

9 de mayo de 2019

MORFOLOGIA DE LOS ROBOTS

Programación de Robots Industriales.

9 DE MAYO DE 2019
MARIO ALCALA VILLAGOMEZ
Ing. Mecatrónica 6to A

Un robot está formado por los siguientes elementos:

- Estructura mecánica.
- Transmisiones.
- Sistema de accionamiento.
- Sistema sensorial
- Sistema de control.
- Elementos terminales.

Se estudia primero la estructura mecánica, haciendo referencia a los distintos tipos de articulaciones posibles entre dos eslabones consecutivos y a las configuraciones existentes. Seguidamente se analizan los sistemas de transmisión y reducción necesarios para transmitir a cada una de las articulaciones el movimiento generado por los actuadores, que como elementos con capacidad para desplazar la estructura mecánica. Se repasan después los denominados sensores internos, necesarios para el control de los movimientos del robot. Finalmente, el último apartado se ocupa de los elementos terminales (pinzas, herramientas, dispositivos de sujeción, etc.), que situados generalmente en el exterior realizando las operaciones que le han sido asignadas.

Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de estos (maquinas, herramientas y otras muchas maquinas emplean tecnologías semejantes), las altas presentaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas. En la siguiente imagen se muestra la estructura mecánica de un robot, sobre la que se ha indicado alguno de los elementos que se van a estudiar, examinando las necesidades particulares de cada uno y comparando las diversas alternativas existentes.

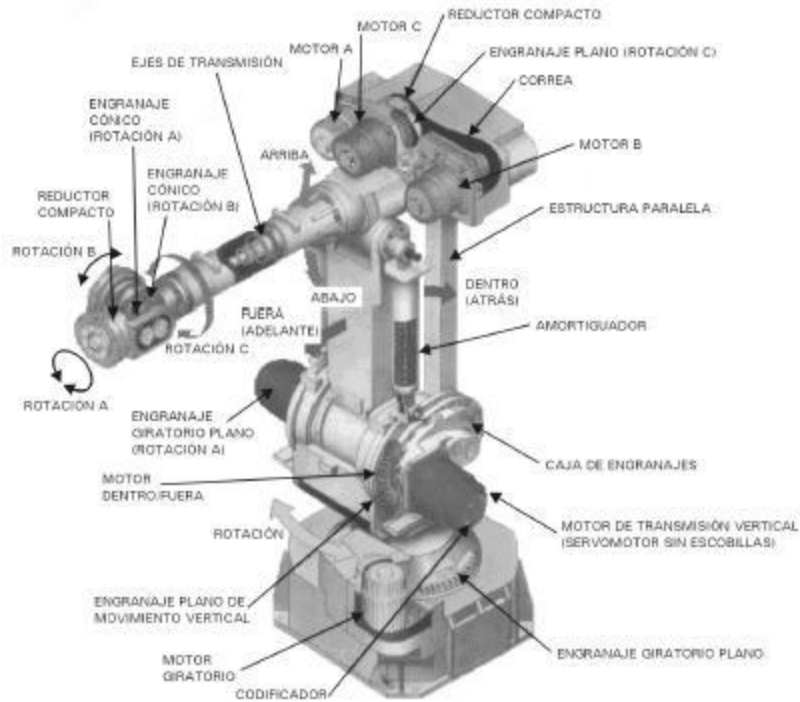


Figura 1. Morfología de un robot.

Estructura mecánica de un robot.

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía del brazo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencias a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca.

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro, o de una combinación de ambos. De este modo son posibles los seis tipos diferentes de articulaciones que se muestran en la siguiente imagen, aunque, prácticamente los robots solo se emplean la de rotación y la prismática.

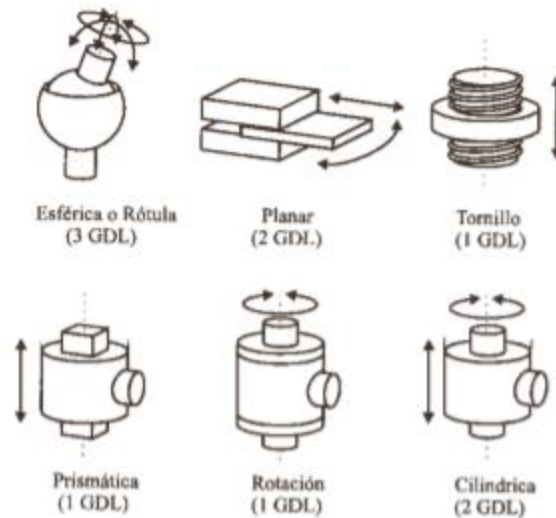


Figura 2. Tipos de articulaciones.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina **grado de libertad** (GDL). En la imagen anterior se indica el número de GDL de cada tipo de articulación. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados empleadas son únicamente las de rotación y prismática con un solo GDL cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones de que se compone.

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones. Las combinaciones más frecuentes son las representadas en la siguiente figura donde se atiende únicamente a las tres primeras articulaciones del robot, que son las más importantes a la hora de posiciones su extremo en un punto del espacio.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posiciones y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisaran al menos seis GDL.

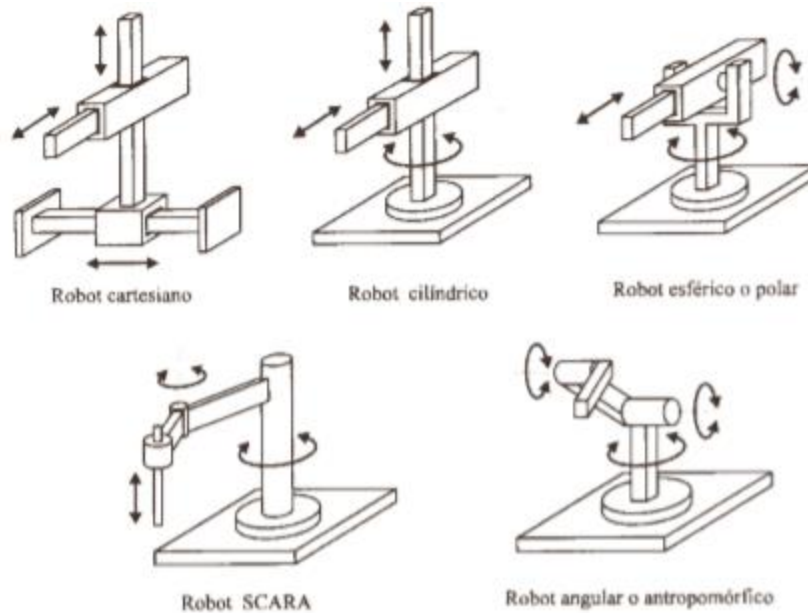


Figura 3. Tipos de robots

En la siguiente figura se muestra los seis GDL con que está dotado el robot ARC Mate 120/S-12 de Fanuc, así como sus articulaciones y eslabones.

En la práctica, a pesar de ser necesarios los seis GDL comentados para tener total libertad en el posicionamiento y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con solo cuatro o cinco GDL, por ser estos suficientes para llevar a cabo las tareas que se les encomienda.

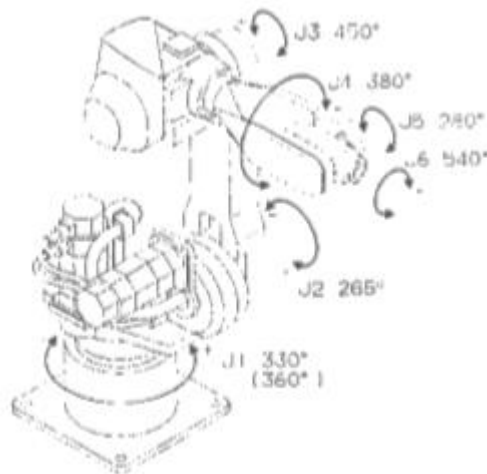


Figura 4. Grados de libertad.

Existen también casos opuestos, en los que se precisan más de seis GDL para que le robot pueda tener acceso a todos los puntos de su entorno. Así si se trabaja en un entorno con obstáculos de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubiera llegado con seis GDL. Otra situación frecuente es la de dotar al robot de un GDL adicional que le permita

desplazarse a lo largo de un carril, aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder. Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para realizar una determinada tarea se dice que el robot es redundante.

La siguiente imagen representa las dos situaciones para el caso de robots planares a los que les bastaría con 2 GDL para posicionar un extremo en cualquier punto del plano.

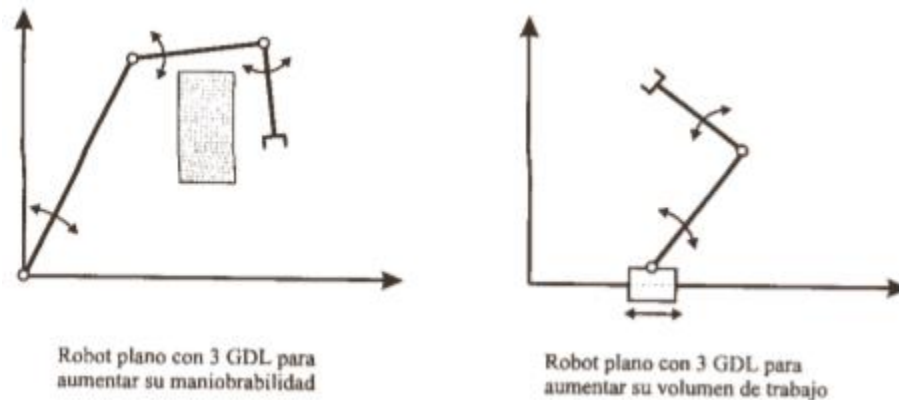


Figura 5. Representación de grados de libertad para un robot planar

Transmisiones y reductores.

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Se incluirán junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

Transmisiones.

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares que deben vencer los actuadores depende directamente de la distancia de las masas al actuado. Por estos motivos se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario.

Entrada – Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular – Circular	Engranajes Correa dentada Cadena Paralelogramo Cable	Pares altos Distancia grande Distancia grande	Holguras Ruido Giro limitado Deformabilidad
Circular – Lineal	Tornillo sin fin Cremallera	Poca holgura Holgura media	Rozamiento Rozamiento
Lineal – Circular	Paral, articulado Cremallera	Holgura media	Control difícil Rozamiento.

Tabla 1. Tipos de transmisiones.

Existen actualmente en el mercado robots industriales con acoplamiento directo entre accionamiento y articulación, ventajosos, tal y como se detalla más adelante, en numerosas ocasiones. Se trata, sin embargo, de casos particulares dentro de la generalidad que en los robots industriales actuadores supone la existencia de sistemas de transmisión junto con reductores para el acoplamiento entre actuadores y articulaciones.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un tamaño y peso reducido, se ha de evitar que presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones con gran rendimiento.

Aunque no existe un sistema de transmisión específicos para robot, si existen usados con mayor frecuencia y que se recogen clasificados y la salida: lineal o circular. En la citada tabla también queda reflejadas algunas ventajas e inconvenientes propios de algunos sistemas de transmisión. Entre ellas cabe destacar la holgura o juego. Es muy importante que el sistema inherente a su funcionamiento o por las holguras que su desgaste pueda introducir. También hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado, y a ser posible entre grandes distancias.

Las transmisiones más habituales son aquellas que cuentan con movimiento circular tanto a la entrada a la salida. Incluidas en estas se hallan los engranajes, las correas dentadas y las cadenas. En la siguiente figura muestra el brazo articulado de una tele manipuladora junto con los engranajes de transmisión que transmite el par de los motores situados en su base a los eslabones.

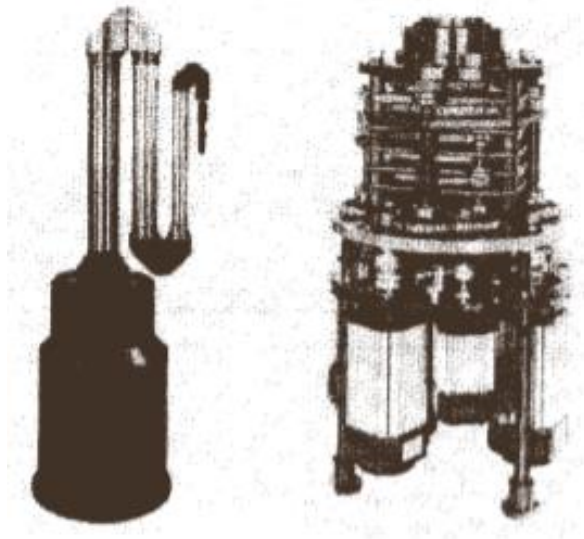


Figura 6. Brazo articulado de una tele manipuladora.

Reductores.

En cuanto a los reductores que, con las transmisiones, sí que existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a los reductores utilizados en robótica se les exige unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas presentaciones que se le piden al robot en cuanto precisión y velocidad de posicionamiento. En la siguiente tabla se muestran valores típicos de los reductores para robótica actualmente empleados.

Características	Valores típicos.
Relación de reducción	50 + 300
Peso y tamaño	0.1 + 30 kg
Momentos de inercia	10^{-4} kg m ²
Par de salida nominal	5700 Nm
Par de salida máximo	7900 Nm
Juego angular	0 + 2"
Rigidez torsional	100 + 200 Nm/rad
Rendimiento	85 % + 98%

Tabla 2. Valores típicos de los reductores.

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende también a minimizar su momento de inercia, de negativa influencia en el funcionamiento del motor, especialmente crítico en el caso de motores de baja inercia.

Los reductores, por motivo de diseño, tienen una velocidad máxima de entrada admisible, que como regla general aumentada a medida que disminuye el tamaño del motor. También existe una limitación en cuanto al par de salida nominal permisible (T_2) que depende del par de entrada (T_1) y de la relación de transmisión a través de la relación:

$$T_2 = \eta T_1 \frac{w_1}{w_2}$$

Puesto que los robots trabajan en ciclos cortos que implican continuos arranques y paradas, es de gran importancia que el reductor sea capaz de soportar pares elevados puntuales. También se busca que el juego angular o backlash sea lo menor posible. Este se define como el ángulo que gira el eje de salida cuando se cambia su sentido de giro sin que llegue a girar el eje de entrada. Por último, es importante que los reductores para robótica posean una alta rigidez torsional, definida como el par que hay que aplicar sobre el eje de salida para que, manteniendo el de entrada, aquel gire un ángulo unitario.

Los reductores para robots más comúnmente usados son los que las empresas Harmonic Drive y Cyclo-Getriebebau. Los primeros, denominados HDUC, se basan en una corona exterior rígida con dentado interior (circular spline) y un vaso flexible (flexspline) con dentado exterior que engranada en el primero. El número de dientes de ambos diferente en 1 o 2. Interiormente al vaso gira un rodamiento elipsoidal (wave generator) que deforma el vaso, poniendo en contacto la corona exterior con la zona del vaso correspondiente al máximo diámetro de la elipse. Al girar el wave generator (al que se fija el eje de entrada), se obliga a que los dientes del flexspline (fijado al eje de salida) engranen uno a uno con los del circular spline, de modo que al haber una diferencia de dientes $Z = N_c - N_r$, tras una vuelta completa del wave generator, el flexspline solo habrá avanzado Z dientes. La relación de reducción conseguida será, por tanto, de Z/N_r . en concreto, se consiguen reducciones de hasta 320, con una holgura cercana a cero y capacidad de transmisión de par de 5720 Nm.

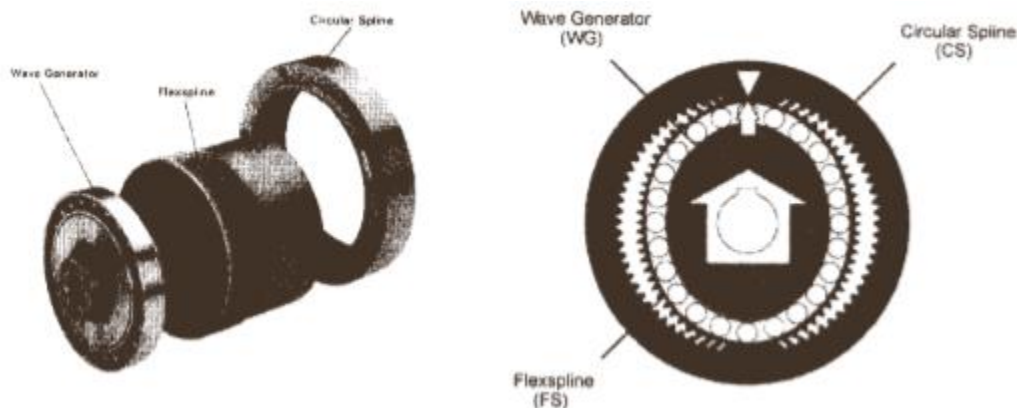


Figura 7. Sistema de reducción CYCLO y Harmonic Drive

Por otra parte, el sistema de reducción de los reductores CYCLO se basa en el movimiento cicloidal es un disco de curvas movido por una excéntrica solidaria al árbol de entrada. Por cada revolución de la excéntrica el disco de curvas avanza un saliente rodando sobre los rodillos exteriores. Este avance arrastra a su vez a los pernos del árbol de salida que describirán una cicloide dentro de los huecos del disco de curvas. La componente de traslación angular viene, por tanto, determinada por el número de salientes. Para compensar los momentos de flexión y de las masas de cada disco en movimiento excéntrico, generalmente se utilizan dos discos desfasados entre si 180°.

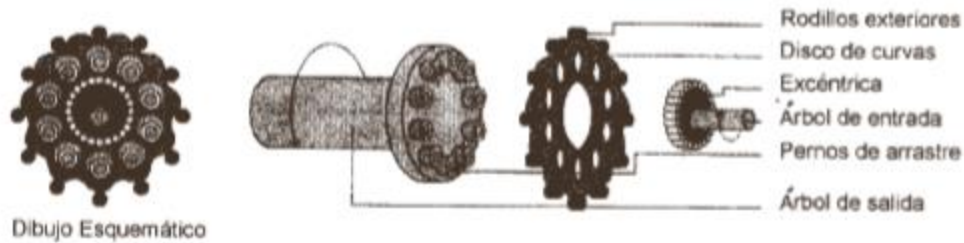


Figura 8. Sistema de reducción CYCLO

Existe también un tercer tipo de reductor denominado REDEX-ACBAR, de funcionamiento similar al CYCLO, pero que presenta la posibilidad de poder reducir el juego angular el exterior a teóricamente un valor nulo.

Accionamiento directo.

Como se ha iniciado anteriormente, desde hace unos años existen en el mercado robots que poseen lo que se ha dado en llamar accionamiento directo (Direct Drive DD), en el que el eje del actuador se conecta directamente a la carga o articulaciones, sin la utilización de un reductor intermedio. Este término suele utilizarse exclusivamente para robots con accionamiento eléctrico.

Este tipo de accionamiento aparece a raíz de la necesidad de utilizar robots en aplicaciones que exigen combinar gran precisión con alta velocidad. Los reductores introducen una serie de efectos negativos, como son juego angular, rozamiento o disminución de la rigidez del accionado, que pueden impedir alcanzar los valores de precisión y velocidad requeridos.

Las principales ventajas que se derivan de la utilización de accionamiento directos son las siguientes:

- Posicionamiento rápido y preciso, pues se evitan rozamientos y juegos de las transmisiones y reductores.
- Aumento de las posibilidades de controlabilidad del sistema a costa de una mayor complejidad.
- Simplificación del sistema mecánico al eliminarse el reductor.

El principal problema que existe para la aplicación práctica de un accionamiento directo radica en el motor a emplear. Debe tratarse de motores que proporcionen un par elevado (unas 50-100 veces mayor que con reductor) a bajas revoluciones (las de movimiento de la articulación) manteniendo la máxima rigidez posible.

Entre los motores empleados para accionamiento directo y que cumpla estas características, se encuentran los motores síncronos y de continua sin escobillas (brushless), ambos con imanes permanentes fabricados con materiales especiales (samario-cobalto). También se utilizan motores de inducción de reluctancia variables. La necesaria utilización de este tipo de motores encarece notablemente el sistema de accionamiento.

Otra cuestión importante a tener en cuenta en el empleo de accionamientos directos es la propia cinemática del robot. Colocar motores, generalmente pesados y voluminosos, junto a las articulaciones, no es factible para todas las configuraciones del robot debido a las inercias que se generan. El estudio de la cinemática con la que se diseña el robot ha de tener en cuenta estos parámetros, estando la estructura final elegida altamente condicionada por ellos. Por este motivo, los robots de accionamiento directo son generalmente de tipo SCARA, cuyo diseño se corresponde bien con las necesidades que el accionamiento directo implica. Al eliminar el reductor también se disminuye de forma considerable la resolución real del codificador de posición acoplado al eje, tal y como se detalla en el epígrafe dedicado a sensores internos. Esto lleva a la utilización en los DD de codificadores de posición de muy alta resolución.

Actuadores.

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las ordenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características a considerar son entre otras:

- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Coste

En este epígrafe¹ se examina los tres tipos de actuadores citados, comparados en cuanto a las características anteriores.

Actuadores neumáticos.

En ellos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

Cilindros neumáticos

Motores neumáticos (de aletas rotativas o de pistones axiales)

En los primeros se consigue el desplazamiento de un embolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados de aquel. Los cilindros neumáticos pueden ser simple o doble efecto. En los primeros el embolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como consecuencia del efecto de un muelle (que recupera al embolo a su posición de reposo).

¹ Epígrafe: Título o enunciado del contenido de un escrito o de parte de él.

en los cilindros de doble efecto el aire a presión es el encargado de empujar al embolo en las dos direcciones, al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámaras.

Normalmente, con los cilindros neumáticos solo se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo. Esto último se puede conseguir con una válvula de distribución (generalmente de accionamiento eléctrico) que canaliza el aire a presión hacia una de las dos caras del embolo alternativamente. Existen no obstante sistemas de posicionamiento continuo de accionamiento neumático, aunque debido a su coste y calidad todavía no resultan competitivos.

En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más usados son los motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales. En los primeros, sobre el rotor excéntrico están dispuestas las aletas de longitud variable. Al entrar aire a presión en uno de los compartimientos formados por dos aletas y la carcasa, estas tienden a girar hacia una situación en la que el compartimiento tenga mayor volumen. Los motores de pistones axiales tienen un eje de giro solidario a un tambor que se ve obligado a girar por las fuerzas que ejercen varios cilindros, que se apoyan sobre un plano inclinado.

Otro método común más sencillo de obtener movimiento de rotación a partir de actuadores neumáticos, se basa en el empleo de cilindros cuyo embolo se encuentra acoplado a un sistema de piñón-cremallera. El conjunto forma una unidad compacta que puede adquirirse en el mercado como tal.

En general y debido a la compresibilidad del aire, los actuadores no consiguen una buena precisión de posicionamiento. Sin embargo, su sencillez y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada).

Siempre debe tenerse en cuenta que el empleo de un robot con algún tipo de accionamiento neumático deberá disponer de una instalación de aire comprimido, incluyendo: compresor, sistema de distribución (tuberías, electroválvulas), filtros, secadores, etc. No obstante, estas instalaciones neumáticas son frecuentes y existen en muchas de las fabricas donde se da cierto grado de automatización.

Actuadores hidráulicos.

Este tipo de actuadores no se diferencian funcionalmente en mucho de los neumáticos. En ellos, en vez de aire se utilizan aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegándose en ocasiones a superar los 300 bar. Existen como en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones.

Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente inferior al del aire, por lo que la precisión obtenida en este caso es mayor. Por motivos similares, es más fácil en ellas realizar un control continuo, pudiendo posicionar un eje en todo un rango de valores (haciendo uso de servo control) con notable

precisión. Además, las elevadas presiones de trabajo, diez veces superior a las de los actuadores neumáticos, permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares.

Por otra parte, este tipo de actuadores presenta estabilidad frente estática. Esto indica que el actuador es capaz de soportar cargas, como el peso o una presión ejercida sobre una superficie, sin aporte de energía (para mover el embolo de un cilindro sería preciso vaciar este de aceite). También es destacable su elevada capacidad de carga y relación potencia-peso, así como sus características de auto lubricación y robustez.

frente a estas ventajas existen también ciertos inconvenientes. Por ejemplo, las elevadas presiones a las que se trabaja propician la existencia de fugas de aceite a lo largo de la instalación. Asimismo, para los eléctricos es más complicada que la necesaria para los actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos, necesitando de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de refrigeración y unidades de control de distribución.

Los accionamientos hidráulicos se usan con frecuencia en aquellos robots que deben manejar grandes cargas. Así, este tipo de accionamiento ha sido usado por robots como el UNIMATE 2000 y 4000 con capacidad de carga de 70 y 205 kg, respectivamente.

Actuadores eléctricos.

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos han hecho que sean los más usados en los robots industriales actuales.

Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos diferentes:

- 1) Motores de corriente continua (DC):
 - i) Controlados por inducido
 - ii) Controlados por excitación
- 2) Motores de corriente alterna (AC):
 - i) Síncronos
 - ii) Asíncronos
- 3) Motores paso a paso.

Motores de corriente continua (DC)

Son los más usados en la actualidad a su facilidad de control. En la siguiente imagen se muestra un esquema de un motor DC seccionado, en el que se pueden apreciar sus distintos elementos. En este caso, el propio motor incluye un codificador de posición (encoder) para poder realizar su control.

Los motores DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

El inductor, también denominado devano de excitación, está situado en el estator y crea un campo magnético de dirección fija, denominado de excitación.

El inducido, situado en el rotor, hace girar al mismo debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación. Recibe la corriente del exterior a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito.

Para que se pueda realizar la conversión de energía eléctrica en energía mecánica de forma continua es necesario que los campos magnéticos del estator y del rotor permanezcan estáticos entre sí. Esta transformación es máxima cuando ambos campos se encuentran en cuadratura. El colector de delgas es un conmutador sincronizado con el rotor encargado de que se mantenga el ángulo relativo entre el campo del estator y el creado por las corrientes rotoricas. De esta forma se consigue transformar automáticamente, en función de la velocidad de la máquina, la corriente que alimenta al motor en corriente alterna de frecuencia variable en el inducido. Este tipo de funcionamiento se conoce con el nombre de auto pilotado.

Al aumentar la tensión del inducido aumenta la velocidad de la máquina. Si el motor esta alimentación a tensión constante, se puede aumentar la velocidad disminuyendo el flujo de excitación. Pero cuando más débil sea el flujo, menor será el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante. En el caso de control por inducido, la intensidad del inductor se mantiene constante, mientras que la tensión del inducido se utiliza para controlar la velocidad de giro. En los controlados por excitación se actúan, al contrario.

Del estudio de ambos tipos de motores, y realizándose las simplificaciones correspondientes, se obtiene que la relación entre tensión de control y velocidad de giro (función de transferencia), responde que la relación a un sistema de primer orden en los controlados por inducido, mientras que, en el caso de los motores controlados por excitación, esta relación es la de un segundo orden.

Además, en los motores controlados por inducido se produce un efecto estabilizador de la velocidad de giro por la realimentación entrístece que posee a través de la fuerza contra electromotriz. Por estos motivos, los dos tipos de motores DC es el controlador por inducido el que se usa en el accionamiento de robots.

Para mejorar el comportamiento de este tipo de motores, el campo de excitación se genera mediante imanes permanentes, con lo que se evitan fluctuaciones del mismo. Estos imanes son de alecciones especiales como samario-cobalto. Además, para disminuir la inercia que poseería un rotor bobinado, que es el inducido, se construye este mediante una serie de espiras Seri grafiadas en un disco plan o. en contrapartida, este tipo de rotor no posee apenas masa térmica lo que aumenta los problemas de calentamiento por sobrecarga.

Motores paso a paso

Los motores paso a paso generalmente no han sido considerados dentro de los accionamientos industriales, debido principalmente a que los pares para lo que estaban disponibles eran muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas eran grandes. Esto limitaba su aplicación a controles de posición simples. En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar

motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos para su uso como accionamientos industriales.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- De imanes permanentes.
- De reluctancia variable.
- Híbridos.

En los primeros, de imanes permanentes, el rotor, que posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases de estator. En los motores de reluctancia variable, el rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por la bobina de estator. Los motores híbridos combinan el modo de funcionamiento de los dos motores anteriores.

En los motores paso a paso la señal de control son trenes de pulsos van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número de discretos grados.

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada (aumentadas por las fuerzas magnéticas en equilibrio que se dan cuando está parado) impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por lo que esta, y por tanto la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente.

Para simplificar el control de estos motores existen circuitos especializados que a partir de tres señales (tren de pulsos, sentido de giro e inhibición) generar, a través de una etapa lógica, las secuencias de pulsos que un circuito de conmutación distribuye a cada fase.

Su principal ventaja con respecto a los servomotores tradicionales es su capacidad para asegurar un posicionamiento simple y exacto. Pueden girar además de forma continua, con velocidad variable, como motores síncronos, ser sincronizados entre sí, obedecer a secuencias complejas de funcionamiento, etc. Se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, fiables y fáciles de controlar, pues al ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.

Entre los inconvenientes se puede citar que, si funcionamiento a bajas velocidades no es suave, y que existe el peligro de pérdida de una pérdida de posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Su potencia nominal es baja y su precisión (mínimo ángulo girado) llega típicamente hasta $1,8^\circ$. Se emplean para el posicionamiento de ejes que no precisan grandes potencias (giro o pinza) o para robots pequeños (educacionales); también son muy utilizados en disposición periféricos del robot, como mesas de coordenadas.

Motores de corriente alterna (AC)

Este tipo de motores no ha tenido aplicación en el campo de rotación hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las máquinas síncronas hacen que se presenten como un claro competidor de los motores de corriente continua. Estos se deben principalmente a tres factores:

La construcción de rotores síncronos sin escobillas

Uso de convertidores estáticos que permiten la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.

Empleo de la microelectrónica que permiten una gran capacidad de control.

El inductor se sitúa en el rotor y está constituido por imanes permanentes, mientras que el inducido, situado en el estator, está formado por tres devanados iguales de calados 120° eléctricos y se alimenta con sistema trifásico de tensiones. Es preciso resaltar la similitud que existen entre este esquema de funcionamiento y el del motor sin escobillas.

En los motores síncronos la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido. Para poder variar esta con precisión, el control de velocidad se realiza mediante un convertidor de frecuencia. Para evitar el riesgo de pérdida de sincronismo se utiliza un sensor de posición continuo que detecta la posición del rotor y permite mantener en todo momento el ángulo que forman los campos del estator y del rotor. Este método de control se conoce como auto síncrono o autopiloto.

El motor síncrono auto pilotado excitado con imán permanente, también llamado motor senoidal, no presenta problemas de mantenimiento debido a que no posee escobillas y tiene una gran capacidad de evacuación de calor, ya que los devanados están en contacto directo con la carcasa. El control de posición se puede realizar sin utilización de un sensor externo adicional, aprovechando el detector de posición del rotor que posee el propio motor. Además, permite desarrollar, a igualdad de peso una potencia mayor que el motor de corriente continua. En la actualidad diversos robots industriales emplean este tipo de accionamiento con notables ventajas frente a los motores de corriente continua. En el caso de los motores asíncronos, no se ha conseguido resolver satisfactoriamente los problemas de control que presentan. Esto ha hecho que hasta el momento no tengan aplicaciones en robótica.

	Neumática	Hidráulico	Eléctrico
Energía	Aire a presión (5 – 10 bar)	Aceite mineral (50 – 100 bar)	Corriente eléctrica
Opciones	Cilindros Motor de paletas Motor de pistón	Cilindros Motor de paletas Motor de pistones axiales	Corriente continua Corriente alterna Motor paso a paso
Ventajas	Baratos Rápidos Sencillos Robustos	Rápidos Alta relación potencia-peso Auto lubricantes Alta capacidad de carga Estabilidad frente a cargas estáticas	Precisos Fiables Fácil control Sencilla instalación Silenciosos
Desventajas	Dificultad de control continuo Instalación especial (compresor, filtros) Ruidosos	Difícil mantenimiento Instalación especial (filtros, eliminación aire) Frecuentes fugas Caros	Potencia limitada

Tabla 2. Comparación de los actuadores neumáticos, hidráulicos y eléctricos.

Sensores internos

Para conseguir un robot realice su tarea con la adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga conocimiento tanto de su propio estado como del estado de su entorno. La información denominada como su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue con los denominados sensores internos, mientras que la que se refiere al estado de su entorno, se adquiere con los sensores externos.

En este epígrafe se trata únicamente de los sensores internos. Información sobre externos puede verse en textos y bibliografía especializada en visión artificialmente, sensores de fuerza, tacto, distancia o telemetría. La información que la unidad de control del robot puede sobre el estado de su estructura mecánica es fundamentalmente la relativa a su posición y velocidad.

Presencia	<ul style="list-style-type: none"> · Inductivo · Capacitivo · Efecto hall · Célula Reed · Óptico · Ultrasonido · Contacto 	
Posición	Analógicos <ul style="list-style-type: none"> · Potenciómetros · Resolver · Sincro · Inductosyn · LVDT 	
	Digitales <ul style="list-style-type: none"> · Encoders absolutos · Encoders incrementales · Regla óptica 	
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> · Tacogeneratriz 	

tabla 3. Tipos de sensores internos.

Sensores de posición.

Para el control de posición se emplean fundamentalmente los denominados encoders y resolvers. Los potenciómetros dan bajas presentaciones por lo que no se emplean salvo en contadas ocasiones (robots educativos, ejes de poca importancia).

Codificadores angulares de posición (encoders)

Los codificadores ópticos o encoders incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas de forma correcta, y de un elemento foto receptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gira se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

Existe, sin embargo, el problema de no saber si en un momento dado se está realizando un giro en un sentido o en otro, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente. Una solución a este problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos que con ella se genere este desplazado 90° eléctricos con respecto al generado por la primera franja, de esta manera, con un circuito relativamente sencillo es posible obtener una señal adicional que indique cual es el sentido de giro, y que actúe sobre el contador correspondiente indicando que incremente o decremente la cuenta que se esté realizando.

Es necesario además suponer de una manera de referencia sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se ha dado poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subido de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementado así por cuatro la resolución de captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuito adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

El funcionamiento básico de los codificadores o encoders absolutos es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y una foto receptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente.

No es necesario ahora ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido de giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija y vendrá de por el número de anillos que posea el disco graduado. Resoluciones habituales van desde 2^8 a 2^{19} bits (desde 256 a 524,2888 posiciones distintas).

Normalmente los sensores de posición se acoplan al eje del motor. Considerando que en la mayor parte de los casos entre el eje del motor y el de articulación se sitúa un reductor de relación N_1 cada movimiento de la articulación se verá multiplicado por N al ser medido por el sensor. Este aumentara así su resolución multándola por N .

Este problema se soluciona en los encoders absolutos con la utilización de otro encoder absoluto más pequeño conectado por un engranaje reductor al principal, de manera que cuando este gire de vuelta completa, el codificador adicional avanzara una posición. Son los denominados encoders absolutos multivuelta.

Esta misma circunferencia originaria que en el caso de los codificadores incrementales la señal de referencia o marca de cero, sea insuficiente para detectar el punto origen para la cuenta del pulso, pues habrá N posibles puntos de referencias para un giro completo de la articulación. Para distinguir cuál de ellos es el correcto se suele utilizar un detector de presencia denominado de sincronismo, acoplado directamente preciso ejecutar un procedimiento de búsqueda de referencias para los sensores (sincronizado). Durante su ejecución se leen los detectores de sincronismo que detectan la presencia o ausencia del eslabón del robot. Cuando se detecta la conmutación de presencia a ausencia de pieza o viceversa, se atiende al encoder incremental, tomándose como posición de origen la correspondiente al primer pulso de marca de cero que aquel genere.

Los encoders pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencia en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estado su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

Captadores angulares de posición.

La otra alternativa en sensores de posición para robots la representan los resolvers y los sincroresolvers, también llamados sincros. Se trata de captadores analógicos con resolución teóricamente infinita. El funcionamiento de los resolvers se basa en la utilización de una bobina solidaria al eje excitada por una portadora, generalmente con 400 Hz, y por dos bobinas fijas situadas a su alrededor.

	Robustez mecánica	Rango dinámico	Resolución	Estabilidad térmica
Encoder	Mala	Medida	Buena	Buena
Resolver	Buena	Buena	Buena	Buena
Potenciómetro	Regular	Mala	Mala	Mala

Tabla 4. Características los sensores de posicionamiento.

Sensores lineales de posición (LVDT e Inductosyn)

Entre los sensores de posición lineales destacan el transformador de variación lineal (LVDT) debido a su casi infinita resolución, poco rozamiento y alta respetabilidad. Su funcionamiento se basa en la utilización de un núcleo de material ferromagnético unido al eje cuyo movimiento se quiere medir. Este núcleo se mueve linealmente entre ellos.

Los dos devanados secundarios conectados en oposición serie ven como inducción de la tensión alterna del primario, al variar la posición del núcleo, hace crecer la tensión en un devanado y disminuirla en el otro. Del estudio de la tensión se deduce que esta proporcional a la diferencia de inductancias mutuas entre el devanado primario con cada uno de los secundarios, y que por tanto depende linealmente del desplazamiento del vástago solidario al núcleo.

Además de las ventajas señaladas, el LVDT presenta una alta linealidad, gran sensibilidad y una respuesta dinámica elevada. Su uso está ampliamente extendido, a pesar del inconveniente de poder ser aplicado únicamente en la medición de pequeños desplazamientos.

Otros sensores lineales que también se emplean con relativa frecuencia son las denominadas reglas ópticas (equivalentes a los codificadores ópticos angulares) y las reglas magnéticas o Inductosyn (marca registrada de Farrand Industries Inc.). el funcionamiento del Inductosyn es similar al del resolver con la diferencia de que el rotor desliza linealmente sobre el estator, siendo la forma de los devanados. El estator se encuentra excitado por una tensión conocida que induce en el rotor dependiendo de su posición relativa una tensión V_s .

Sensores de velocidad

La capacitación de la velocidad se hace necesaria para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. La información de la velocidad de movimiento de cada actuador (que tras el reductor es la de giro de la articulación) se realimenta normalmente a un bucle de control analógico implementando en el propio accionado del elemento motor. No obstante, en ocasiones en las que el sistema de control del robot lo exija, la velocidad de giro de cada actuador es llevada hasta la unidad de control del robot.

Normalmente, y puesto que el buen control de velocidad es analógico, el captador usado es un taco generatriz que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro de su eje (valores típicos pueden ser 10 mil voltios por rpm).

Otra posibilidad, usada para el caso de que la unidad de control del robot precise valorar la velocidad de giro de las articulaciones, consiste en derivar la información de posición que esta posee.

Sensores de presencia

Este tipo de sensor es capaz de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con el objeto. En el segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los diferentes tipos de captadores. En el caso de detección con contacto, se trata siempre de un interruptor, normalmente abierto o normalmente cerrado según interese, actuando mecánicamente a través de un vástago u otro dispositivo. Los detectores de presencia se utilizan en robótica principalmente como auxiliares de los detectores de posición, para indicar los límites de movimiento de las articulaciones y permitir localizar la posición de referencia de cero de estos en el caso de que sean incrementables.

Además de esta aplicación, los sensores de presencia se usan como sensores externos, siendo muy sencillos de incorporar al robot por su carácter binario y su costo reducido. Los detectores inductivos sentían el inconveniente de distinto comportamiento según del tipo de metal del que se trate. El mismo tipo de aplicación tiene los detectores capacitivos, más voluminosos, aunque en este caso los objetos a detectar no precisan ser metálicos. En cambio, presenta problemas de trabajo en condiciones húmedas y con puestas a tierra defectuosas.

Los sensores basados en el efecto Hall detectan la presencia de objetos ferromagnéticos por la deformación que estos provocan sobre un campo magnético. Los captadores ópticos, sin embargo, pueden detectar la reflexión del rayo de luz procedente del emisor sobre el objeto.

Tipos de sujeción	Accionamiento	Uso
Pinza de presión · desp. angular · desp. lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe presionar.
Pinza de enganche	Neumático o eléctrico	Piezas de grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión.
Ventosas de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico, etc.).
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas.

Tabla 5. Tipos de sujeción.

Elementos terminales

Los elementos terminales, también efectores finales (end effector) son los encargados de interaccionar directamente con el entorno del robot. Pueden ser tanto elementos de aprehensión como herramientas.

Si bien un mismo robot industrial es, dentro de unos límites lógicos, versátil y redactarle a una gran variedad de aplicaciones, no ocurre así con los elementos terminales, que son en muchos casos específicamente diseñados para cada tipo de trabajo.

Se puede establecer una clasificación de los elementos terminales atendiendo a si se trata de un elemento de sujeción o de una herramienta. Los primeros se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado. Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener los objetos y se suelen denominar pinzas. Se distingue entre las que utilizan dispositivos de agarre mecánico, y las que utilizan algún otro tipo de objeto y de manipulación a realizar destacan el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza que es necesario ejercer y mantener para sujetarlo. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso (que afecta a las inercias del robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control.

El accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayores ventajas en simplicidad, precio y fiabilidad, aunque presenta dificultades de control de posiciones intermedias. En ocasiones se utilizan accionamientos tipo eléctrico.

En la pinza se suelen situar sensores para detectar el estado de la misma (abierto o cerrado). Se pueden incorporar a la pinza otro tipo de sensores para controlar el estado de la pieza, sistemas de visión que proporcionen datos geométricos de los objetos, detectores de proximidad, sensores fuerza par, etc.

Tipo de herramienta	Comentarios
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar.
Soplete soldadura al arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde.
Cucharón para colada	Para trabajos de fundición.
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos.
Fresa-lija	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir, etc.
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura.
Cañón láser	Para corte de materiales, soldadura o inspección.
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales.

Tabla 6. Tipos de elementos terminales.

Como se ha indicado, el elemento terminal de aprehensión debe ser diseñado con frecuencia a medida para la aplicación. Existen ciertos elementos comerciales que sirven de base para la pinza, siendo posible a partir de ellos diseñar efectores válidos para cada aplicación concreta. Sin embargo, en otras ocasiones el efector deber ser desarrollado integrante, constituyendo su coste un porcentaje importante dentro del total de la aplicación.

En muchas aplicaciones el robot ha de realizar operaciones que no consisten en manipular objetos, sino que implican el uso de una herramienta. El tipo de herramienta con que puede dotarse a un robot es muy amplio. Normalmente, la herramienta está fijada rígidamente al

extremo del robot, aunque en ocasiones se dota a este de un dispositivo de cambio automático, que permita al robot usar diferentes herramientas durante su tarea.

Aparte de estos elementos de sujeción y herramientas más o menos convencionales, existen interesantes desarrollo e investigaciones, muchos de ellos orientados a la manipulación de objetos complicados y delicados.