

Estructura de un robot industrial

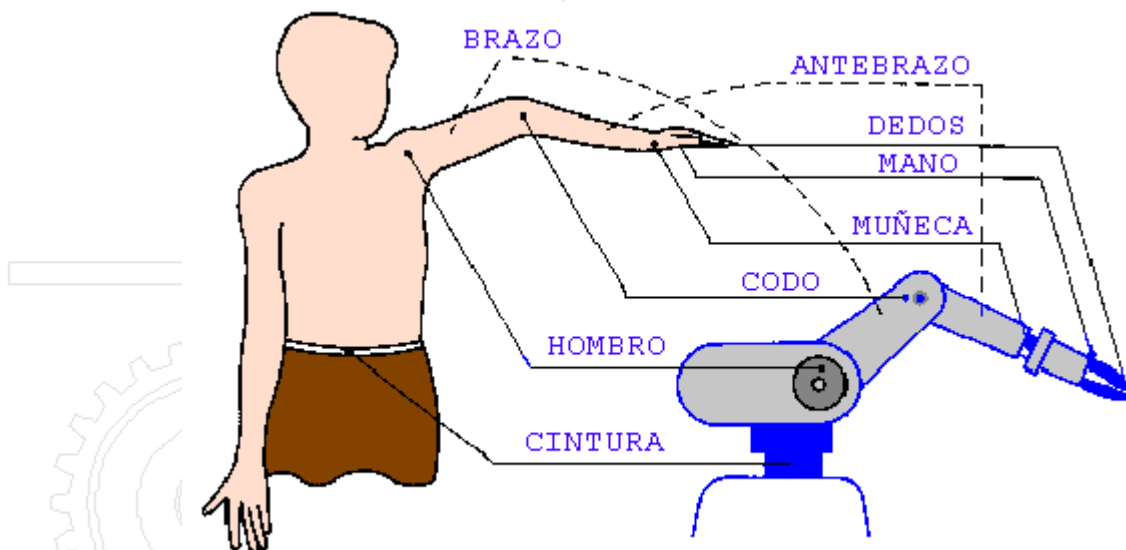
- [Componentes](#)
- [Características principales](#)
- [Configuraciones morfológicas del manipulador](#)

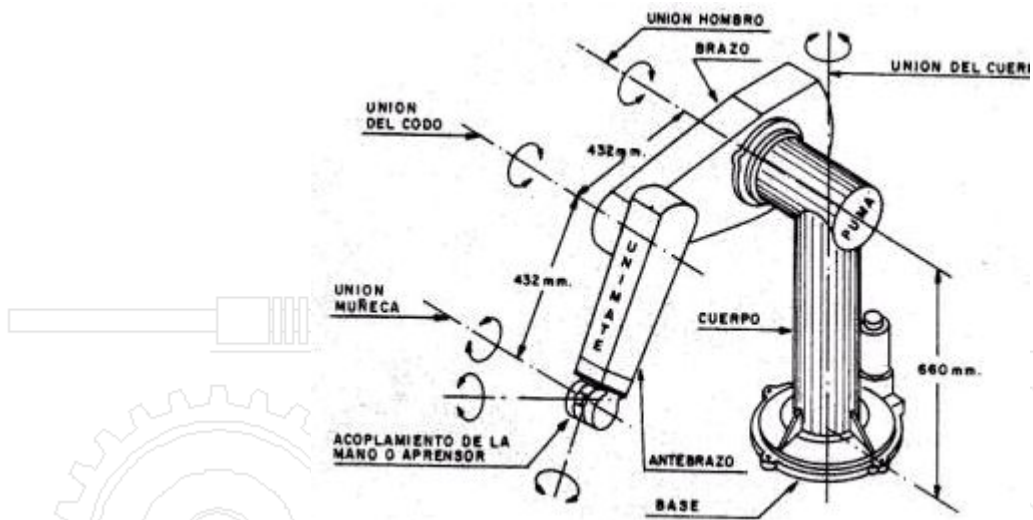


Componentes

Como se adelantó en [El sistema robótico](#), un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sensores, elementos terminales y controlador. Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de estos (máquinas herramientas y otras muchas máquinas emplean tecnologías semejantes), las altas prestaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas.

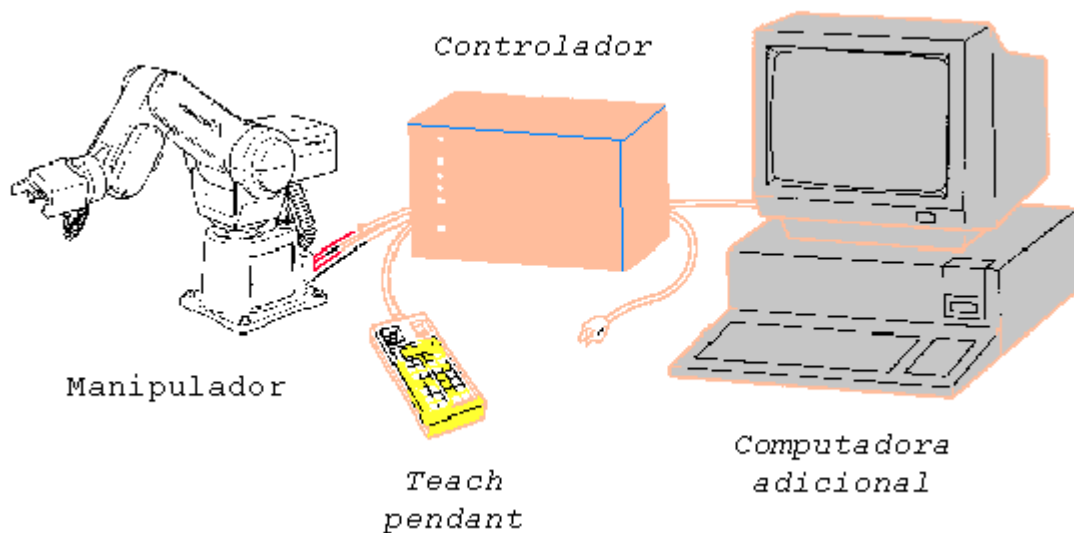
La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cintura, hombro, brazo, codo, muñeca, etc.





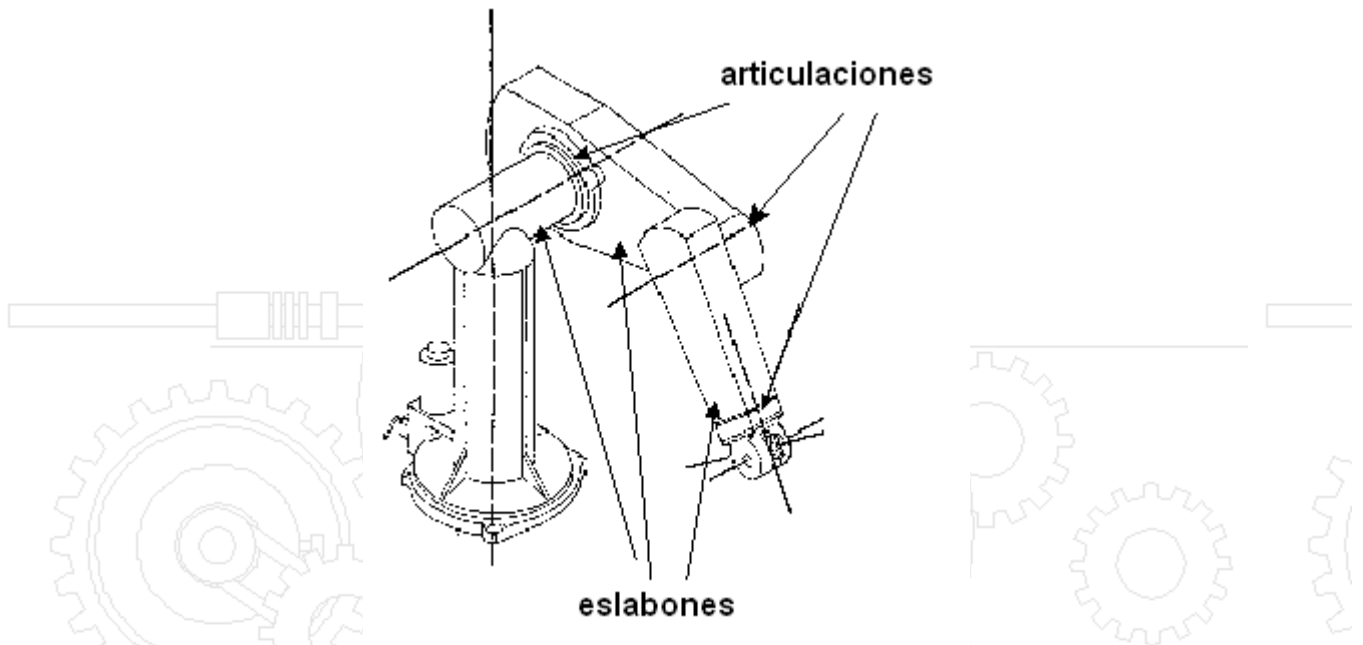
Los elementos que forman parte de la totalidad del robot son:

- manipulador
- controlador
- dispositivos de entrada y salida de datos
- dispositivos especiales

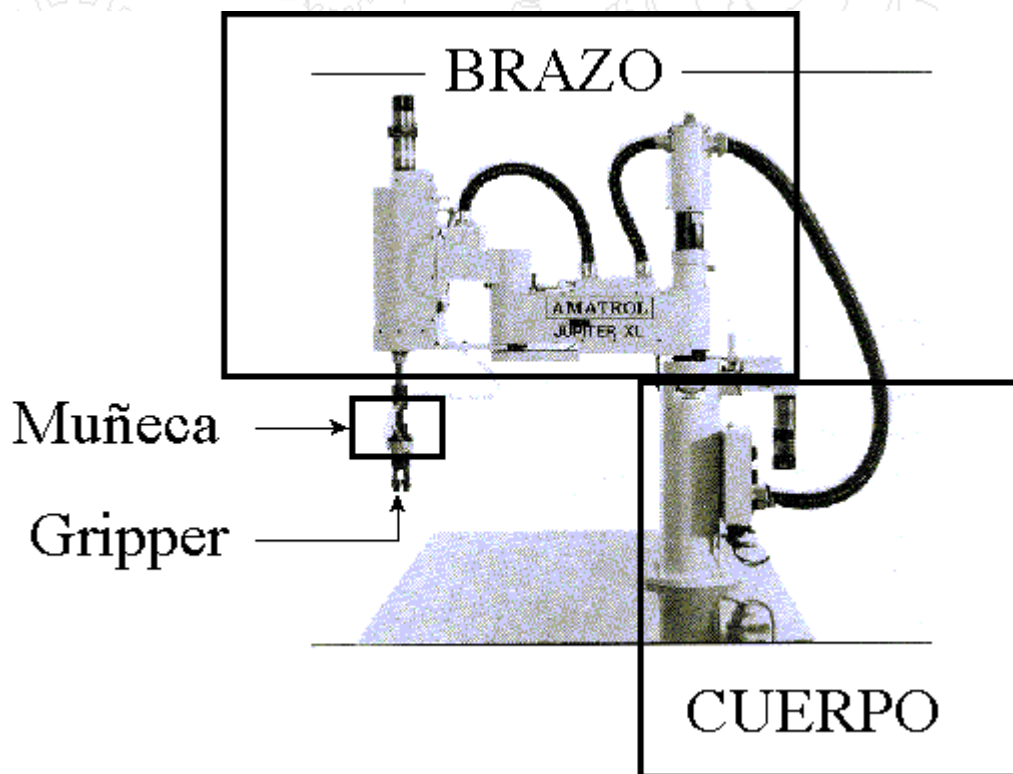


● Manipulador

Mecánicamente, es el componente principal. Está formado por una serie de elementos estructurales sólidos o **eslabones** unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos.



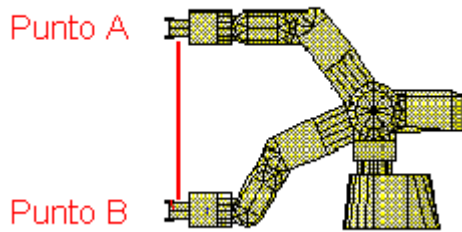
Las partes que conforman el manipulador reciben, entre otros, los nombres de: **cuerpo, brazo, muñeca y actuador final (o elemento terminal)**. A este último se le conoce habitualmente como **aprehensor, garra, pinza o gripper**.



Cada articulación provee al robot de, al menos, un **grado de libertad**. En otras palabras, las articulaciones permiten al manipulador realizar movimientos:

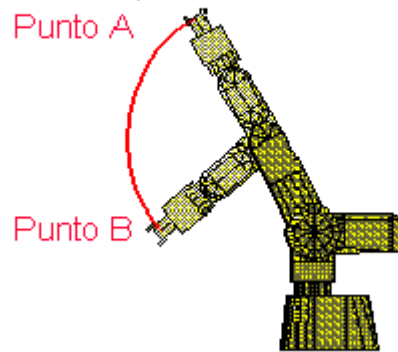
- **Lineales** que pueden ser horizontales o verticales.

Movimiento lineal entre los puntos A-B



- **Angulares (por articulación)**

Movimiento angular (por articulación) entre los puntos A-B



(En los dos casos la **línea roja** representa la trayectoria seguida por el robot).

Existen dos **tipos de articulación** utilizados en las juntas del manipulador:

- **Prismática /Lineal** - junta en la que el eslabón se apoya en un deslizador lineal. Actúa linealmente mediante los tornillos sinfín de los motores, o los cilindros.
- **Rotacional** - junta giratoria a menudo manejada por los motores eléctricos y las transmisiones, o por los cilindros hidráulicos y palancas.

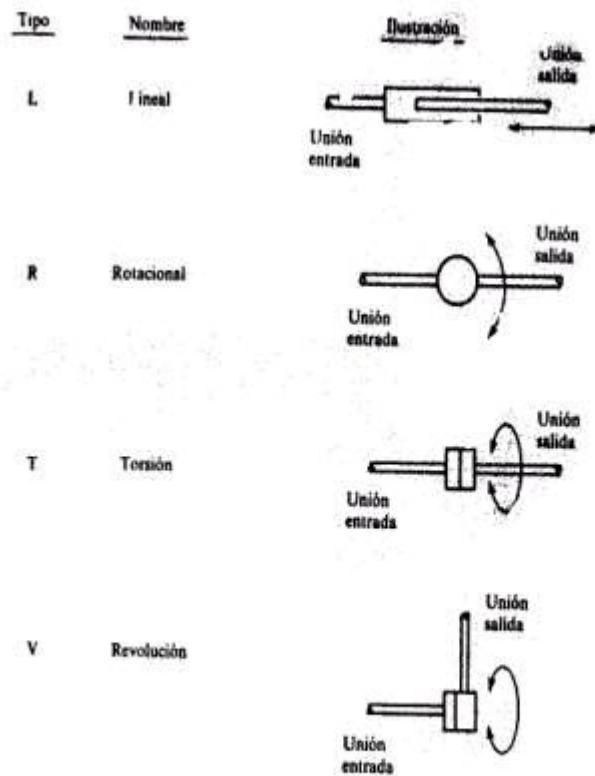
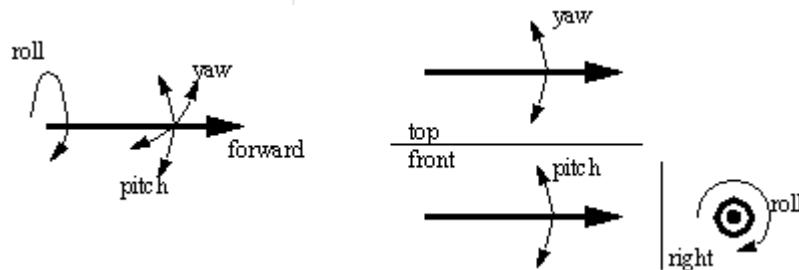
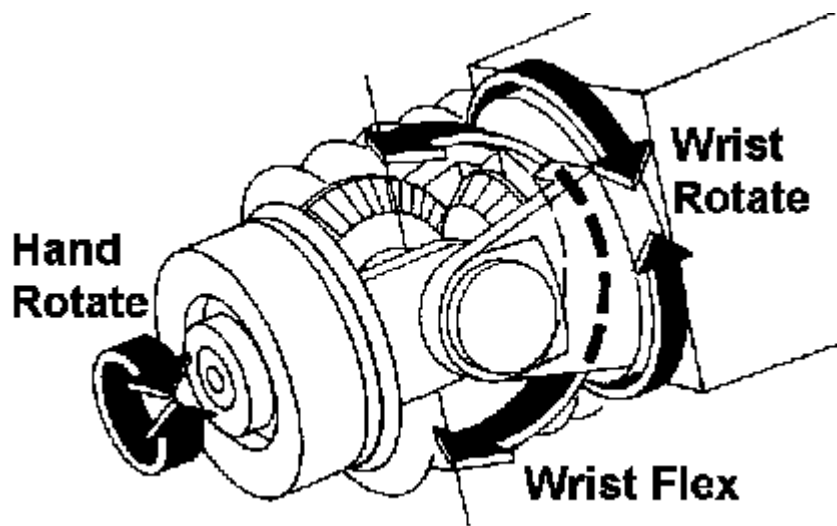


Figura 2-9. Varios tipos de articulaciones utilizadas en robots: (a) articulación rotacional con giro a lo largo de un eje perpendicular a los ejes de miembros del brazo, (b) articulación rotacional con una acción de torsión y (c) articulación de movimiento lineal, que suele conseguirse mediante una acción de deslizamiento.

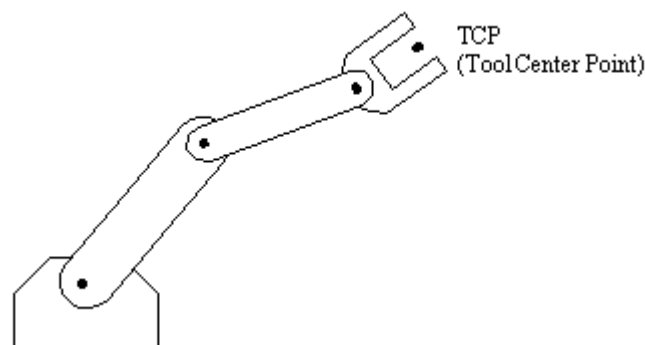
Básicamente, la orientación de un eslabón del manipulador se determina mediante los elementos *roll*, *pitch* y *yaw*



A la **muñeca** de un manipulador le corresponden los siguientes movimientos o grados de libertad: **giro** (*hand rotate*), **elevación** (*wrist flex*) y **desviación** (*wrist rotate*) como lo muestra el modelo inferior, aunque cabe hacer notar que existen muñecas que no pueden realizar los tres tipos de movimiento.



El **actuador final** (*gripper*) es un dispositivo que se une a la muñeca del brazo del robot con la finalidad de activarlo para la realización de una tarea específica. La razón por la que existen distintos tipos de elementos terminales es, precisamente, por las funciones que realizan. Los diversos tipos podemos dividirlos en dos grandes categorías: **pinzas y herramientas**. Se denomina **Punto de Centro de Herramienta** (TCP, *Tool Center Point*) al punto focal de la pinza o herramienta. Por ejemplo, el TCP podría estar en la punta de una antorcha de la soldadura.



● **Controlador**

Como su nombre indica, es el que regula cada uno de los movimientos del manipulador, las acciones, cálculos y procesamiento de la información. El controlador recibe y envía señales a otras máquinas-herramientas (por medio de señales de entrada/salida) y almacena programas.

Existen varios grados de control que son función del tipo de parámetros que se regulan, lo que da lugar a los siguientes tipos de controladores:

- **de posición:** el controlador interviene únicamente en el control de la posición del elemento terminal;
- **cinemático:** en este caso el control se realiza sobre la posición y la velocidad;
- **dinámico:** además de regular la velocidad y la posición, controla las propiedades dinámicas del manipulador y de los elementos asociados a él;
- **adaptativo:** engloba todas las regulaciones anteriores y, además, se ocupa de controlar la variación de las características del manipulador al variar la posición

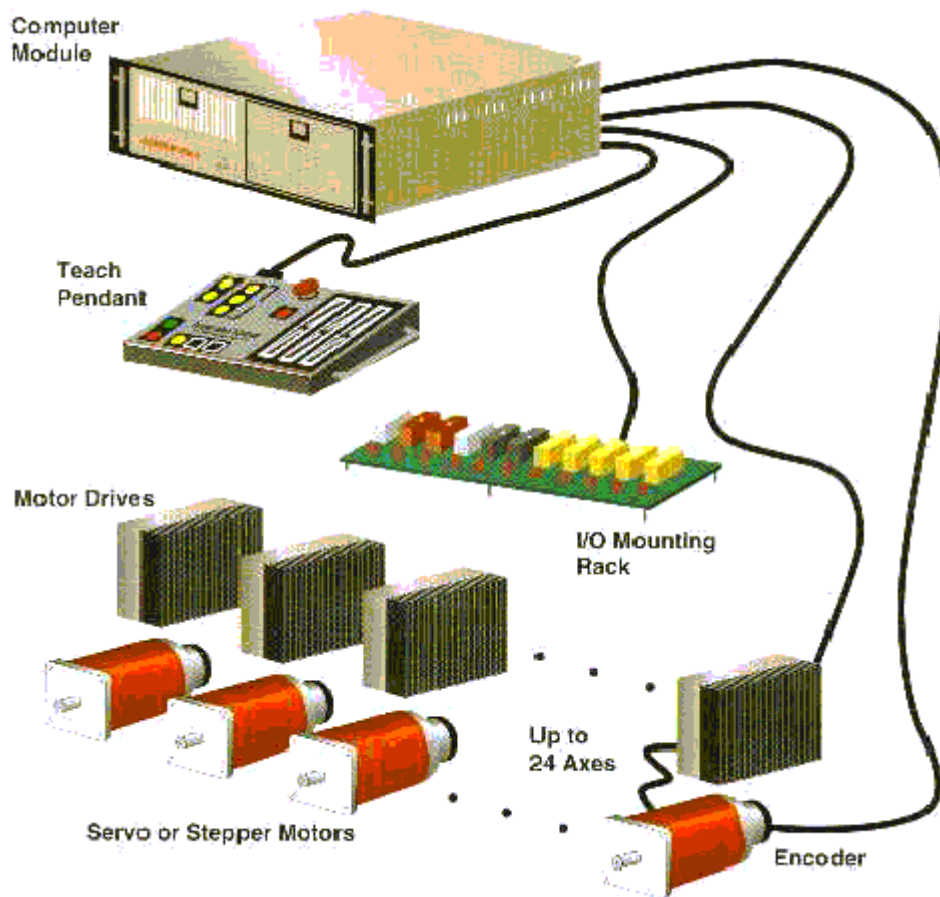
Otra clasificación de control es la que distingue entre **control en bucle abierto** y **control en bucle cerrado**.

El control en bucle abierto da lugar a muchos errores, y aunque es más simple y económico que el control en bucle cerrado, no se admite en aplicaciones industriales en las que la exactitud es una cualidad imprescindible. La inmensa mayoría de los robots que hoy día se utilizan con fines industriales se controlan mediante un proceso en bucle cerrado, es decir, mediante un bucle de **realimentación**. Este control se lleva a cabo con el uso de un sensor de la posición real del elemento terminal del manipulador. La información recibida desde el sensor se compara con el valor inicial deseado y se actúa en función del error obtenido de forma tal que la posición real del brazo coincida con la que se había establecido inicialmente.

● Dispositivos de entrada y salida

Los más comunes son: **teclado, monitor y caja de comandos (*teach pendant*)**.

En el dibujo se tiene un controlador (**computer module**) que envía señales a los motores de cada uno de los ejes del robot y la caja de comandos (***teach pendant***) la cual sirve para enseñarle las posiciones al manipulador del robot.



La siguiente figura muestra un ***teach pendant*** para un tipo de robot industrial.

TEACHING COMMAND MODULE

The operator enters the program which will be stored for automatic playback on command. Command Module may also be used for commanding the robot through its own teaching mode for familiarization or set-up situations.



KEY LOCK SWITCH



Choice of two teach modes. In TEACH MODE A, a sequence of operations is programmed. TEACH MODE B requires two steps. In the first step, the desired timing and input status are added to the sequencing. TEACH MODE B is also used to change the timing of any existing program when taught in A or B.

Repeat (selected) functions of all Command Modules can be used to indicate the operation function keys. This eliminates the possibility of accidentally activating TEACH MODE.



INITIALIZE — Resets transfer to starting position.



STEP — Executes one key cycle (10-100-500-1000) at a station. When depressed again it ends the program and begins a new key cycle at the next distance.



PAUSE — Suspends operation of robot until PAUSE key is pressed again.



SINGLE CYCLE — Runs the programmed sequence through one complete cycle.



STOP — Resets operation to a new station of the limited sequence. This key has been programmed and is not used.



Los dispositivos de entrada y salida permiten introducir y, a su vez, ver los datos del controlador. Para mandar instrucciones al controlador y para dar de alta programas de control, comúnmente se utiliza una computadora adicional. Es necesario aclarar que algunos robots únicamente poseen uno de estos componentes. En estos casos, uno de los componentes de entrada y salida permite la realización de todas las funciones.

Las señales de entrada y salida se obtienen mediante tarjetas electrónicas instaladas en el controlador del robot las cuales le permiten tener comunicación con otras máquinas-herramientas



Se pueden utilizar estas tarjetas para comunicar al robot, por ejemplo, con las máquinas de control numérico (torno, ...). Estas tarjetas se componen de relevadores, los cuales mandan señales eléctricas que después son interpretadas en un programa de control. Estas señales nos permiten controlar cuándo debe entrar el robot a cargar una pieza a la máquina, cuando deben empezar a funcionar la máquina o el robot, etc.

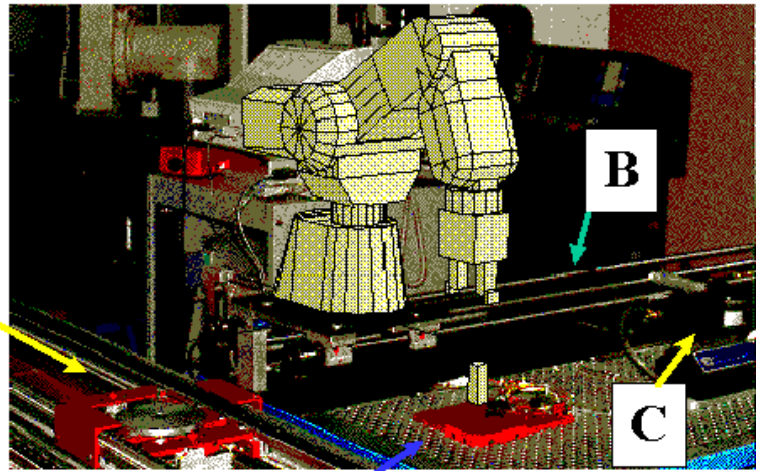
● Dispositivos especiales

Entre estos se encuentran los ejes que facilitan el movimiento transversal del manipulador y las estaciones de ensamblaje, que son utilizadas para sujetar las distintas piezas de trabajo.



En la estación del robot Move Master EX (Mitsubishi) representada en la figura se pueden encontrar los siguientes dispositivos especiales:

- A. Estación de posición sobre el transportador para la carga/descarga de piezas de trabajo.
- B. Eje transversal para aumentar el volumen de trabajo del robot.
- C. Estación de inspección por computadora integrada con el robot.
- D. Estación de ensamble.



El robot cuenta con señales de entrada/salida para poder realizar la integración de su función incorporando estos elementos.

Principales características de los Robots

A continuación se describen las características más relevantes propias de los robots y se proporcionan valores concretos de las mismas, para determinados modelos y aplicaciones.

- [Grados de libertad](#)
- [Espacio de trabajo](#)
- [Precisión de los movimientos](#)
- [Capacidad de carga](#)
- [Velocidad](#)
- [Tipo de actuadores](#)
- [Programabilidad](#)

Grados de libertad (GDL)

Cada uno de los movimientos independientes (giros y desplazamientos) que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior. Son los parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación del elemento terminal del manipulador. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los GDL de las articulaciones que lo componen. Puesto que las [articulaciones](#) empleadas suelen ser únicamente de rotación y prismáticas, con un solo grado de libertad cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones que lo componen.

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 posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisará al menos seis grados de libertad.



En la imagen se muestra el esquema de un robot de estructura moderna con 6 GDL; tres de ellos determinan la posición del aprehensor en el espacio (q_1 , q_2 y q_3) y los otros 3, la orientación del mismo (q_4 , q_5 y q_6).

Un mayor número de grados de libertad conlleva un aumento de la flexibilidad en el posicionamiento del elemento terminal. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 GDL, como las de la soldadura, mecanizado y paletización, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso en las labores de montaje. Si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al robot de grados de libertad adicionales le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubieran llegado con seis grados de libertad. Otra situación frecuente es dotar al robot de un grado de libertad adicional que le permita desplazarse a lo

largo de un carril aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder. Tareas más sencillas y con movimientos más limitados, como las de la pintura y paletización, suelen exigir 4 o 5 GDL.

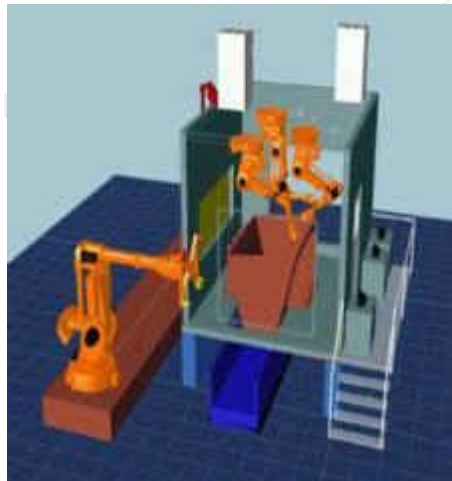
Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para realizar una determinada tarea se dicen que el **robot es redundante**.

Observando los movimientos del brazo y de la muñeca, podemos determinar el número de grados de libertad que presenta un robot. Generalmente, tanto en el brazo como en la muñeca, se encuentra un abanico que va desde uno hasta los tres GDL. Los grados de libertad del brazo de un manipulador están directamente relacionados con su [anatomía o configuración](#).



● **Espacio (volumen) de trabajo**

Las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot, característica fundamental en las fases de selección e implantación del modelo adecuado.



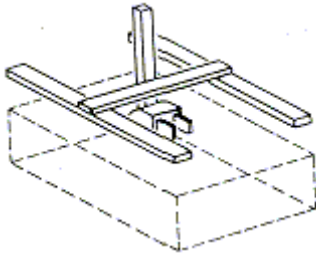
La zona de trabajo se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal (aprehensor o herramienta), es diferente a la que permite orientarlo verticalmente o con el determinado ángulo de inclinación.

También queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones.

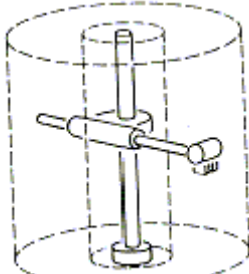
El volumen de trabajo de un robot se refiere únicamente al espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de su muñeca. Para determinar el volumen de trabajo no se toma en cuenta el actuador final. La razón de ello es que a la

muñeca del robot se le pueden adaptar *grippers* de distintos tamaños.

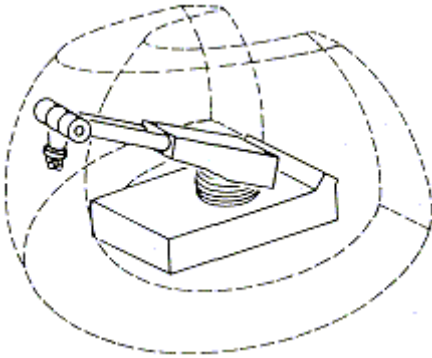
Para ilustrar lo que se conoce como **volumen de trabajo regular** y **volumen de trabajo irregular**, tomaremos como modelos varios robots.



El [robot cartesiano](#) y el robot cilíndrico presentan volúmenes de trabajo regulares. El robot cartesiano genera una figura cúbica.

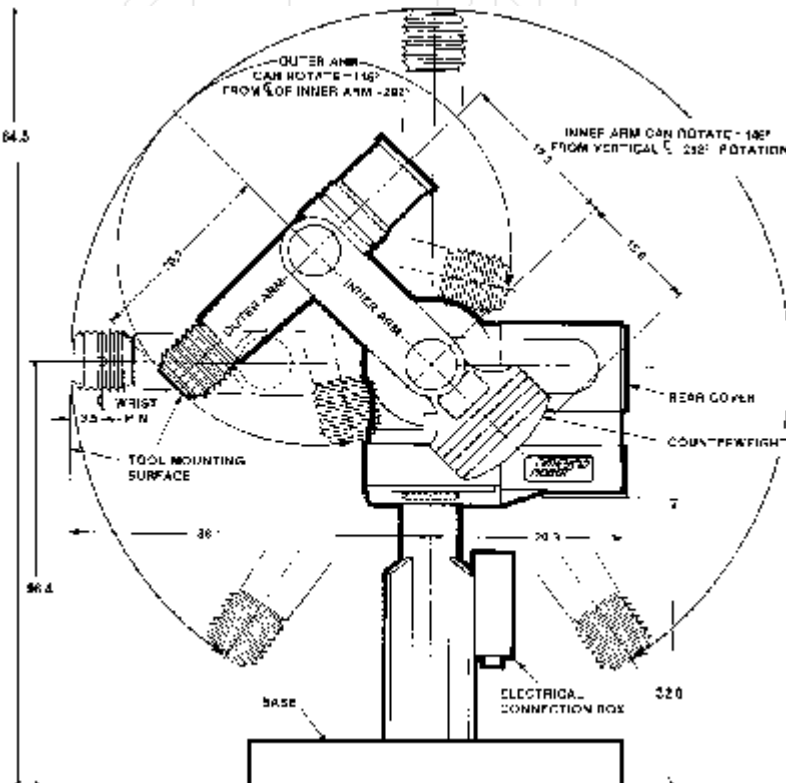


El robot de [configuración cilíndrica](#) presenta un volumen de trabajo parecido a un cilindro (normalmente este robot no tiene una rotación de 360°)



Por su parte, los robots que poseen una [configuración polar](#), los de brazo articulado y los modelos [SCARA](#) presentan un volumen de trabajo irregular.

Para determinar el volumen de trabajo de un robot industrial, el fabricante generalmente indica un plano con los límites de movimiento que tiene cada una de las articulaciones del robot, como en el siguiente caso:



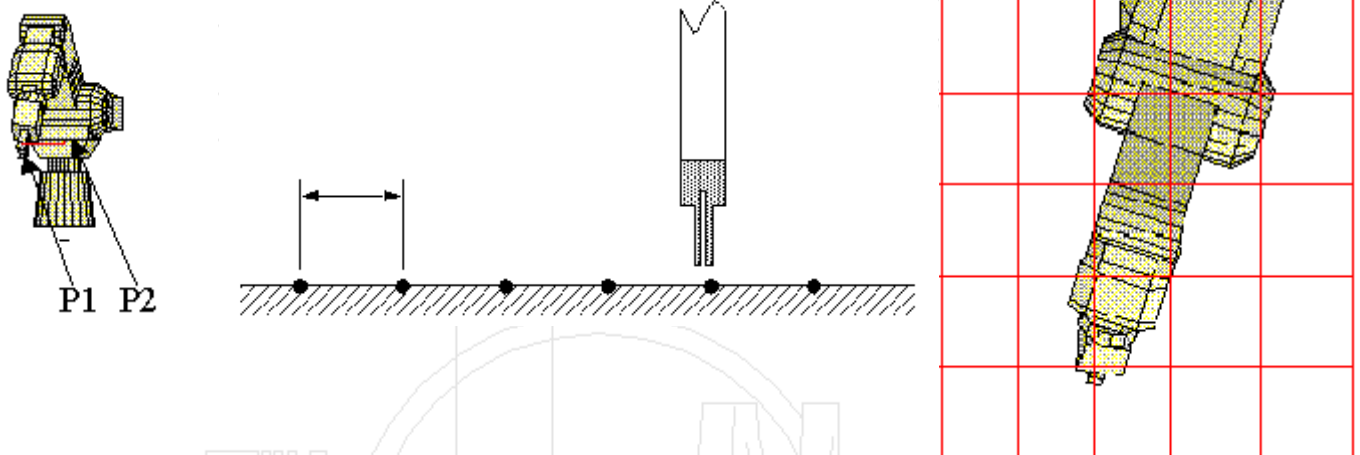
Precisión de los movimientos

La precisión de movimiento en un robot industrial depende de tres factores:

- resolución espacial
- exactitud
- repetibilidad

La **resolución espacial** se define como el incremento más pequeño de movimiento en que el robot puede dividir su volumen de trabajo.

Para explicar con mayor precisión el término resolución espacial tomemos el siguiente ejemplo:



En el dibujo anterior supongamos que utilizando el *teach pendant* movemos el robot de P1 al P2. P2-P1 representa el menor incremento con el que se puede mover el robot a partir de P1. Si vemos estos incrementos en un plano se vería como una cuadrícula. En cada intersección de líneas se encuentra un punto "direccionable", es decir un punto que puede ser alcanzado por el robot. De esta forma la resolución espacial puede definirse también como la distancia entre dos puntos adyacentes (en la figura la distancia entre puntos está muy exagerada a efectos de explicar el término). Estos puntos están típicamente separados por un milímetro o menos, dependiendo del tipo de robot.

La resolución espacial depende de dos factores: los **sistemas que controlan la resolución** y las **inexactitudes mecánicas**.

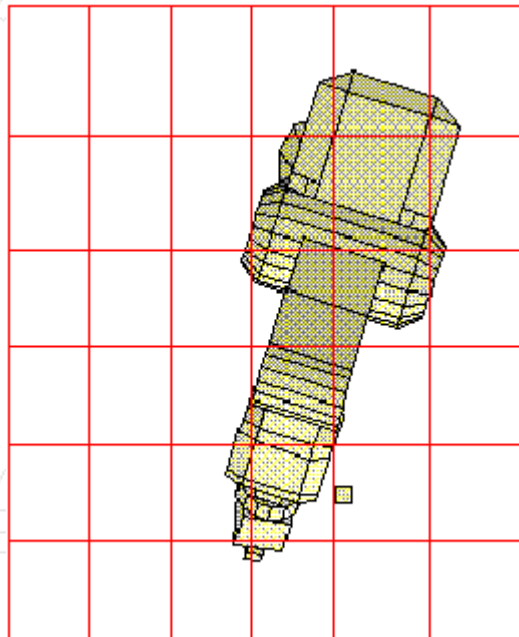
Depende del **control del sistema** porque éste, precisamente, es el medio para controlar todos los incrementos individuales de una articulación. Los controladores dividen el intervalo total de movimiento para una junta particular en incrementos individuales (**resolución de control o de mando**). La habilidad de dividir el rango de la junta en incrementos depende de la capacidad de almacenamiento en la memoria de mando. El número de incrementos separados e identificables para un eje particular es: 2^n . Por ejemplo, en un robot con $n=8$ la resolución de mando puede dividir el

intervalo del movimiento en 256 posiciones discretas. Así, la resolución de mando es: *intervalo de movimiento/256*. Los incrementos casi siempre son uniformes.

Las **inexactitudes mecánicas** se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad de los componentes que conforman las uniones y las articulaciones. Como ejemplos de inexactitudes mecánicas pueden citarse la holgura de los engranajes, las tensiones en las poleas, las fugas de fluidos, etcétera.

- La **exactitud** se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. Mide la distancia entre la posición especificada, y la posición real del actuador terminal del robot. Mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la capacidad del control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo.

En el siguiente dibujo, si quisiéramos mover el robot exactamente al punto donde se encuentra la pieza de trabajo, el robot solamente podría acercarse al objeto posicionándose en el punto direccionable más próximo. En otras palabras, no podría colocarse exactamente en la posición requerida.

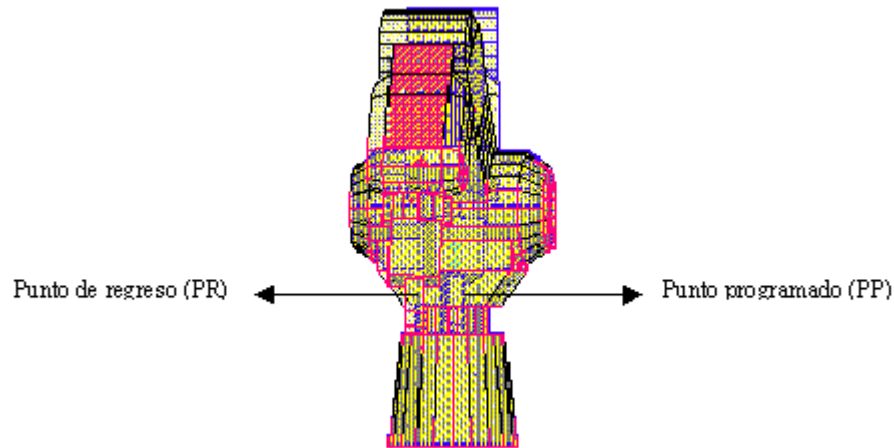


Un robot presenta una mayor exactitud cuando su brazo opera cerca de la base. A medida que el brazo se aleja de la base, la exactitud se irá haciendo menor. Esto se debe a que las inexactitudes mecánicas se incrementan al ser extendido el brazo. Otro factor que afecta a la exactitud es el peso de la carga; las cargas más pesadas reducen la exactitud (al incrementar las inexactitudes mecánicas). El peso de la carga también afecta la velocidad de los movimientos del brazo y la resistencia mecánica.

Si las inexactitudes mecánicas son despreciables la $\text{Exactitud} = \text{resolución de mando}/2$

- La **repetibilidad**, se refiere a la capacidad del robot de regresar al punto programado las veces que sean necesarias. Esta magnitud establece el grado de exactitud en la

repetición de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

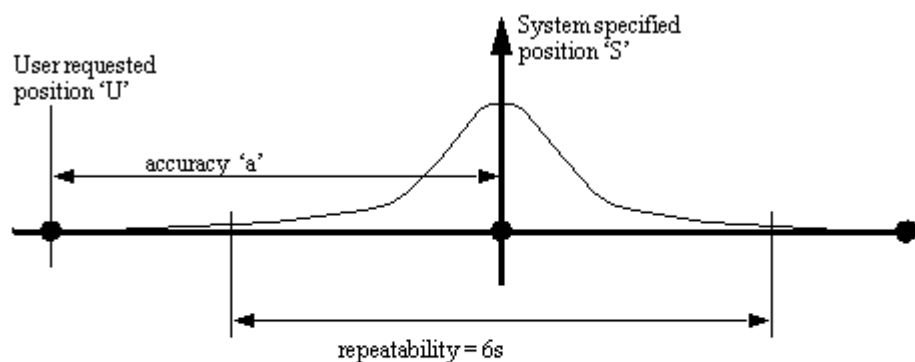


En el dibujo anterior al robot se le indicó mediante un comando de programación que regresara al punto **PP** (punto programado). El robot se puede colocar en el punto de regreso (**PR**) o en otro punto de regreso que tenga la misma distancia hacia **PP**. En el dibujo la diferencia entre los puntos **PP** y **PR** está muy exagerada. Dependiendo del trabajo que se deba realizar, la precisión en la repetibilidad de los movimientos es mayor o menor. Así por ejemplo, en labores de ensamblaje de piezas, dicha característica ha de ser menor a ± 0.1 mm. En soldadura, pintura y manipulación de piezas, la precisión en la repetibilidad esta comprendida entre 1 y 3 mm y en las operaciones de mecanizado, la precisión ha de ser menor de 1mm.

La repetibilidad de punto es a menudo más pequeña que la exactitud.

□ **Comentarios:**

- Los errores al azar (fricción, torcimiento estructural, la dilatación térmica, ...), que aumentan conforme el robot opera e impiden al robot volver a la misma situación exacta, pueden asociarse a una distribución de probabilidad sobre cada punto.

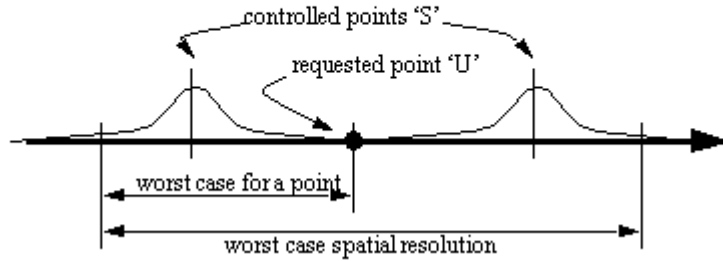


$$a = \frac{\text{control resolution}}{2}$$

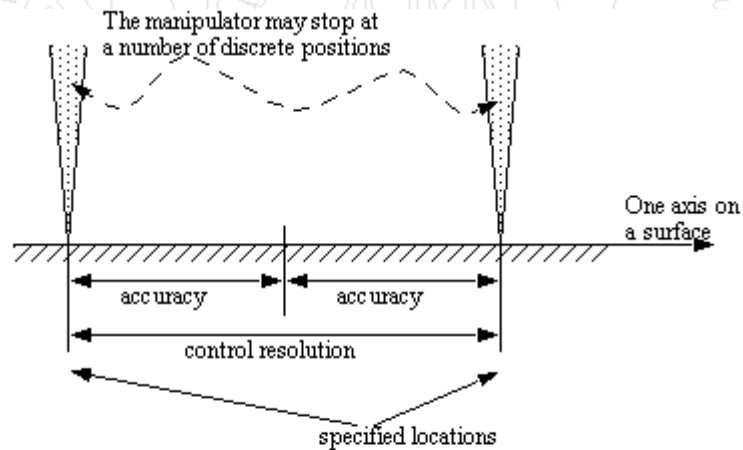
$$e_{max} = a + \text{modeling error} + 3s$$

If the distribution is normal, the limits for repeatability are typically chosen as ± 3 standard deviations 's'.

We can look at distributions for each specified position for the robot end effector in relationship to other point distributions. This will give us overall accuracy, and spatial resolution.

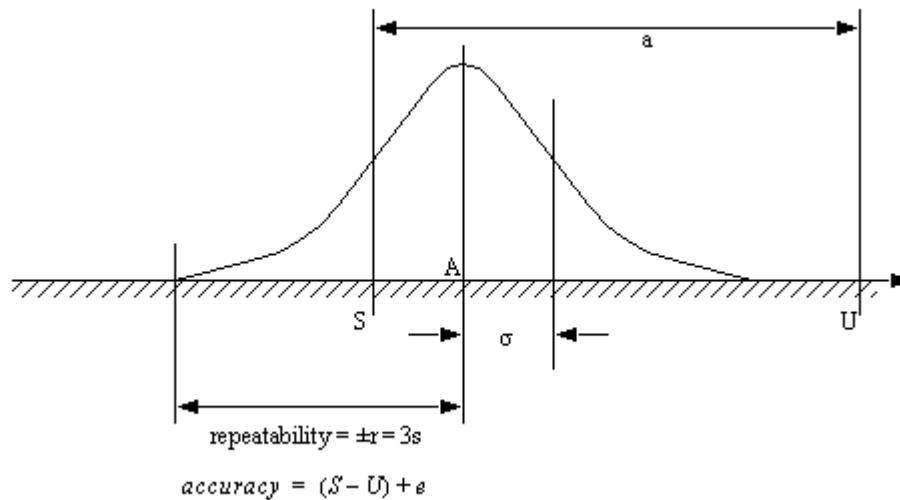


- En una situación mecánica perfecta, la exactitud y la resolución del mando se determinarían como a continuación:



In an ideal situation the manipulator would stop at the specified locations. Here the accuracy would be half of the control resolution. The control resolution would be the smallest divisions that the workspace could be divided into (often by the resolution of digital components).

- Puntos significativos para la determinación de la precisión:



El peso, en kilogramos, que puede transportar la garra del manipulador recibe el nombre de capacidad de carga. A veces, este dato lo proporcionan los fabricantes, incluyendo el peso de la propia garra.

En modelos de robots industriales, la capacidad de carga de la garra, puede oscilar de entre 205kg. y 0.9Kg. La capacidad de carga es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot, según la tarea a la que se destine. En soldadura y mecanizado es común precisar capacidades de carga superiores a los 50kg.

Velocidad

Se refiere a la velocidad máxima alcanzable por el [TCP](#) o por las articulaciones. En muchas ocasiones, una velocidad de trabajo elevada, aumenta extraordinariamente el rendimiento del robot, por lo que esta magnitud se valora considerablemente en la elección del mismo.

En tareas de soldadura y manipulación de piezas es muy aconsejable que la velocidad de trabajo sea alta. En pintura, mecanizado y ensamblaje, la velocidad debe ser media e incluso baja.

Tipo de actuadores

Los elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo oleohidráulico, neumático o eléctrico.

Los actuadores de tipo oleohidráulico se destinan a tareas que requieren una gran potencia y grandes capacidades de carga. Dado el tipo de energía que emplean, se construyen con mecánica de precisión y su coste es elevado. Los robots hidráulicos se diseñan formando un conjunto compacto la central hidráulica, la cabina electrónica de control y el brazo del manipulador.

La energía neumática dota a sus actuadores de una gran velocidad de respuesta junto a un bajo coste, pero su empleo está siendo sustituido por elementos eléctricos.

Los motores eléctricos, que cubren la gama de media y baja potencia, acaparan el campo de la Robótica, por su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.

Programabilidad

La inclusión del controlador de tipo microelectrónica en los robots industriales, permite la programación del robot de muy diversas formas.

En general, los modernos sistemas de robots admiten la programación manual, mediante un modulo de programación.

Las programaciones gestual y textual, controlan diversos aspectos del funcionamiento del manipulador:

- Control de la velocidad y la aceleración.
- Saltos de programa condicionales.
- Temporizaciones y pausas.

- Edición, modificación, depuración y ampliación de programas.
- Funciones de seguridad.
- Funciones de sincronización con otras máquinas.
- Uso de lenguajes específicos de Robótica.

Tipos de configuraciones morfológicas

La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio y que se citan a continuación: cartesianas, cilíndricas, esféricas, angulares. Así, el **brazo del manipulador** puede presentar cuatro configuraciones clásicas:

- [cartesiana](#)
- [cilíndrica](#)
- [esférica](#)
- [de brazo articulado](#),

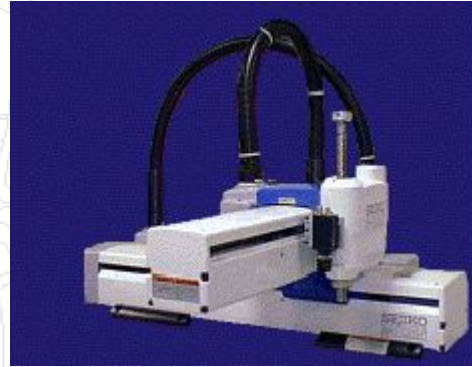
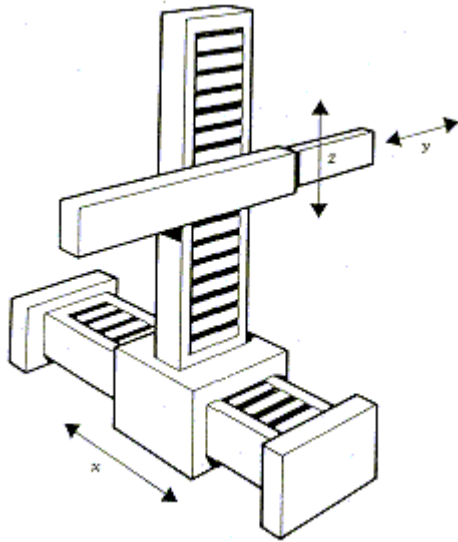
y una no clásica:

- [SCARA](#) (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*).

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Las combinaciones más frecuentes son con tres articulaciones, que son las más importantes a la hora de posicionar su extremo en un punto en el espacio. A continuación se presentan las características principales de las configuraciones del brazo manipulador.

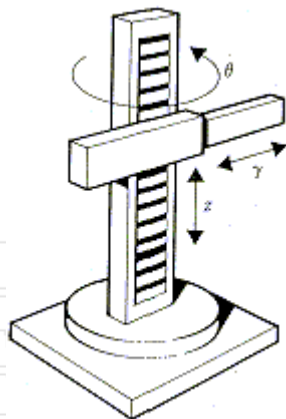
Cartesiana / Rectilínea -El posicionando se hace en el espacio de trabajo con las articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. Posee tres movimientos lineales, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z.

- Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales. Interpolación, en este caso, significa el tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro. A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación.

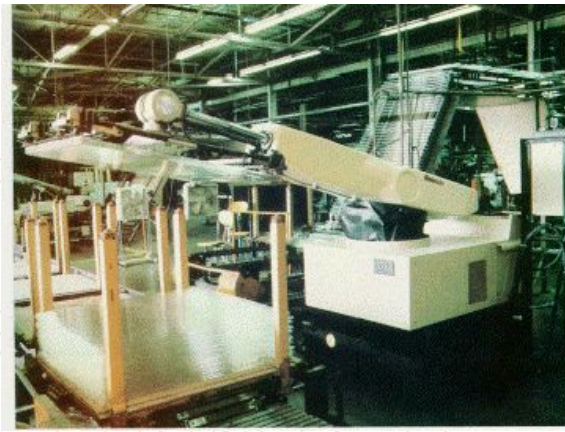
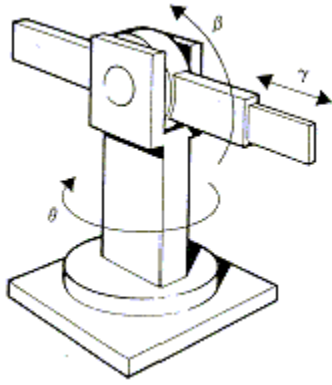


Cilíndrica - El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad.

Este robot está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación. La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional.

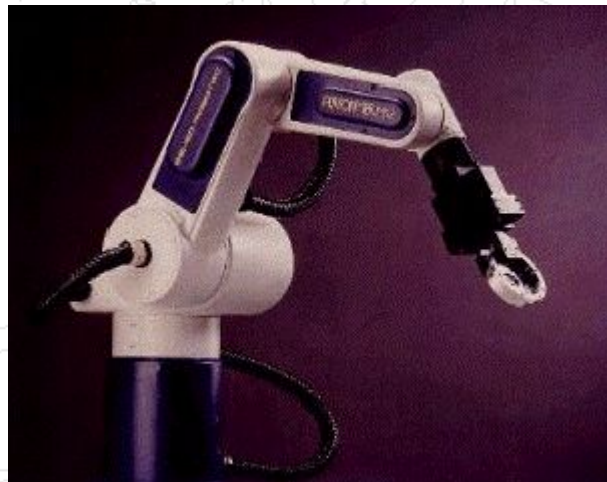
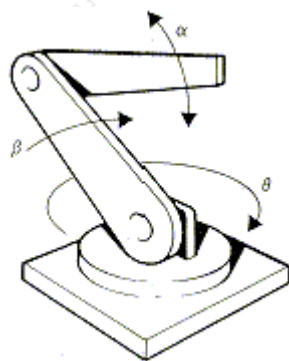


Esférica / Polar - Dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano a un poco de distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal. Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción.



de Brazo articulado / Articulación esférica / Articulación coordinada / Rotación / Angular

El robot usa 3 juntas de rotación para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo, la muñeca. Presenta una articulación con movimiento rotacional y dos angulares. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.



SCARA - Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot de configuración **SCARA** también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación).

