su vez, se controlan con energía eléctrica. De este modo, el accionamiento acaba teniendo unos componentes de electrónica de señal y de electrónica de potencia para controlar las válvulas que su vez controlan los motores, mientras que los motores eléctricos se controlan directamente con la electrónica de potencia.

Hay varias clases de motores eléctricos, y cada uno de ellos es más o menos adecuado para constituir un accionamiento, en función de la magnitud que se deba controlar.

Los motores eléctricos son en realidad motores electromagnéticos. Hay motores electrostáticos, pero tienen una relación peso/potencia muy desfavorable, y en la práctica no se usan en aplicaciones industriales. Por lo tanto, los motores electromagnéticos utilizan la corriente eléctrica para generar campos magnéticos, y son estos campos magnéticos los que provocan las fuerzas mecánicas. Tienen un elemento destinado a fijarse a la bancada de la máquina, y otro es el elemento que se quiere mover.

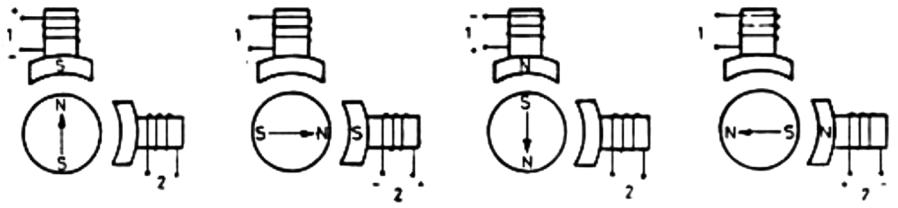
Los campos magnéticos provocan la aplicación de una fuerza entre el elemento fijo y el móvil, lo que hace que este último se mueva respecto al primero, y así llevan a cabo la función de motor.
A diferencia de los electroimanes, los motores disponen de una multiplicidad de polos norte y sur. El movimiento del elemento móvil respecto al fijo se restringe, de modo que la distancia de los entrehierros no varíe, con lo que las fuerzas magnéticas se mantienen relativamente constantes. En cambio, en los electroimanes, el movimiento provoca la disminución de la distancia del entrehierro, con lo que la fuerza varía con el cubo de la distancia del entrehierro.

En la mayoría de los motores eléctricos, el elemento móvil gira y se llama rotor, pero también es posible que tenga un movimiento rectilíneo, y en este caso se dice que son *motores lineales*. Los motores lineales se pueden entender conceptualmente como motores rotativos con radio infinito. Cualquier tipo de motor giratorio se puede traducir en un motor lineal, empleando el mismo concepto de funcionamiento. El elemento fijo se denomina *estator*.

Motores paso a paso

Los motores paso a paso son un tipo de motor síncrono. En el estator, tienen unos electroimanes que generan una serie de polos magnéticos. En el rotor, pueden tener imanes permanentes o solo hierro (en este caso, se denominan *motores de reluctancia*). Si los electroimanes del estator se alimentan con corriente continua, generan unos polos magnéticos que aplican unas fuerzas al rotor y lo hacen girar un ángulo, hasta que llega a una posición de mínima energía y se detiene. Cambiando la polaridad de la corriente de los electroimanes del estator, se vuelve a hacer girar el rotor otro ángulo. De esta manera, alimentando el estator a pulsos, se consigue que el rotor vaya girando el ángulo deseado.

Figura 8. Funcionamiento de motor paso a paso



Fuente: J. Vivancos (1997)

Controlando el número de pulsos, se puede controlar el ángulo girado, y controlando la frecuencia de los pulsos, se puede controlar la velocidad. Por lo tanto, los motores paso a paso son unos buenos candidatos para construir accionamientos en los que se controle tanto la velocidad como la posición en lazo abierto.

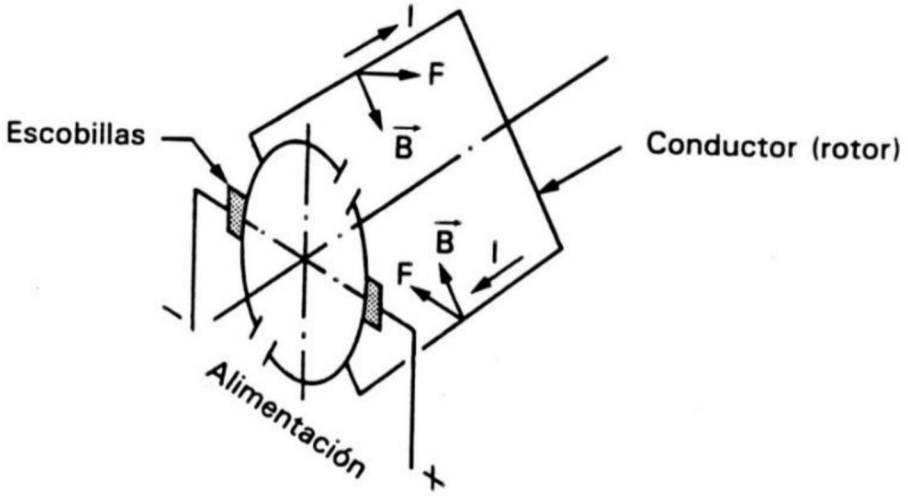
El inconveniente del control en lazo abierto de los motores paso a paso es que, si en un momento dado el par resistente es superior a lo que hace el motor, este no gira. Se dice que pierde un paso. Entonces, el control calcula que la posición del accionamiento es la que debería tener si no se hubiera perdido el paso, y deja de controlar correctamente. De ahí que los motores paso a paso en lazo abierto solo se utilizan en aquellas aplicaciones en las que se puede garantizar que el par resistente nunca será superior al que aplica el motor. Esto lo limita mucho en el caso de máquinas herramienta.

Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua son en realidad dos máquinas combinadas en una sola. Por un lado, un sistema de delgas y escobillas transforma la corriente continua en corriente alternativa que alimenta los electroimanes del rotor. Por otro lado, el motor eléctrico propiamente dicho puede tener en el estator imanes permanentes o electroimanes que generan un campo magnético permanente. La conexión de las delgas con los bobinados de los electroimanes del rotor es tal que el campo magnético que generan permanece des-

fasado respecto al que genera el estator, por lo que aparecen unas fuerzas magnéticas que tienen tendencia a hacerlo girar, pero antes de llegar a la posición de equilibrio, la conexión conmuta y se vuelve a la situación inicial.

Figura 9. Esquema motor de continua



Fuente: J. Vivancos (1997)

Dado que el par es proporcional a la fuerza, la fuerza es proporcional al flujo magnético y el flujo magnético es proporcional a la intensidad de la corriente, al final resulta que el par es proporcional a la intensidad M = k * Y. Esto hace que, regulando la intensidad de la corriente, se puedan emplear estos motores para construir accionamientos en los que sea posible regular el par en lazo abierto. Por ejemplo, si una máquina tiene que atornillar un tornillo controlando el par de apriete, puede ser una elección adecuada.

Además, por el principio de conservación de la energía, la potencia eléctrica que recibe el motor debe ser igual a la potencia mecánica que entrega menos las pérdidas que se transforman en calor. Por tanto, I * V = M * w * (rendimiento). Si el rendimiento es muy cercano a 1, teniendo en cuenta que M = k * Y, resulta que I * V = k * Y * W, y por tanto V = k * w, es decir, la velocidad angular es aproximadamente proporcional a la tensión. Esto hace que regulando la tensión se pueda controlar en lazo abierto de manera muy aproximada la velocidad angular. Así, por ejemplo, para construir el accionamiento del cabezal principal de una máquina-herramienta en la que solo hay que regular la velocidad angular, se puede plantear el uso de un motor de corriente continua con un control en lazo abierto.

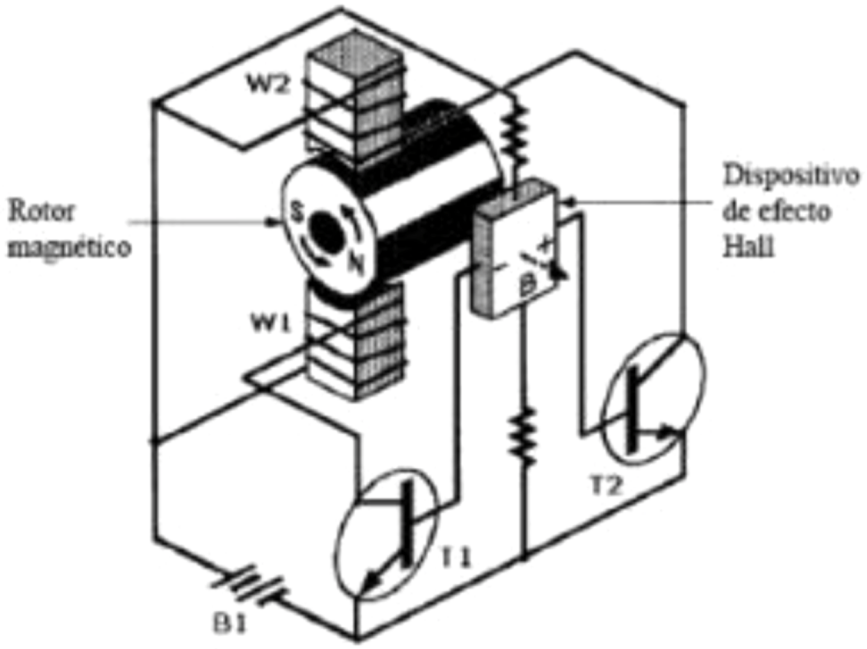
Para poder controlar la posición, es preciso un control en lazo cerrado en el que un sensor envía al control información de la posición y se regula la tensión, con el fin de aumentar o disminuir la velocidad, en función de la diferencia entre la posición actual y la deseada. Cuando se alcanza la posición deseada, el sistema alcanza un equilibrio en el que cualquier desviación provoca la alimentación del motor en el sentido adecuado para corregirla. Si el eje de salida recibe un par que intenta apartarlo de la posición de consigna, el control reacciona alimentando el motor para recuperar la posición, y termina

alimentándolo con una intensidad que genera un par que equilibra el par exterior. Dado que la reacción del control es muy rápida, aparentemente el eje de salida queda bloqueado en la posición de consigna.

Motores sin escobillas

Los motores sin escobillas (*brushless*, figura 10) conceptualmente son idénticos a los motores de corriente continua, pero la conmutación de la corriente, en vez de hacerse con el sistema mecánico de delgas y escobillas, se lleva a cabo con un sensor de posición que envía una señal para hacer la conmutación empleando componentes de electrónica de potencia. En los motores de corriente continua, el sistema de delgas y escobillas sufre desgaste debido al roce y a las chispas que saltan al conmutar la corriente, y esto hace que necesiten mantenimiento. El solo hecho de eliminar este sistema ya es una ventaja para los motores sin escobillas. Además, este hecho permite que en vez de montar los electroimanes en el rotor, se puedan montar en el estator. En el rotor se montan imanes permanentes. Los imanes permanentes están hechos de materiales que tienen una densidad mucho menor que el hierro y el cobre con el que se hacen los electroimanes, y esto hace que el rotor tenga menos masa y, por lo tanto, menos inercia, lo que facilita la aceleración y el control de posición. Otra ventaja es que los electroimanes sufren pérdidas de energía debidas al efecto Joule en los conductores y a las corrientes de Foucault y la histéresis en el hierro. Estas pérdidas se transforman en calor que hay que evacuar, pero el rotor está encerrado dentro del estator y, por lo tanto, es difícil de refrigerar. En cambio, en los motores sin escobillas, al montar los electroimanes en el estator, su refrigeración es mucho más fácil, y esto permite que estos motores tengan una relación peso-potencia más favorable.

Figura 10. Esquema brushless



Fuente: J. Vivancos (1997)

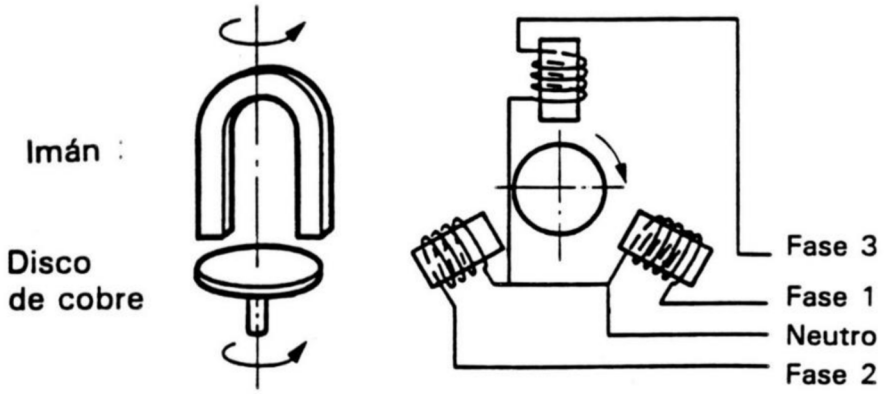
El inconveniente de los motores sin escobillas es que la electrónica de control y de potencia tiene un coste que puede superar al del resto del motor. Esto hace que no se utilicen en aplicaciones convencionales. Sin embargo, para la construcción de accionamientos de máquinas de control numérico, en el caso de tener que hacer un control en lazo cerrado porque se pretende controlar la posición, no se trata en realidad de un coste que hay que añadir, ya que en todo caso serán necesarias en gran parte. Por este motivo, la mayoría de los motores empleados para la construcción de accionamientos en los que se debe controlar la posición en las máquinas de control numérico, los motores que se utilizan son motores sin escobillas.

Motores asíncronos

Cuando se hace girar un imán cerca de un conductor, se observa que el conductor experimenta un par que tiene tendencia a hacerlo girar siguiendo el imán. Esto se debe a que, desde el punto de vista del conductor, se observa un campo magnético variable que induce una fuerza electromotriz, la cual genera unas corrientes que provocan un campo magnético que se opone a la variación del campo magnético provocado por el giro del imán

El motor asíncrono tiene electroimanes en el estator que se alimentan con corriente alterna. Esto hace que cada polo genere un campo magnético alterno que varía sinusoidalmente. Cuando se superponen varios campos magnéticos que varían sinusoidalmente desfasados entre sí, se obtiene un campo magnético giratorio. Si el rotor gira a una velocidad angular diferente de la que gira el campo magnético generado por el estator, un observador fijo respecto del rotor ve un campo magnético giratorio a una velocidad igual a la diferencia entre la velocidad angular del campo magnético inducido por el estator y la de rotación del rotor. Esta diferencia se denomina *deslizamiento*, y lo que hace es inducir al rotor una fuerza electromotriz. La fuerza electromotriz inducida es proporcional a la derivada del flujo magnético, y puesto que la derivada del seno es el coseno y la del coseno es menos el seno, esta fuerza electromotriz genera corrientes que, a su vez, generan un campo magnético que sigue el inducido por el estator, pero desfasado 90 grados. Este campo magnético es atraído por el generado por el estator y provoca un par al rotor que tiende a hacer disminuir el deslizamiento. El deslizamiento es la velocidad a la que el rotor ve girar el campo magnético inducido por el estator y, por lo tanto, multiplica el tiempo a la expresión del flujo magnético. Esto hace que la fuerza electromotriz sea proporcional al deslizamiento.

Figura 11. Esquema motor asíncrono



Fuente: J. Vivancos (1997)

Este funcionamiento hace que la corriente en el rotor sea inducida por el campo magnético del estator y, por lo tanto, sin necesidad de delgas ni escobillas. Por este motivo, estos motores también se llaman *motores de inducción*. El hecho de no necesitar ni delgas ni escobillas los hace muy sencillos, económicos y sin las necesidades de mantenimiento debido a desgastes de estos componentes.

A la hora de utilizar un motor asíncrono para construir un accionamiento en lazo abierto, solo se puede conseguir un cierto control de la velocidad angular regulando la frecuencia de la corriente, pero con un error que depende del deslizamiento y que no se puede controlar en lazo abierto, dado que el deslizamiento será en cada momento el necesario para vencer el par resistente y, por lo tanto, variará.

Se pueden usar motores asíncronos para construir accionamientos que regulen la posición controlando simultáneamente la frecuencia y la intensidad de la corriente. Este tipo de control se denomina control vectorial. Hoy día, lleva a necesitar una electrónica de control y de potencia más cara que la necesaria para controlar los motores sin escobillas, que supera la ventaja del menor coste del motor en sí. Por lo tanto, en la práctica, actualmente la tendencia es utilizar motores sin escobillas, para construir accionamientos en los que se necesita controlar la posición.

2.3. Accionamientos giratorios

En el caso de máquinas en las que hay que controlar el ángulo girado por un eje, el equivalente a las guías son los rodamientos que obligan al eje a girar en torno a una línea. También hay casos en los que se utilizan motores acoplados directamente al eje, o incluso integrados al mismo eje, es decir, que el eje del motor es parte del eje que gira. Sin embargo, muchas veces, los pares que se pueden conseguir con los motores eléctricos son relativamente bajos comparados con los que se necesitan en las máquinas, y por eso se suele instalar una transmisión que reduce la velocidad angular y multiplica el par. Estas

transmisiones pueden materializarse a través de poleas y correas (normalmente correas dentadas), pero la solución más habitual consiste en transmisores basados en engranajes.

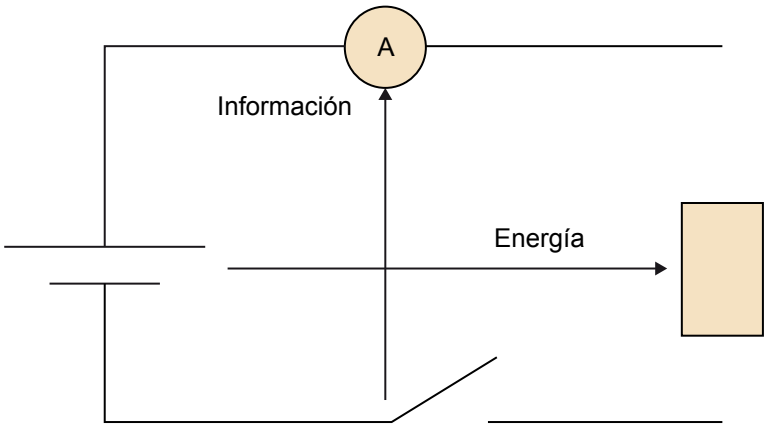
3. Sensores

Un sensor es un dispositivo que genera una señal que transporta información de una magnitud.
Para entender cómo son los sensores, hay que aclarar los conceptos de señal y de información.

3.1. Señal

La información no existe de manera independiente de la materia o la energía. Para poder transportar, almacenar o procesar información, es imprescindible hacerlo a caballo de la materia o la energía. Por ejemplo, cuando una persona habla para transmitir información a la audiencia, está generando un flujo de energía sonora que viaja de la boca de quien habla a los oídos de quien escucha. Si previamente se han puesto de acuerdo con un código, esta energía sonora puede transportar, debidamente codificada, la información que se pretende transmitir. O por ejemplo, si se envía una carta escrita y un mensajero transporta la carta de quien la ha escrito a quien la leerá, si previamente se han puesto de acuerdo con el código que establece que unas determinadas manchas de tinta sobre el papel tienen cierto significado, pueden transmitirse información a caballo de la materia del papel y de la tinta. Ahora bien, la señal no es lo mismo que la energía o la materia que se utiliza para transportarla. De hecho, la señal es la forma que se le da a esta materia o a esta energía, de acuerdo con un código compartido entre el emisor y el receptor. Tampoco necesariamente la energía o la materia deben viajar entre el mismo origen y el mismo destino que la información que transportan. La información viaja desde el lugar donde se da forma a la materia o la energía hasta el lugar donde se detecta esta forma. Por ejemplo, en la figura 12 hay una batería que genera una corriente eléctrica y una resistencia que transforma la energía de esta corriente en calor. También hay un interruptor y un amperímetro.

Figura 12. Esquema emisor-receptor



Fuente: Elaboración propia

Si un emisor se sitúa en el lugar donde está el interruptor, y un receptor en el lugar donde está el amperímetro, y previamente han pactado que en caso de que, al tirar una moneda al aire se cerrará el interruptor una vez durante 1 segundo si sale cara, y dos veces si sale cruz, el emisor puede enviar al receptor la información de lo que ha salido al tirar la moneda al aire. La información viaja desde donde está el interruptor, que es donde se da forma a la energía que circula por el circuito, hasta donde está el amperímetro, que es donde se detecta esta forma, mientras que la energía viaja desde la batería hasta la resistencia. Estos cuatro dispositivos pueden estar situados en lugares muy alejados unos de otros y, por lo tanto, la energía viaja entre lugares muy distintos de los que viaja la información.

La velocidad a la que viaja la señal es la distancia entre el emisor y el receptor dividida entre el tiempo que pasa desde que se provoca el cierre o apertura del circuito y se detecta la variación de la corriente en el amperímetro. Esta velocidad es la que tienen las ondas que se propagan por el circuito desde el momento que se cierra o se abre el interruptor, haciendo que la corriente eléctrica se inicie en lugares alejados del interruptor. Para poder transmitir información, la potencia debe ser variable e imprevisible. Si la potencia fuera constante (el interruptor constantemente abierto o cerrado), sería imposible pactar ningún código para transmitir información. Lo mismo ocurriría si la apertura y el cierre del interruptor siguiesen una función del tiempo determinada, porque en este caso el emisor no podría decidir qué hace y el receptor no necesitaría mirar el amperímetro para saber qué ha hecho el emisor.

3.2. Información

El concepto de información está relacionado con el conocimiento de los hechos y la probabilidad de que se produzcan. La mejor manera de entender el concepto de información es entender cómo se mide la cantidad de información de un mensaje.

La medida de la información la estableció Shanon, a partir de las siguientes condiciones:

1) La cantidad de información de un mensaje que codifica un hecho es cero si el hecho es seguro, y tiende a infinito si el hecho es tan poco probable que tiende a ser imposible.
   $i(F) = 0$ si $p(f) = 1$; $i(F) \rightarrow$ infinit si $p(f) \rightarrow 0$.
2) La información obtenida al recibir dos mensajes que codifican dos hechos totalmente independientes entre ellos es la suma de la información obtenida al recibir cada uno de los dos mensajes.

Dado que la probabilidad de que sucedan dos hechos independientes es el producto de probabilidades, la segunda condición establece que mientras que las probabilidades se multiplican, las informaciones se suman. Solo hay una función matemática que cumpla estas propiedades, y es el cologaritmo de la probabilidad.

Una vez establecido que la cantidad de información que contiene un mensaje se mide con el cologaritmo de la probabilidad de que se produzca el hecho que codifica el mensaje, entonces queda un parámetro arbitrario que es la base de los logaritmos que se utilizarán para medir la información. Shanon empleó la base 2, y esto asigna la unidad de información a un mensaje que codifica un hecho que tiene una probabilidad de ½ porque $-\log_2 (1/2) = -\log_2(2^{-1}) = 1(-1) =1$. Esta unidad de información recibe el nombre de *bit*.

Así pues, si se hace el experimento de tirar una moneda al aire y enviar un mensaje informando del resultado, la probabilidad de cada uno de los resultados posibles es de ½ y, por lo tanto, la cantidad de información que transportará este mensaje será de 1 bit.

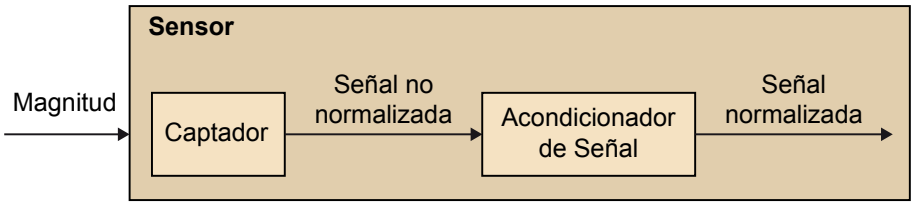
No hay que confundir la cantidad de información del mensaje con la cantidad de datos. Si en el protocolo de comunicaciones se pacta que el mensaje consistirá en cerrar el circuito tres veces si sale cara, y en abrirlo 3 veces si sale cruz, dado que el circuito puede estar cerrado o abierto, para cerrarlo tres veces hay que provocar un hecho que tenga $(½)^3$ de probabilidad y, por lo tanto, se está enviando un dato que ocupa 3 bits, pero la cantidad de información es de solo un bit, porque codifica un hecho que tiene ½ de probabilidad. Esto se denomina *redundancia*, y se puede utilizar para detectar y corregir errores.

3.3. Señales normalizadas

Como se ha comentado anteriormente, la señal debe contener información y, por ello, tiene que variar a lo largo del tiempo uno de sus parámetros. Por ejemplo, si se trata de una señal eléctrica, puede variar la tensión o la intensidad. En principio, esta variación puede ser muy diversa y dependerá de los fenómenos físicos que se producen en los componentes que constituyen el sensor. Sin embargo, si se admitiera esto, entonces los receptores de la información deberían adaptarse a la señal que genera cada sensor. Para que esto no ocurra, las señales deben estar normalizadas. Por ejemplo, las señales de tensión analógicas se normalizan en una tensión que puede variar entre 1 y 5 voltios. Se descarta el rango entre 0 y 1 voltio y, de esta manera, se puede distinguir una señal mínima de una avería. Las señales analógicas de corriente se normalizan con una variabilidad entre 4 y 20 mA.

Dado que el sensor debe suministrar una señal normalizada, a menudo el sensor puede considerarse compuesto por dos componentes, tal y como se indica en la figura 13.

Figura 13. Esquema de sensor



Fuente: Elaboración propia

El captador es el componente que genera la señal a partir de la magnitud, y el acondicionador de señal es el componente que transforma esta señal en una señal normalizada. A veces esto no es necesario, puesto que el captador ya genera directamente una señal normalizada.

3.4. Señales analógicas y digitales

La información se puede enviar con una señal modulando uno de los parámetros de la potencia, de tal manera que sea proporcional a la magnitud de la que se quiere enviar información. Por ejemplo, si se quiere enviar información de la posición del carro portaherramientas de la máquina, que va de la posición x = 0 mm hasta x = 400 mm, se puede modular la tensión de forma que 1 V corresponda a 0 mm y 5 V a 400 mm, y de manera proporcional, cualquier posición intermedia. Así, a la posición 200 mm le debería corresponder una tensión de 3 V. Cuando se hace esto, se dice que la señal es analógica.

Otra posibilidad es redondear la posición en mm (ignorar los decimales de mm) y codificarla en un número que pueda variar entre 0 y 1.000. Si esto se codifica en base 2, se necesitan 10 dígitos. Entonces, se puede enviar cada dígito con una señal de tensión en la cual la tensión de 1 voltio represente un dígito 0, y una señal de 5 voltios, un dígito 1. Para hacer esto, hay que enviar 10 señales y se puede hacer una tras otra en el tiempo por el mismo cable, o las 10 en paralelo, empleando 10 cables. Si se envían una tras otra, se dice que es una comunicación en serie, y si se envían en 10 cables al mismo tiempo, se dice que es una comunicación en paralelo.
De entrada, puede parecer que el envío de señales digitales tiene inconvenientes serios:

1) Se pierde resolución. Hay que discretizar la magnitud y se pierde información de los valores intermedios. En el caso del ejemplo, solo se tienen en cuenta posiciones separadas de milímetro en milímetro.
2) La electrónica del acondicionador de señal es más compleja. No basta con transformar la señal del captador para normalizarla. Además, hay que co-

dificarla en bits, transmitir cada bit en serie o en paralelo y gestionar el protocolo de transmisión de estos bits con el receptor.

Sin embargo, en la práctica, estos «inconvenientes» acaban siendo ventajas, dado que cualquier captador tiene un cierto nivel de error y cualquier canal de comunicaciones tiene un cierto ruido. Sobre el hecho de discretizar la magnitud ignorando los valores intermedios, si la incertidumbre de la medida es de un orden de magnitud inferior a la discretización, permite que la información que se envía sea fiable, así como que se pueda considerar que no es precisa pero que aparte de esta imprecisión, en la práctica no contiene error. El hecho de que la señal no use todos los valores posibles (por ejemplo, de la tensión) permite garantizar que el ruido del canal de comunicación tiene una probabilidad muy pequeña (y conocida y controlada) de provocar que la señal recibida codifique un mensaje diferente del enviado. Para resumir, los sensores que envían señales digitales permiten gestionar el error y el ruido, mientras que los analógicos hacen muy difícil esta gestión. Por ello, aunque son más complejos, los sensores digitales se utilizan con mucha frecuencia en las máquinas de control numérico.

3.5. Clasificación de los sensores

Hay muchos criterios para clasificar los sensores. A menudo, se clasifican según el tipo de magnitud que detectan, y a partir del elemento empleado para construir el sensor. Por eso se habla, por ejemplo, de sensores de temperatura, de posición, de velocidad, etc., pues detectan estos tipos de magnitudes. O se habla de sensores resistivos, capacitivos, ópticos, piezoeléctricos etc., porque están construidos según este tipo de elementos. Otro criterio es clasificarlos en analógicos o digitales, que ya se ha comentado antes.

Hay dos criterios más que son de interés a la hora de estudiar los sensores que se utilizan en las máquinas de control numérico. Uno es si son sensores directos o indirectos, y el otro, en el caso de sensores de posición, si son absolutos o incrementales.

Los sensores directos son aquellos cuyo captador genera directamente una señal que contiene información de la magnitud. Por ejemplo, un cristal piezoeléctrico puede utilizarse de captador en un sensor que genera información directamente de la fuerza aplicada al cristal, porque el efecto piezoeléctrico hace que al aplicarle una fuerza, aparezca una tensión en el cristal. Sin embargo, el mismo cristal se puede utilizar para construir un sensor que indirectamente genere una señal con información de la aceleración o de la presión, si previamente se transforma esta aceleración o esta presión en una fuerza. Al conectar una masa al cristal, debido a que esta masa le aplica una fuerza cuando se ve sometida a una aceleración, o haciendo que la presión se aplique sobre una pieza que tiene una superficie dada y que a su vez está conectada al cristal, la fuerza que detecta el cristal tiene información indirectamente sobre la aceleración o la presión. En las máquinas de control numérico, a menudo

se utilizan sensores que detectan la posición del carro portaherramientas indirectamente, a partir de detectar el ángulo que gira el huso roscado que lo hace mover. En los sensores indirectos, a la hora de gestionar los errores, hay que tener en cuenta, además de la incertidumbre del captador en sí, el error que puede introducir la transformación de la magnitud que se quiere detectar en la magnitud que el captador detecta.

Para el caso de los sensores de posición, en algunos, la señal que generan tiene información directamente de las coordenadas de la posición, y otros, cada vez que hay un cambio de posición, envían información de la magnitud de este cambio. Los primeros se denominan *absolutos*, y los segundos, *incrementales*.

La forma en que se consigue que un dispositivo genere una señal con información de una magnitud se suele poder clasificar en dos grupos. Por un lado, encontramos dispositivos que extraen energía de la magnitud para fabricar la señal. Conceptualmente, son generadores que generan energía del tipo de la señal, extrayéndola de la magnitud. Por otro lado, encontramos los que utilizan un componente que tiene una característica que varía con la magnitud, y le aplican una energía de prueba que resulta modulada en función de esta característica. Algunos ejemplos de sensores que utilizan un elemento generador de energía son los sensores piezoeléctricos, que generan energía eléctrica a partir de la energía mecánica aplicada, o los pares termoeléctricos, que generan energía eléctrica a partir de la energía calorífica.

Ejemplos de sensores que utilizan un componente de característica variable podrían ser las galgas extensiométricas, que aprovechan que la resistencia de un conductor varía con la longitud y el grosor (por lo tanto, con la deformación), y le aplican una tensión, de modo que la caída de tensión obtenida contiene información de la deformación; o por ejemplo, los sensores de presencia capacitivos, que aprovechan que la capacidad de un condensador depende de la rigidez dieléctrica del material que hay entre las armaduras para detectar si existe la presencia de un objeto en vez de aire.

Los sensores que se necesitan en las máquinas de control numérico para poder controlar el movimiento relativo entre la pieza que se está fabricando y la herramienta tienen la función de detectar la posición, la velocidad o la presencia en un punto fijo de un elemento móvil de la máquina.

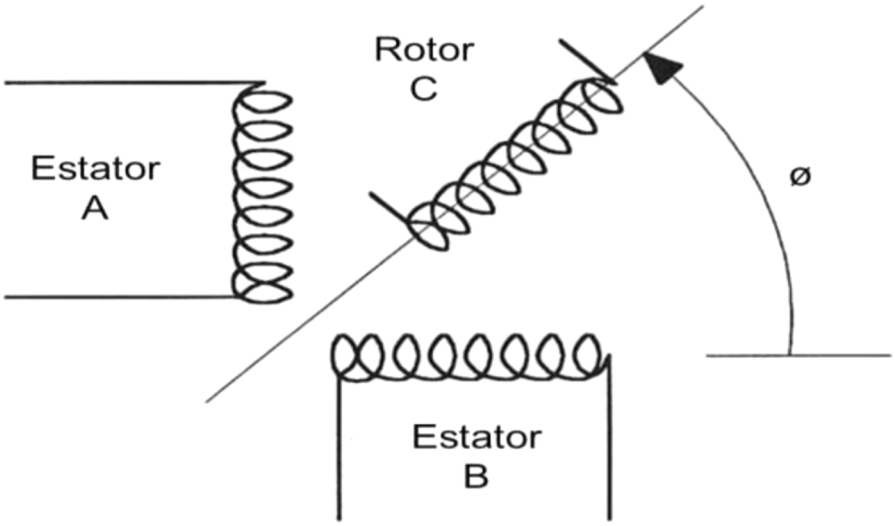
3.5.1. Sensores de posición

Los sensores de posición, lineales o angulares, son esenciales en la construcción de las máquinas de control numérico para poder controlar la posición y la inclinación exacta de la herramienta respecto a la pieza. Se utilizan varios tipos de sensores para esta finalidad.

En cuanto a la detección de la posición angular, es habitual encontrar *encoders* y *resolvers*, y para la posición lineal se utilizan los mismos sensores de posición angular como sensores indirectos, o bien sus homólogos lineales, los *inductosyn* y los *encoders* lineales.

Los *resolvers* (figura 14) son sensores que se basan en el hecho de que la fuerza electromotriz inducida en una bobina depende de la parte del flujo variable generado por otro que él atraviesa. El *resolver* se construye con un elemento giratorio en el que hay una bobina inducida y solidaria al eje cuya posición angular se quiere detectar, y un elemento fijo respecto a la bancada donde está la bobina inductora. La bobina inductora se alimenta con corriente alterna, y la tensión de la corriente alterna inducida a la bobina giratoria indica el ángulo en el que esta se encuentra respecto de la fija en cada momento.

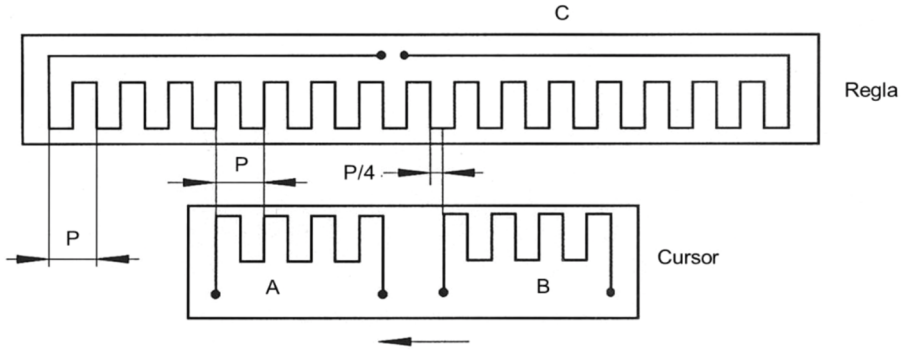
Figura 14.



La señal que se obtiene contiene información de la posición angular absoluta respecto a una vuelta. Si se quiere utilizar como sensor indirecto de posición, en un mecanismo que mueve el carro portaherramientas a través de un mecanismo de tornillo-tuerca, hay que incorporar un contador del número de vueltas y el cálculo de la posición, multiplicando el ángulo por el paso de rosca del mecanismo.

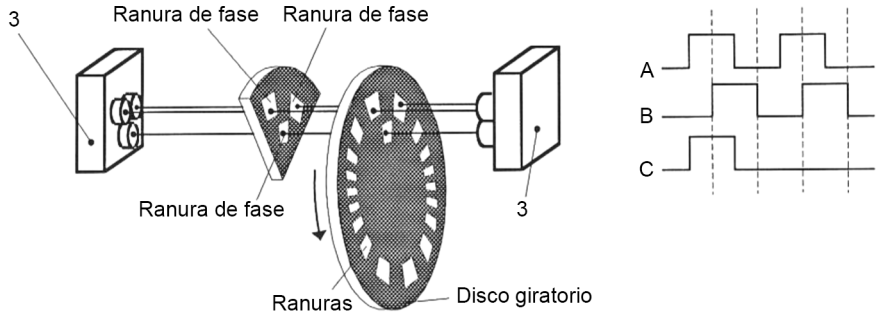
El equivalente lineal al *resolver* es el *inductosyn* (figura 15). En lugar de tener una bobina que gira y una fija, tiene un circuito ondulado en la parte fija de la máquina, y otro en la parte móvil. Dado que el coeficiente de autoinducción mutua entre estos circuitos varía al variar la posición, alimentando uno con una corriente alterna la tensión eficaz de la fuerza electromotriz inducida en el otro, es una señal que contiene información de la posición lineal. En este caso, se obtiene un sensor directo de posición lineal.

Figura 15.



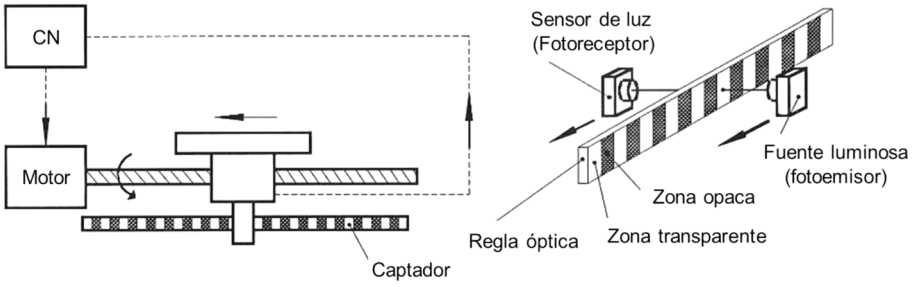
Los *encoders* son sensores basados en un elemento que presenta una resistencia variable al paso de la luz. Más concretamente, presenta zonas transparentes y otras opacas, de manera alternativa. Situando en un lado un diodo emisor de luz (LED), y en el otro un fototransistor, el hecho de que en medio esté la parte transparente de la luz provoca que el fototransistor cierre el circuito, y cuando esté la parte opaca, que la abra. El equivalente lineal del *encoder* es la regla óptica o *encoder* lineal. Tanto los *encoders* como las reglas ópticas pueden ser sensores absolutos o incrementales. Para construir un sensor incremental, basta con dos filas de zonas transparentes/opacas, desfasadas ligeramente entre ellas. Una sirve para contar el número de zonas que se han desplazado, y la otra, para detectar el sentido del desplazamiento. Dependiendo de qué franja conmuta primero, se detecta si el desplazamiento es en un sentido o en el contrario. Figuras 16 y 17.

Figura 16. Detección del sentido angular



Fuente: J. Vivancos (1997)

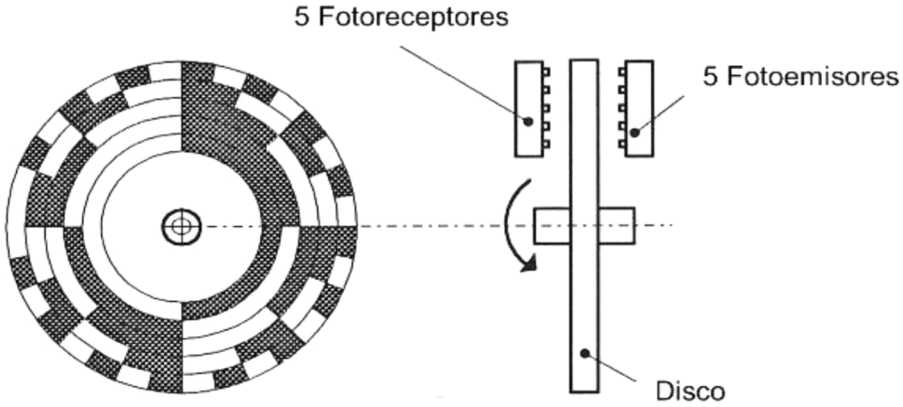
Figura 17. Regla óptica. Detección del sentido lineal



Fuente: J. Vivancos (1997)

Los *encoders* absolutos (figura 18 a y b) y las reglas lineales absolutas (figura 19) se basan en disponer de múltiples bandas de zonas opacas y transparentes, de tal modo que cada parte genera una señal, y entre todas codifican de forma absoluta la señal. La primera parte tiene la mitad transparente y la otra mitad, opaca; la segunda alterna zonas opacas y transparentes en una cuarta parte del recorrido; la tercera, cada 1/8; y así sucesivamente. De esta manera, el conjunto de señales generadas por los fototransistores codifica la posición angular o lineal con una resolución que depende del número de bandas.

Figura 18 a. Encoder absoluto angular

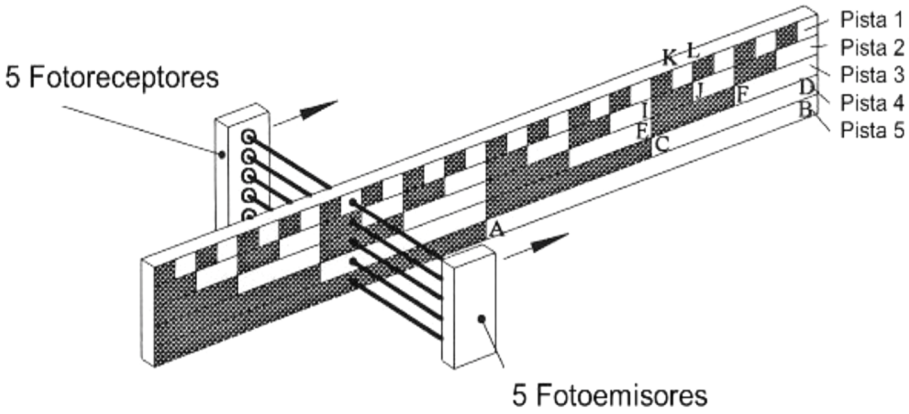


Fuente: J. Vivancos (1997)

Figura 18 b.

Fuente: J. Vivancos (1997)

Figura 19 a. Regla óptica absoluta



Fuente: Vivancos, J. (1997)

Figura 19 b.

Fuente: Vivancos, J. (1997)

3.5.2. Sensores de velocidad

Además de los sensores de posición, para construir máquinas de control numérico son necesarios sensores de velocidad. Aunque se podría plantear obtener la velocidad como una magnitud indirecta a partir de la posición, dividiendo la variación de la posición entre el tiempo que ha tardado en producirse, a menudo este no es el mejor enfoque. A veces solo se necesita controlar la velocidad de un eje, y en este caso no es necesario un sensor de posición, como ocurre con el control del cabezal principal cuando no hay que controlar con precisión la posición relativa del ángulo girado y el desplazamiento de las herramientas. Sin embargo, incluso cuando está el control de posición, conviene tener un sensor que genere directa e instantáneamente una señal con información de la velocidad del eje. Si se calcula la velocidad a partir de la posición, se tienen dos inconvenientes. Por un lado, no se tiene la velocidad instantánea, sino la velocidad media durante el periodo de tiempo en el que se ha hecho el cálculo; y por otro lado, la información se tiene con el retraso que supone la toma de las medidas de posición consecutivas y la realización de los cálculos aritméticos para determinar la velocidad. En cambio, si se dispone de

un sensor de velocidad, se tiene información de la velocidad instantánea en tiempo real. Esto descarga el control de cálculos y facilita la estabilidad de los algoritmos de control.

El tipo de sensor de velocidad que se usa más a menudo en las máquinas de control numérico es la dinamo tacométrica. Conceptualmente, una dinamo es idéntica a un motor de corriente continua, pero la diferencia es cómo se utiliza (constructivamente, en la práctica, hay una pequeña diferencia en el desajuste de las escobillas para compensar el retraso en el campo magnético que se produce debido al ciclo de histéresis del hierro y evitar que salten chispas en las delgas, pero esto es un detalle constructivo que no afecta al concepto de la máquina). Mientras que el motor de corriente continua se alimenta con corriente y se utiliza para hacer girar un eje, en la dinamo tacométrica se hace girar el rotor haciéndolo solidario al eje cuya velocidad se quiere medir, y la corriente generada se utiliza como señal que indica esta velocidad. Al igual que en el motor de corriente continua la tensión de la corriente aplicada era aproximadamente proporcional a la velocidad, en la dinamo tacométrica la tensión es muy aproximadamente proporcional a la velocidad angular. La precisión en el caso de la dinamo tacométrica es mucho mayor que en el caso del motor de corriente continua (el error venía debido a que el rendimiento de la máquina no es nunca del 100 %). Sin embargo, en el caso de la dinamo tacométrica, puesto que el objetivo no es generar energía eléctrica (como sería el caso de una dinamo) y solo se pretende una señal, la potencia eléctrica producida se diseña para que sea mínima, y cuanto menor es la potencia generada, más cercano al 100 % es el rendimiento y, por tanto, más exacta es la proporcionalidad entre la tensión y la velocidad.

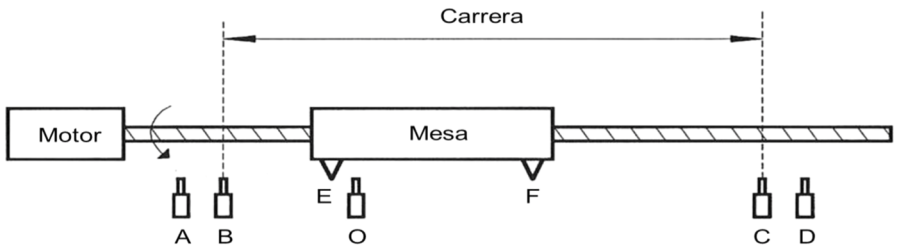
3.5.3. Sensores de presencia. Finales de carrera

En el caso de los sensores de posición incrementales, se necesita una referencia a partir de la cual poder empezar a contar para saber la posición en todo momento. Además, el riesgo de que un programa ordene por error a los actuadores moverse a una posición fuera del alcance hay que evitarlo, así como los correspondientes accidentes y averías que podría provocar esta situación. Por todo esto, en las máquinas de control numérico se hacen necesarios sensores que los limiten a detectar la presencia del carro portaherramientas en un punto de control concreto.

Un sensor de presencia se puede materializar con cualquier sistema que cierre un circuito, por ejemplo, un microrruptor, o también se puede construir con sensores inductivos o capacitivos, que se basan en el cambio de la autoinductancia de un circuito o la capacitancia entre dos armaduras, al cambiar las propiedades magnéticas o dieléctricas del material cercano.

El uso habitual de los sensores de presencia de final de carrera consiste en doble seguridad de final de carrera más un sensor de posición del origen, tal y como se representa en la figura 20.

Figura 20. Finales de carrera



Fuente: J. Vivancos (1997)

Los cursores E y F se destinan a ser detectados al pasar por delante de los sensores A, B, O y C y D, respectivamente. El sensor O sirve para detectar el origen. Debe ser de alta precisión, y se sitúa en un lugar intermedio de la carrera, con el fin de disminuir el recorrido al ir a buscar y disminuir el error acumulado al separarse del origen. Los sensores B y C envían una señal al control cuando llegan a su posición los cursores E y F, respectivamente. Esta señal indica que el carro portaherramientas está próximo al final de carrera, y el control debería reaccionar y hacerlo salir del alcance máximo. En caso de error en el software del control, entonces entran en acción los sensores A y D que, al detectar el cursor E o F, respectivamente, cortan directamente la alimentación del sistema sin pasar por el software del control, y evitan la posible colisión, con las consiguientes averías.

4. Control

No se abordará el análisis detallado de los componentes que forman el control, sino sus funciones:

- Interface hombre-máquina.
- Comunicaciones entre el control y el sistema de gestión y elementos externos.
- Control de los ejes.
- Control de las salidas de relé.
- Recepción de información de los sensores.
- Lectura e interpretación del programa
- Transformación de la energía de corriente alterna a continua y modulación para el control de los ejes.

La interface hombre-máquina se materializa por medio de una pantalla y un conjunto de teclas y potenciómetros (figura 21).

Figura 21. Regla óptica absoluta

Fuente: www.fanuc.eu

A través de esta interface, el operario puede seleccionar el modo de funcionamiento del control. Los modos habituales pueden ser:

1) Ejecución automática de un programa.
2) Simulación. Visualiza en la pantalla con mayor o menor realismo el movimiento de la herramienta, y cómo va quedando el material de la pieza a medida que la herramienta se mueve.
3) Escritura y edición de programas. A menudo, puede ser simultánea a la ejecución de otro programa en modo automático.

4) Ejecución del programa en modo de puesta a punto. Bloque a bloque, con paradas programadas; en algunas máquinas, con la posibilidad de mover la herramienta sin tener fijada ninguna pieza y sin activar el refrigerante para observar el movimiento de la herramienta. Ejecución del programa con porcentaje de reducción de las velocidades de corte y avance controladas con potenciómetros del control respecto a las programadas.

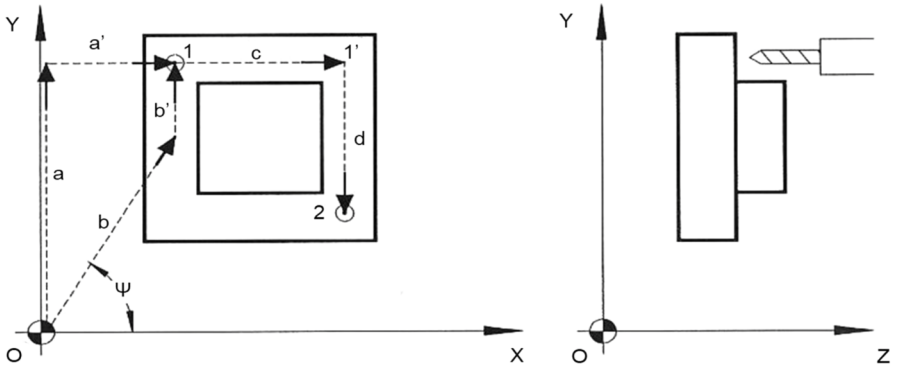
5) Movimiento de los ejes simulando la operación de una máquina manual.

Las **comunicaciones entre el control y el exterior** se pueden hacer de dos maneras. Por un lado, hay funciones auxiliares del lenguaje de programación que provocan el envío de una señal a través de la línea de comunicación y, por otro, direcciones de memoria que están vinculadas a salidas de señal. Al almacenar un determinado valor en estas direcciones de memoria, se provoca inmediatamente la aparición de la correspondiente señal.

El **control de los ejes** puede ser más o menos complicado, dependiendo del número de ejes que se controlan simultáneamente y de si el control se hace en lazo abierto o cerrado.

Un primer nivel de complejidad es el control punto a punto (figura 22). Este tipo de control es lo que se necesita para máquinas que deben hacer operaciones como, por ejemplo, una gran cantidad de agujeros en diferentes puntos de una superficie plana. Para hacer este tipo de operaciones, se debe posicionar la punta de la herramienta en unas determinadas coordenadas del plano horizontal, y entonces hacer la operación de corte con el movimiento vertical. El movimiento desde la posición inicial hasta el punto donde se ha de llevar a cabo la operación de corte se puede hacer sin importar la trayectoria del recorrido. Por lo tanto, el control no necesita garantizar el movimiento en sincronía de los diferentes motores. Basta con que garantice que, al final, cada uno termine el movimiento en las coordenadas de la posición requerida.

Figura 22. Control punto a punto

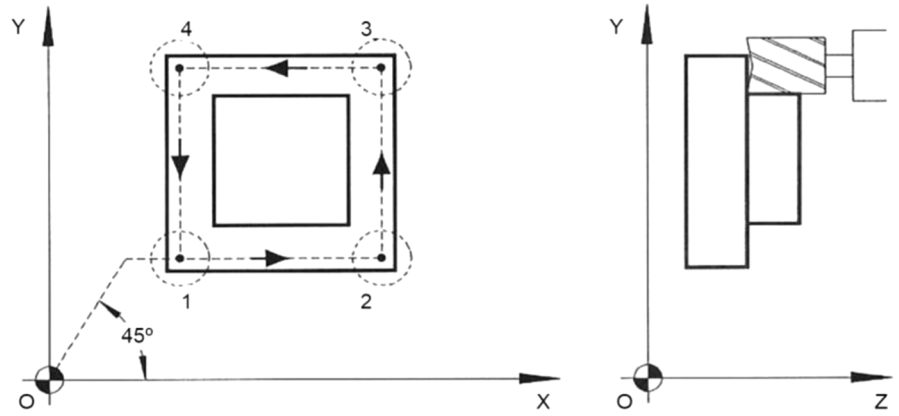


Fuente: J. Vivancos (1997)

También se dice que está haciendo operaciones punto a punto cuando una máquina con capacidad de controlar movimientos más complejos trabaja de esta manera.

El siguiente nivel de complejidad se da cuando la máquina debe ser capaz de controlar movimientos de corte (figura 23) en cualquiera de los ejes del sistema de coordenadas, pero sin necesidad de combinarlos entre ellos. Este tipo de control reproduce las capacidades de las máquinas convencionales mecánicas, pero operadas automáticamente. Este tipo de control se denomina control paraxial porque cuando la herramienta corta, solo se puede mover en direcciones paralelas a los ejes.

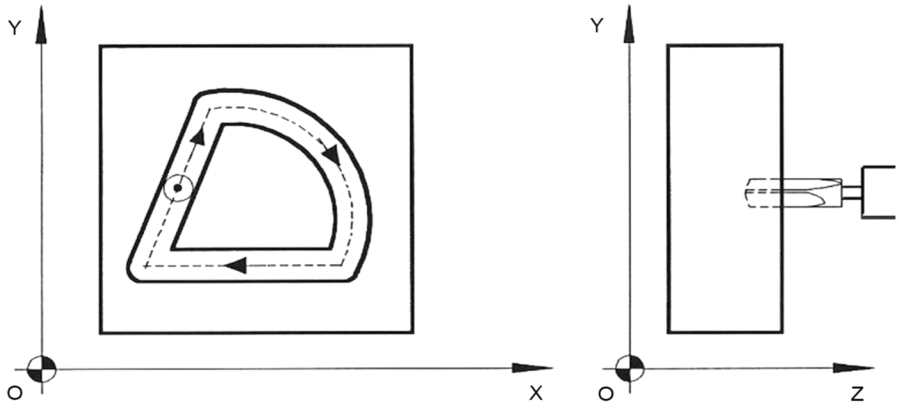
Figura 23. Control de movimientos de corte



Fuente: J. Vivancos (1997)

El siguiente nivel se encuentra en el control numérico continuo o de contorneado (figura 24). En este caso, el control es capaz de sincronizar el movimiento de dos ejes o más para que, mientras la herramienta corta, siga caminos en el espacio que requieren mover más de un eje, ya se trate de líneas rectas inclinadas respecto de los ejes, ya sean curvas.

Figura 24. Control de contorneado



Fuente: J. Vivancos (1997)

En función del número de ejes que se pueden sincronizar al mismo tiempo, se habla de máquinas de 2 ejes, de 3, 4 o 5. Las máquinas de 2 ejes permiten movimiento en un plano. Las de 3 ejes, movimientos en el espacio, y las de 4 y 5 ejes permiten que, además de controlar el camino al espacio que sigue la herramienta, se controle la inclinación relativa entre la herramienta y la pieza en un ángulo o completamente.

Hay máquinas que tienen tres ejes, pero que solo permiten sincronizar el movimiento en dos de ellos. Este tipo de control se denomina de 2,5 ejes. Por ejemplo, permiten el movimiento en vertical por un lado, y después, sincronizar el movimiento en el plano horizontal para seguir curvas arbitrarias. Hay muchas piezas que por su diseño conviene fabricarlas con movimientos de este tipo. Por este motivo, incluso en máquinas que permiten el trabajo en tres ejes, a menudo se puede elegir hacer operaciones de 2,5 ejes.

En las máquinas de 4 o 5 ejes, cuando no se puede controlar de manera continua el movimiento en el espacio y la variación de la inclinación de la herramienta, sino que para cambiar de inclinación de la herramienta es necesario que esta esté parada, se dice que tienen 3 + 1 o 3 + 2 ejes.

Para controlar la trayectoria en las máquinas con control continuo, este dispone de lo que se denomina *generador de trayectorias*. El generador de trayectorias calcula en tiempo real los puntos donde debe estar la punta de la herramienta en cada uno de los instantes del tiempo, separados entre ellos por un ciclo de muestreo.

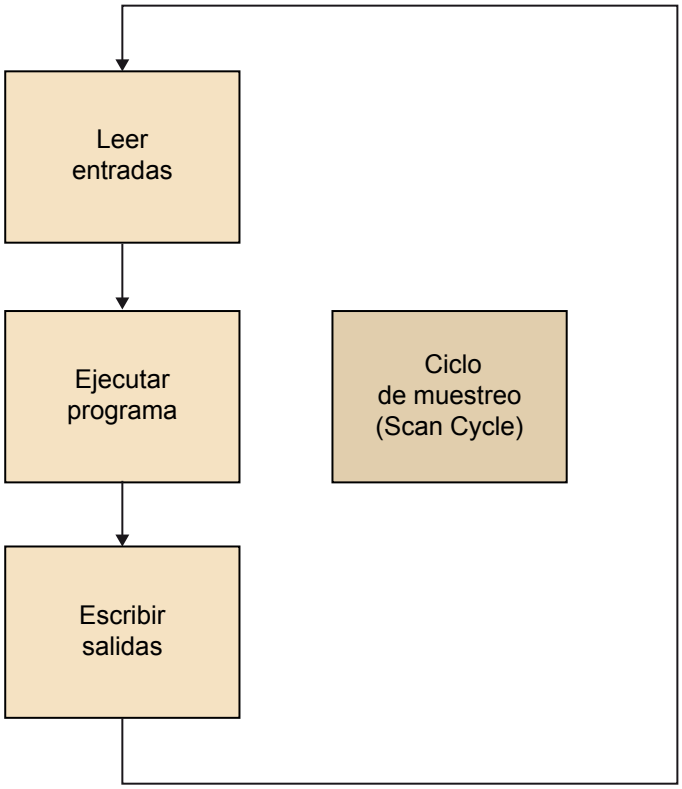
El ciclo de muestreo es el tiempo que pasa entre dos actualizaciones de los valores de las señales de salida del controlador lógico programable (PLC) del control numérico. En las máquinas de procesamiento de información, hay dos estrategias para tratar las comunicaciones con el exterior. Una es la estrategia de las máquinas basadas en interrupciones, y la otra, la de las máquinas basadas en ciclo de muestreo.

El funcionamiento de las máquinas basadas en ciclo de muestreo se puede esquematizar como se representa en la figura 25.

En cada ciclo, primero se leen los valores que las señales procedentes de los sensores han almacenado en las direcciones de memoria destinadas a contener estas entradas. Después se ejecuta el programa que procesa estos valores y finalmente se escriben, en las direcciones de memoria de las salidas, los valores destinados a provocar que se generen las señales que hay que enviar al exterior. El hardware de la máquina se diseña de tal manera que se pueda garantizar que este ciclo se repite en un periodo constante de tiempo, que es el ciclo de muestreo.

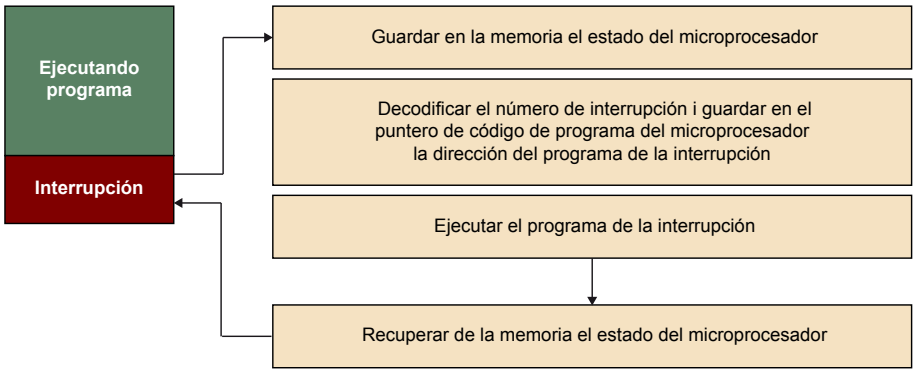
Las máquinas basadas en interrupciones, como es el caso de los ordenadores personales, tratan las comunicaciones con el exterior interrumpiendo lo que están haciendo para atender los datos de entrada cada vez que se activa una de las pistas del bus de comunicaciones destinada a codificar una interrupción. El funcionamiento es el que se representa en la figura 26.

Figura 25. Esquema de funcionamiento de las máquinas basadas en ciclo de muestreo



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Esquema de funcionamiento de las máquinas basadas en interrupciones



Fuente: Elaboración propia

Cuando el microprocesador detecta la activación del bus de interrupciones, guarda en la dirección de memoria indicada por el puntero pila los valores de todos los registros, hace una operación aritmética sencilla con el número de la interrupción codificada en el bus y el resultado lo almacena en los registros que apuntan al programa que ejecuta, de modo que inmediatamente se pone a ejecutar el programa que encuentra la dirección de memoria codificada por el número de interrupción. Este código, cuando ha terminado, debe contener una instrucción de final de interrupción que lo que provoca es que se vuelvan a escribir en los registros del microprocesador los valores que se habían guardado en la dirección de memoria apuntada por la pila. Por ejemplo, al pulsar una tecla de un teclado de un PC, se activa el bus de interrupciones con un conjunto de señales que codifican la interrupción número 9H (9 en hexadecimal). Esto provoca que el microprocesador deje lo que está haciendo y lea

la fila y la columna del teclado correspondientes a la tecla que se ha pulsado, entonces usa la tabla de teclas que se ha activado al arrancar el ordenador correspondiente al idioma y se traducen esta fila y esta columna en el código ASCII de la letra que, en este idioma, hay en este lugar. Finalmente, este código ASCII almacena la dirección de memoria de la última posición del *buffer* de teclas pulsadas en espera de ser procesadas, y se termina la interrupción devolviendo el microprocesador al punto de seguir ejecutando el programa.

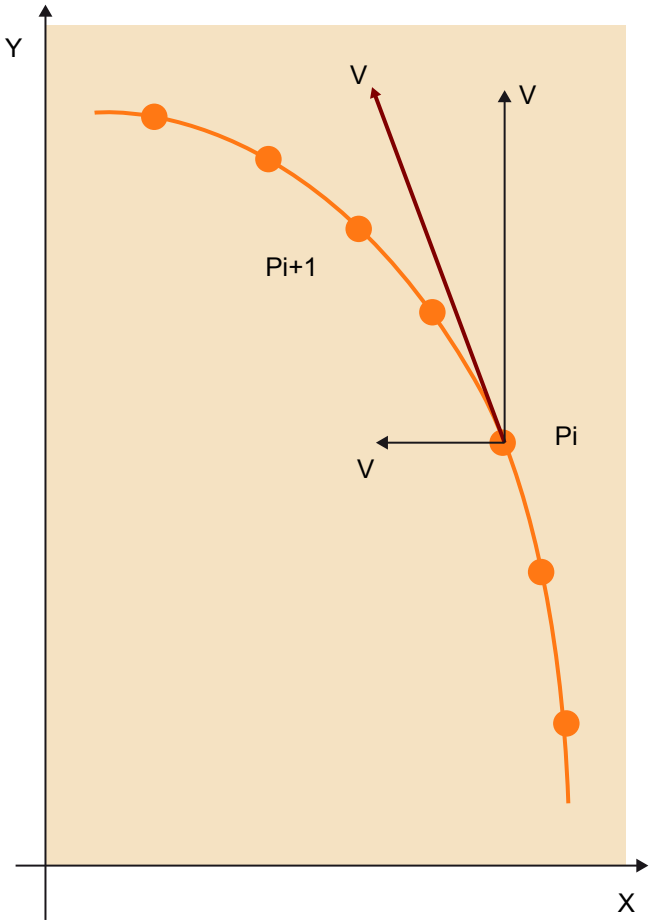
Aunque el control numérico puede estar implementado en un ordenador tipo PC que se basa en interrupciones, con el fin de implementar un control continuo o de contorneado se necesita o bien integrar una máquina basada en ciclo de muestreo, como un PLC, o bien simularla. De esta manera, se puede garantizar que los accionamientos recibirán información actualizada puntualmente, cada periodo de tiempo regular correspondiente al ciclo de muestreo.

El generador de trayectorias parte de:

- La posición actual de la punta de la herramienta.
- La posición final codificada en la línea de programa que se está ejecutando.
- El tipo de interpolación entre la posición actual y la final (rectilínea, circular, helicoidal, curva de Bezzier, etc.).
- La velocidad de avance de la punta de la herramienta.

A partir de estos datos, calcula la posición donde debería estar en el instante correspondiente al próximo ciclo de muestreo, y descompone esta posición en los componentes correspondientes a cada uno de los ejes. En el caso de una trayectoria correspondiente a un arco de circunferencia en una máquina con ejes cartesianos, podría obtener unos valores como los de la figura 27.

Figura 27. Esquema de funcionamiento de las máquinas basadas en interrupciones

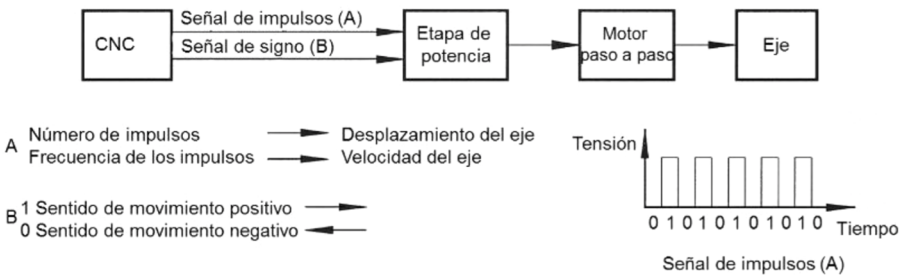


Fuente: Laboratorio de Tecnología Mecánica (ETSEIB-UPC)

Entonces, envía a los actuadores de cada uno de los ejes la consigna de la posición donde debe situarse el eje en cada instante.

Dependiendo de si estos actuadores son en lazo abierto o lazo cerrado, siguen la posición. Si se trata de accionamientos en lazo abierto, con motor paso a paso, la diferencia entre la posición actual y la próxima dividida entre el tiempo del ciclo de muestreo determina la velocidad a la que se debe mover el actuador y, por tanto, la frecuencia a la que es necesario que la etapa de potencia envíe los pulsos de alimentación del motor. El esquema es como el de la figura 28.

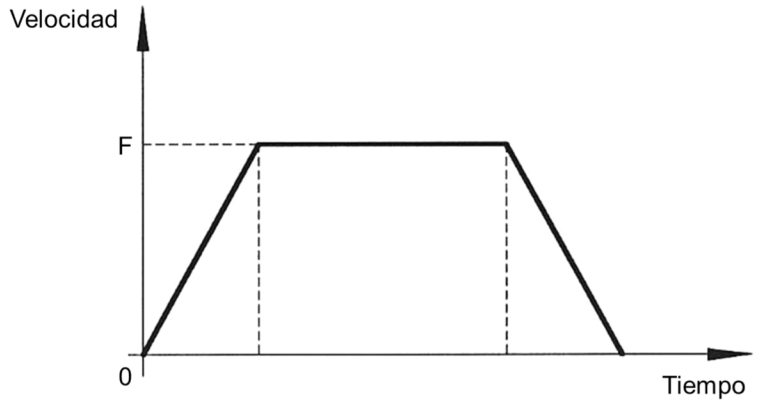
Figura 28.



Fuente: J. Vivancos (1997)

Si ha de variar la velocidad (figura 29) respecto a la que llevaba, debe hacerlo con una rampa de aceleración o de desaceleración, para evitar que un cambio repentino de velocidad se traduzca en un pico de aceleración y, en consecuencia, de fuerza, lo que provocaría que el motor se deslizase y perdiera pasos.

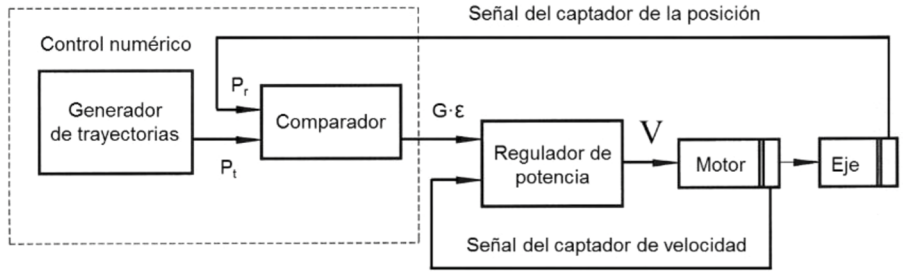
Figura 29.



Fuente: J. Vivancos (1997)

Si el control es en lazo cerrado, entonces se sigue un esquema como el de la figura 30.

Figura 30. Sistema de control cerrado



Fuente: J. Vivancos (1997)

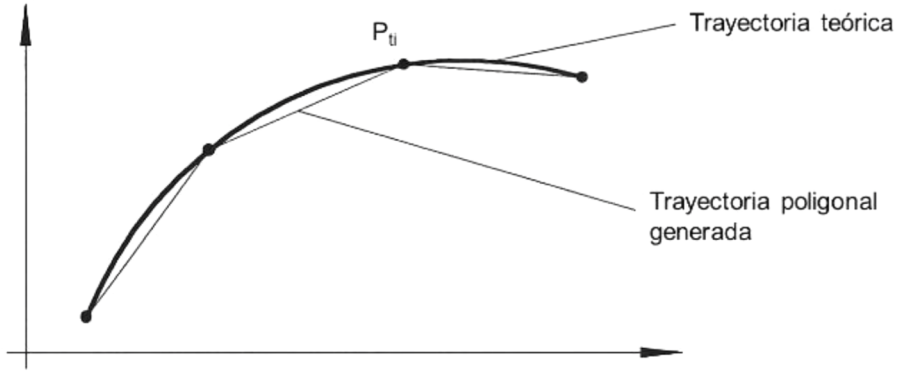
El generador de trayectorias da una consigna que corresponde a la posición donde debe estar el eje en el próximo tiempo de muestreo. El comparador resta de la posición actual indicada por el correspondiente sensor la posición donde debe. Esta diferencia, multiplicada por una constante de ganancia G, es la consigna que envía al regulador de potencia. El regulador de potencia, a su vez, compara esta consigna con la velocidad a la que ya va, y si hay diferencia, aumenta o disminuye la tensión a la que alimenta al motor para corregir esta diferencia hasta anularla.

Todo este control conduce a que la posición de la punta de la herramienta no sea exactamente la ideal, de acuerdo con la trayectoria prevista en el programa. La diferencia entre la trayectoria real y la ideal es el error. El error es el solapamiento de tres tipos de error que generan discrepancias de dos clases. Por un lado, está el error debido a la discretización que introduce el período de muestreo. Esto hace que la trayectoria que el control intenta seguir sea una poligonal en lugar de una curva, y el error máximo que introduce es la longitud de la cuerda entre la poligonal y la curva. Esto es lo que se puede apreciar

en la figura 31. Por otro lado, se encuentran los errores debidos a la limitación de la mínima excitación que emite el control hacia el motor y los errores de posicionamiento debidos al propio sistema de regulación.

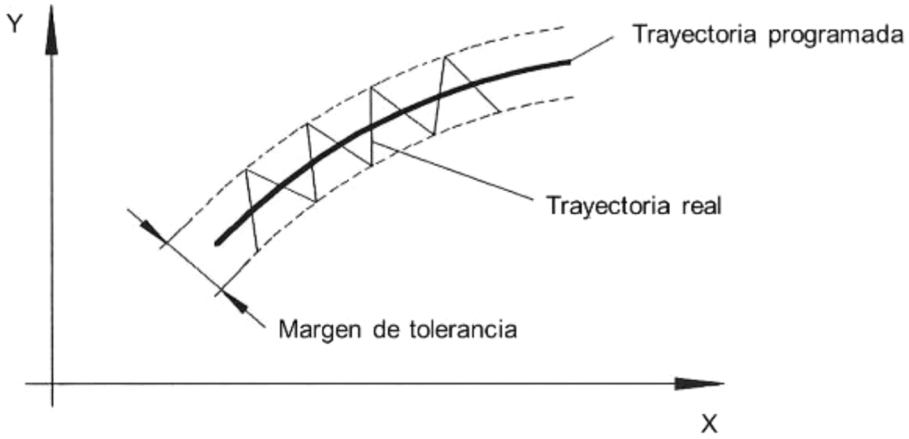
Estos errores hacen que la trayectoria real oscile en torno a la ideal, tal y como se representa en la figura 32.

Figura 31. Error de trayectoria



Fuente: J. Vivancos (1997)

Figura 32. Seguimiento de trayectoria



Fuente: J. Vivancos (1997)

Al diseñar y seleccionar las máquinas de control numérico, hay que garantizar que los mismos serán despreciables en comparación con las tolerancias admisibles en los tamaños de las piezas que se pretende fabricar con ellas.

5. Componentes complementarios que habitualmente hay en las máquinas de control numérico y no en las convencionales

Dado que la mayoría de las máquinas de control numérico se utilizarán sin que ningún operario esté pendiente de ellas durante el trabajo, es habitual que se complementen con una serie de elementos que en las máquinas convencionales no suelen ponerse, porque la presencia del operario hace más rentable encomendarle a él una serie de tareas, en lugar de automatizarlas.

5.1. Cambio automático de herramientas

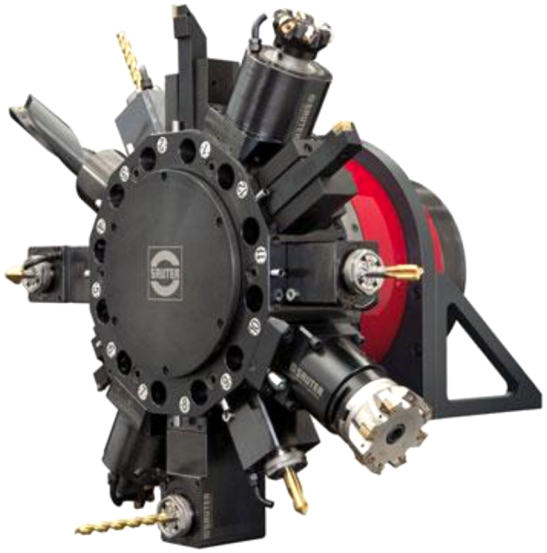
Hay máquinas convencionales automáticas con sistemas de cambio de herramientas automático. Estas máquinas están preparadas para hacer siempre la misma pieza, y se basan en una torreta revólver donde las herramientas están montadas en el orden en que se utilizarán, y un gatillo dispara la rotación de la torreta al terminar el trabajo de una herramienta para que se presente la siguiente.

En el caso de las máquinas de control numérico, el cambio automático de herramientas es especialmente interesante, y la mayoría lo llevan incorporado debido a que al trabajar desatendidas, no resulta rentable parar la máquina y mantenerla en espera hasta que acuda un operario cada vez que hay que cambiar una herramienta. Algunas máquinas están destinadas a hacer tareas en las que el trabajo de una herramienta dura periodos largos de tiempo, como es el caso de mecanizado de moldes, en el que una herramienta puede trabajar durante horas y no hay cambio automático de herramientas; pero en máquinas destinadas a hacer producción en serie, el cambio automático es casi una necesidad.

Hay dos tipos de sistemas de cambio automático. Uno se basa en un sistema similar al de las torretas revólver de las máquinas convencionales, pero en lugar de seguir siempre la secuencia correlativa de herramientas, el control puede seleccionar una cualquiera. Un ejemplo sería la torreta revólver de la figura 33. En este caso, con una instrucción seleccionando la herramienta se provoca que la torreta gire hasta presentar la herramienta seleccionada en la posición de trabajo, y ya se dispone de la misma para hacer la operación.

Este sistema tiene el inconveniente de que siempre se están moviendo todas las herramientas a la vez, con el consiguiente aumento de la masa móvil. Esto también limita el número de herramientas que se puede disponer, en la práctica, entre 6 y 8. Este sistema es muy habitual en tornos, pero lo es menos en fresadoras.

Figura 33. Cambio automático de herramienta

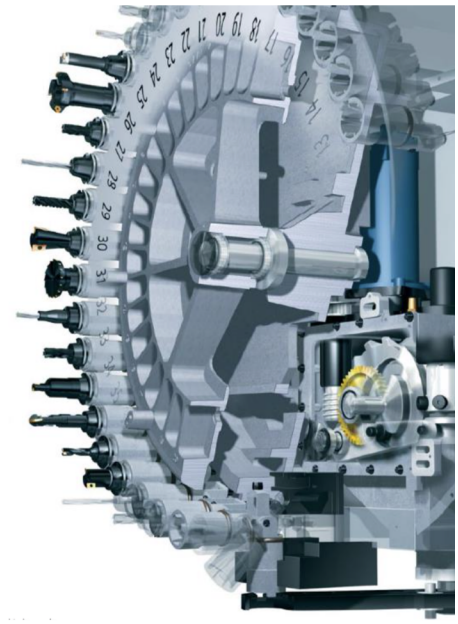


Fuente: www.sauter-feinmechanik.com

El otro sistema consiste en un almacén en el que hay un carrusel de herramientas, que pueden seguir un camino circular o no, con una serie de cazoletas: en cada una de estas se coloca una herramienta, con su correspondiente portaherramientas, tal y como se muestra en la figura 34.

Hay una posición en la que un manipulador puede intercambiar la herramienta del almacén por la herramienta del cabezal de la máquina. De este modo, la máquina solo mueve una única herramienta y así la capacidad del almacén puede ser mucho mayor. En este caso, hacen falta dos instrucciones para cambiar la herramienta. Primero hay que dar la orden al carrusel de que presente en la posición de cambio la próxima herramienta que se utilizará, y luego hay que dar la orden al manipulador para que haga la maniobra de intercambiar la herramienta que hay en el cabezal por la del almacén.

Figura 34. Almacén de herramientas



Fuente: www.haascnc.com

Cuando se escribe el programa de control numérico, hay que tener muy claro cuáles son las herramientas que habrá que garantizar en el almacén y en qué posición está cada una. También se debe asegurar que esta información queda clara, para que el operario que maneja la máquina tenga las herramientas adecuadas en las posiciones donde el programa espera encontrarlas.

5.2. Sistemas de carga y descarga de piezas

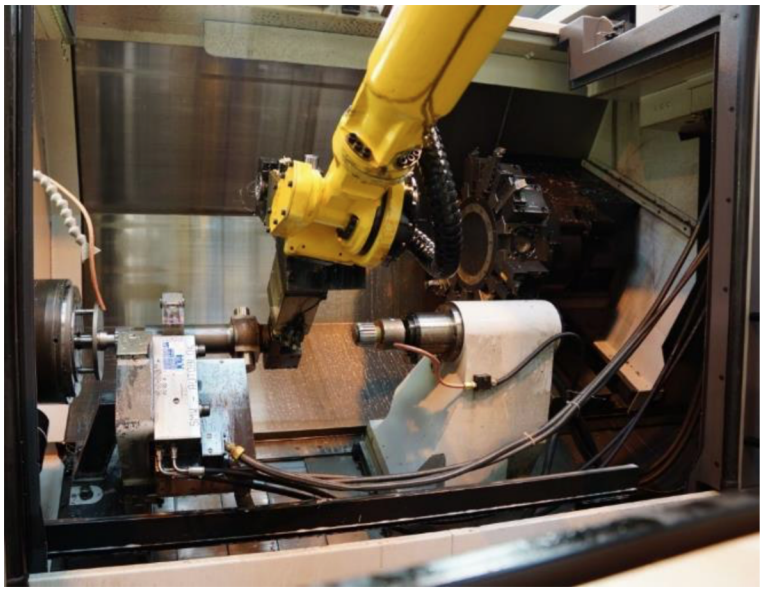
Se entiende por carga y descarga de piezas la operación de sacar la pieza que la máquina ha terminado de hacer, y poner una nueva pieza en bruto, sujetándola y posicionándola con precisión para que, al ejecutar el programa, las superficies nuevas que se generen queden referenciadas respecto a las que ya había en la pieza con la precisión adecuada.

En las máquinas convencionales atendidas por operarios, esta tarea a menudo es responsabilidad del mismo operario que controla la máquina. Las máquinas de control numérico trabajan desatendidas, siguiendo las instrucciones del programa, y solo requieren la atención externa en una fracción del tiempo para cambiar de pieza. Si se encarga esta tarea a un operario, conviene estudiar la posibilidad de que el mismo operario atienda simultáneamente más de una máquina, y esto cambia la organización clásica de la fábrica. Una alternativa es que, en lugar de un operario, esta tarea la haga un robot, y también es posible que el mismo robot atienda simultáneamente más de una máquina.

Algunas máquinas incorporan sistemas para facilitar esta maniobra y permitir que la máquina se mantenga sin parar de trabajar el máximo tiempo posible, aunque la fijación de la pieza tarde algo. Así, hay fresadoras con sistema de cambio automático de palé, como la de la figura 35. En este caso, cuando se acaba de ejecutar el programa, la máquina intercambia el palé exterior por el

interior y ejecuta el programa siguiente de forma inmediata. En paralelo, se cambia la pieza terminada por una nueva pieza en bruto en el palé exterior, de forma manual o automatizada.

Figura 35. Fresadora con cambio automático de palé



Fuente: www.youji.com

En el caso de sistemas de cambio con un robot (figura 36) o un manipulador, el tiempo de ciclo de la máquina se puede reducir respecto al cambio efectuado manualmente por un operario, porque el robot puede tener una mano doble en el mismo brazo y sincronizar mejor las maniobras con las de la máquina.

Figura 36. Fresadora con cambio robotizado

Fuente: www.youji.com

Tabla 1. Comparación de maniobras manuales o con robot

Op.	Maniobra manual	Maniobra con robot
1	* Abrir la puerta de la máquina.	* Abrir la puerta de la máquina y, al mismo tiempo, introducir el brazo del robot que ya sujeta la pieza en bruto en una mano.

Op.	Maniobra manual	Maniobra con robot
2	* Introducir el brazo del operario. * Tomar la pieza acabada con una mano. * Pulsar un botón para dar la orden de abrir las mordazas de la máquina.	* Tomar la pieza terminada.* Abrir mordazas.* Girar el brazo y meter la pieza en bruto.* Cerrar mordazas.
3	* Sacar el brazo con la pieza terminada. * Dejarla en la caja. * Tomar una pieza en bruto de otra caja.	
4	* Introducir el brazo. * Situar la pieza en bruto en el cabezal. * Pulsar el botón para que se cierren las mordazas.	
5	* Retirar el brazo. * Pulsar el botón para que la máquina cierre la puerta. *Esperar a que se cierre la puerta.	* Retirar el brazo y, simultáneamente, cerrar la puerta de la máquina.
6	* Poner en marcha la ejecución del programa para producir la siguiente pieza.	* Poner en marcha la máquina para producir la siguiente pieza. * Almacenar la pieza acabada y tomar una en bruto.

Está claro que el número de maniobras que hace el robot es menor, que algunas se solapan y además el robot, normalmente, se puede mover a velocidades superiores al operario. En conjunto, produce un aumento de la productividad que va más allá de la simple sustitución del trabajo de un operario por un robot, ya que hace que la máquina de control numérico esté menos tiempo parada y se reduzca su tiempo de ciclo.

En el caso de máquinas con doble mesa, el tiempo de parada de la máquina al terminar la pieza es mínimo, y el cambio de pieza se hace en paralelo al trabajo de la máquina.

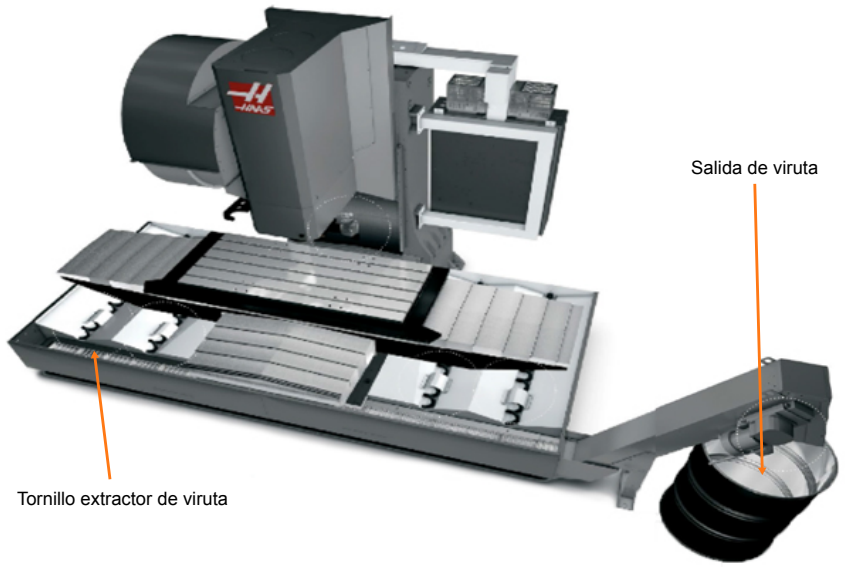
5.3. Sistemas de evacuación de la viruta

En las máquinas convencionales, dado que el operario está permanentemente atendiéndolas, cuando se acumula viruta, la retira, y no tiene mucho interés disponer de sistemas automáticos para retirarla.

En el caso de máquinas de control numérico, la retirada de la viruta es un problema. No solo por el hecho de no perder productividad, al tener que esperar que el operario acuda a hacerlo, sino porque la viruta puede interferir en la sujeción de las piezas y perjudicar la calidad de la producción. Además, dado que en estas máquinas se procura siempre que las herramientas trabajen al máximo de sus capacidades, la cantidad de viruta generada es superior a las máquinas convencionales. Por todo ello, al diseñar la máquina hay que tener en cuenta la separación de la viruta de la zona de trabajo y luego su extracción fuera de la máquina. En algunas máquinas, la viruta cae en un depósito que

de vez en cuando un operario debe vaciar, pero a menudo las máquinas de control numérico disponen de sistemas automáticos de extracción de la viruta, basados en una cinta transportadora o en un tornillo sin fin (figura 37).

Figura 37. Sistema de evacuación de viruta

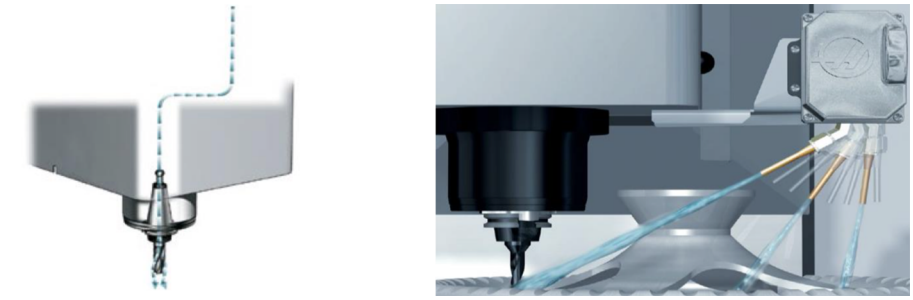


Fuente: www.haascnc.com

5.4. Sistemas de lubricación y refrigeración especiales

A diferencia de las máquinas convencionales, en las que el operario dirige la taladrina hacia la punta de la herramienta, en las máquinas de control numérico con cambio automático de herramientas, si las herramientas tienen medidas muy diferentes, asegurar que la punta de la herramienta esté bien lubricada y refrigerada no es tan sencillo. Debido a esto, existe una tendencia a aplicarles sistemas especiales de lubricación de la punta de corte. Además de los sistemas de lubricación por niebla, se pueden encontrar los sistemas de refrigeración, que hacen pasar la taladrina por el interior de la misma herramienta, así como los sistemas que controlan la dirección del chorro de taladrina, con un control de posición o que disponen de distintos chorros y activan el adecuado a cada herramienta (figura 38).

Figura 38. Sistema de lubricación y refrigeración especial



Fuente: www.haascnc.com

5.5. Sistemas de limpieza

Ya se ha comentado anteriormente el problema que los depósitos de viruta pueden causar en la buena sujeción de las piezas. Esto hace que además de sistemas de extracción, convenga disponer de sistemas de limpieza que expulsen de la zona de trabajo la viruta y pedazos de piezas que puedan interponerse entre las piezas o las herramientas y las sujeciones. Esta función la permiten sistemas de soplar con aire comprimido (figura 39).

Figura 39. Sistema de limpieza

Fuente: www.haascnc.com

6. Conceptos de máquina específicos del control numérico

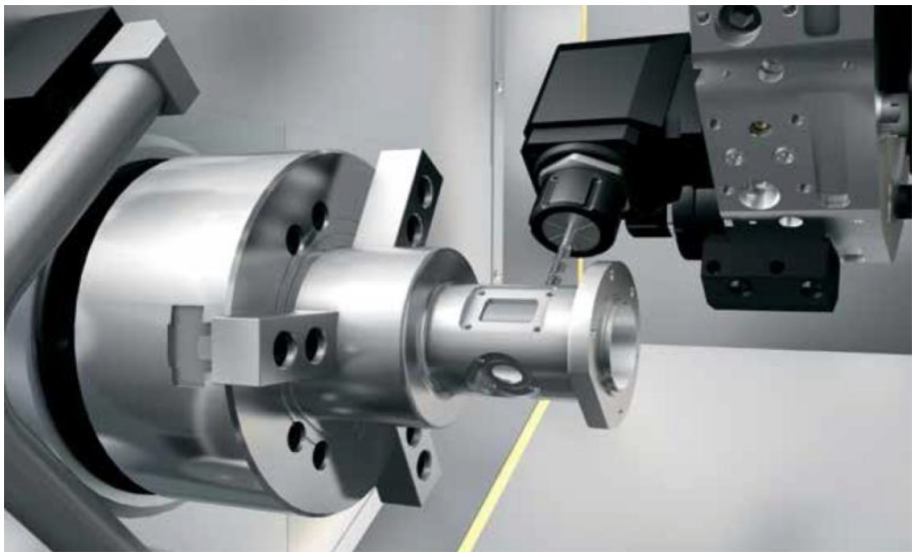
En las máquinas de control numérico, el hecho de trasladar toda la complejidad a la electrónica y al software y dejar para la mecánica solo las funciones de provocar el movimiento relativo entre piezas y herramientas simplifica mucho la estructura mecánica de las máquinas, y da mucha libertad al diseñador a la hora de determinar cuáles son los elementos móviles respecto de la bancada de la máquina, ya que estos elementos solo deben conectarse con cables; y en el caso de las señales, incluso se pueden enviar de manera inalámbrica.

Por ello, han surgido máquinas de control numérico que difieren de las convencionales o que incorporan, en la propia máquina, combinaciones de funcionalidades que en las máquinas convencionales se tenían que buscar en diferentes máquinas.

6.1. Tornos con herramientas motorizadas y eje C y tornos con doble torreta

Los tornos convencionales solo pueden hacer agujeros en el centro de la cara frontal y colineales al eje de rotación de la pieza. A menudo, las piezas que se hacen necesitan un acabado en un taladro o en una fresadora para hacer agujeros en puntos diferentes de la cara frontal, agujeros perpendiculares al eje de rotación o ranuras para claveteros, etc. La facilidad de las máquinas de control numérico de no necesitar transmitir el movimiento desde un único motor hace posible ubicar un motor en la misma torreta portaherramientas y disponer de herramientas motorizadas que pueden trabajar y hacer operaciones similares a las que se pueden hacer con los taladros o las fresadoras. Para poder trabajar de esta manera, es necesario que el cabezal principal tenga un control de posición que le permita mantener la pieza quieta en una posición controlada, o moverla y hacerla girar de manera sincronizada al movimiento de la herramienta. Este tipo de control del giro en torno al eje principal de la máquina se llama *eje C*. Los tornos con torreta motorizada y eje C (figura 40) permiten dejar terminadas en el mismo torno muchas piezas que antes necesitaban pasar por dos máquinas diferentes.

Figura 40. Torno con torreta motorizada y eje C



Fuente: www.haascnc.com

Algunos tornos, en lugar de una torreta portaherramientas, llevan dos, una delante y otra detrás; de esta forma, pueden aumentar la productividad. Estos tornos se llaman tornos de 4 ejes (dos por cada torreta portaherramientas).

6.2. Máquinas multifuncionales

Las máquinas multifuncionales (figura 41) combinan en una sola máquina las funcionalidades de dos tornos y las de una fresadora de 5 ejes. Por un lado, el cabezal móvil tiene la capacidad de girar y permitir llevar a cabo operaciones de torneado de la misma manera que el cabezal fijo. Por otro lado, en la torreta portaherramientas se pueden montar tanto herramientas de torno como herramientas de fresadora. El cabezal portaherramientas puede moverse en las tres direcciones del espacio y, además, controlar la inclinación en un eje. Los cabezales de torno tienen control del eje C. Con esta máquina, se puede tomar una pieza con un cabezal, hacer todas las operaciones tanto de torno como de fresadora por un lado, y luego tomar la misma pieza con el otro cabezal y terminar de mecanizarla por el otro lado, dejando la pieza completamente terminada. Además, dado que la pieza no sale en ningún momento de la máquina, la precisión con la que quedan referenciadas todas las operaciones entre ellas es máxima.

Figura 41. Máquina multifuncional

Fuente: www.dmgmori.com

Bibliografía

Vivancos Calvet, J. (1997). *Control Numérico I : Conceptos, características y elementos básicos* (3.ª ed.) [en línea]. Barcelona: Edicions UPC , Universitat Politècnica de Catalunya. ISBN: 8483012170.