



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**ROBOTICA INDUSTRIAL**

**1.- INTRODUCCION**

**ANTECEDENTES, HISTORIA Y TERMINOLOGIA.**

**M. I. LEOPOLDO CONZALEZ CONZALEZ.  
Centro de Diseño y Manufactura.  
1 9 9 4.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ROBOTICA INDUSTRIAL**

**I.- INTRODUCCION**

**ANTECEDENTES, HISTORIA Y TERMINOLOGIA**

M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

**Unimation Inc.**

**Diseñó y fabricó el Primer Robot Soldador por Puntos**



**En 1968 Primer Multiorden de Robots en General Motors**



**En 1969 Tiene instalados 26 Robots para ensamblar la carrocería de un auto.**



**En 1972 Se instala en Italia la Primera Línea de Soldadura por Puntos para Fiat.**



**Memorias Electrónicas y las computadoras digitales reemplazan el control mecánico.  
(se introduce la Trayectoria Continua)**



**En 1972 Kawasaki, empresa licenciada por Unimation Inc. en Japón,  
instala una línea en Nissan Motors.**



**En 1980 Integración de sensores, procesadores y memorias electrónicas.**

**Desde 1960 los científicos han estado trabajando para introducir la Inteligencia Artificial.**

**M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994**

## 1ª y 2ª Generación de Robots tienen la capacidad de:

- Presentar flexibilidad.
- Capacidad de reprogramarse.
- Trabajar sin fatiga.
- Presentar buena Resistencia.

La diferencia entre la 1ª y 2ª Generación de Robots son las

Velocidades de Respuesta.

## 3ª Generación

Está en gestación y estos robots serán capaces de:

*sentir y reaccionar  
ante el Ambiente Externo*

M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

**ETAPAS DE LA MANUFACTURA**

**Mecanización** → palanca  
rueda  
eje  
polea  
tornillo  
cuña

- Amplificación de la fuerza  
- Conversión de la energía

(A) →

(A) → **Revolución Industrial** → *Evolución de la Mecanización, pero se continuaba:*

- Alimentando
- Guiando
- Corrigiendo

(B) →

(B) → **Revolución Tecnológica** → (C) →

**Control Automático**

*Es un control que actúa solo, sin intervención humana.*

**Los Sistemas de Control Automático Industrial NO podrían funcionar si dependieran de operadores humanos**

- Tiempo de reacción: 0.2 seg.
- Tendencia al aburrimiento y a la distracción.

(C) → **Automatización**

*Todo se deja "en manos de las máquinas".*

## Control Automático

- Basado en Eventos
- Basado en Tiempos
- Control de Variables Físicas

Ejemplo de un Control Automático Basado en Eventos.

Operación: Perforación de una placa.

Secuencia :

- 1) Se empuja la pieza a su posición.
- 2) La pieza se sujeta.
- 3) La pieza se perfora.
- 4) Se suelta la pieza del sujetador.
- 5) La pieza se sujeta de la máquina.

Sencilla, pero repetitiva en exceso.



El operador se aburre y su rendimiento deja de ser satisfactorio.



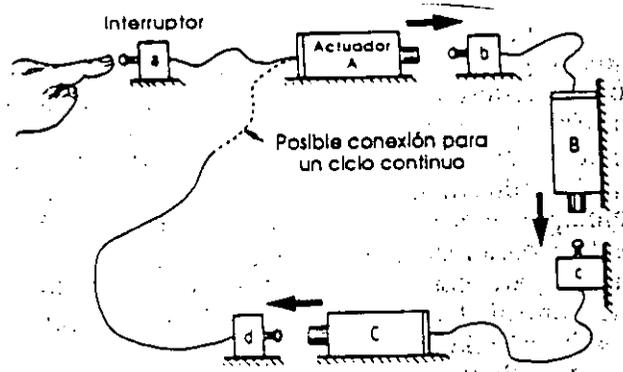
Sin embargo, como existe un Programa de Eventos definido con claridad,



Es fácil convertir esta actividad en un sistema automático.

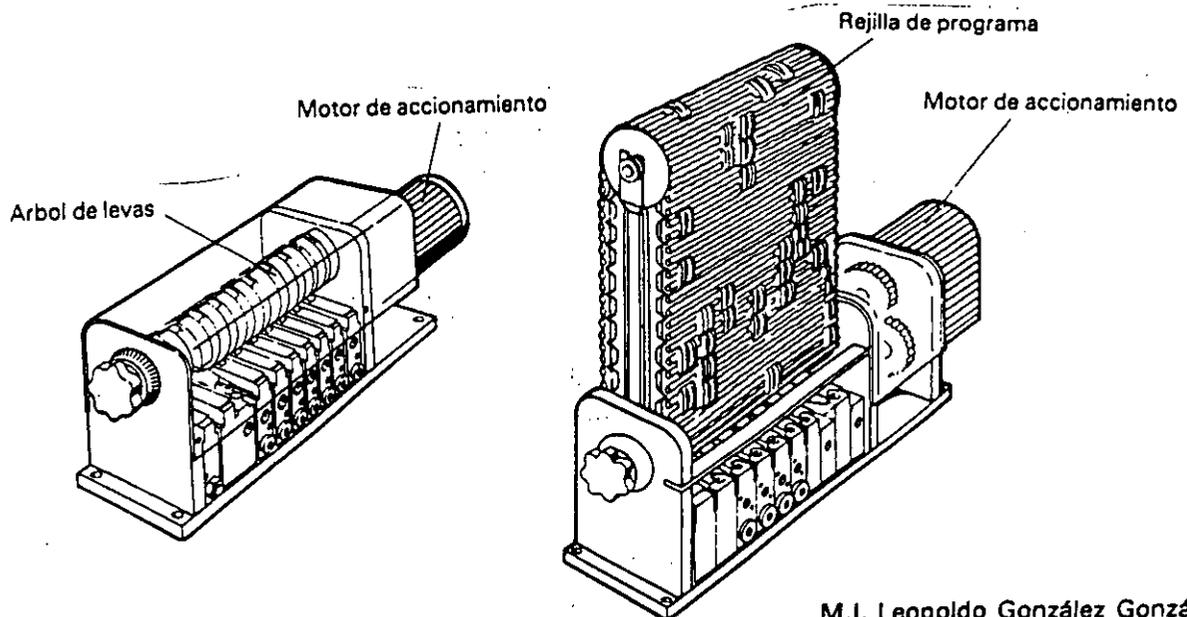
## CONTROL BASADO EN EVENTOS

Utilizan la terminación de un evento como señal para iniciar el siguiente.



## CONTROL BASADO EN TIEMPO

Es el control que funciona con base en una programación de tiempos para realizar un proceso.

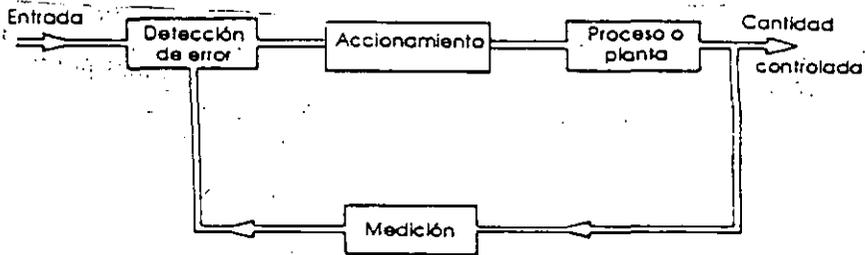


M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

**CONTROL DE VARIABLES FÍSICAS**

▽  
Velocidad  
Intensidad de luz  
Temperatura

Control {  
Malla Abierta  
Malla Cerrada



Control Automático {  
Arbol de levas                      baja programabilidad  
tableros de conexiones            ▽  
cinta o tarjetas perforadas        alta programabilidad

M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

# AUTOMATIZACIÓN

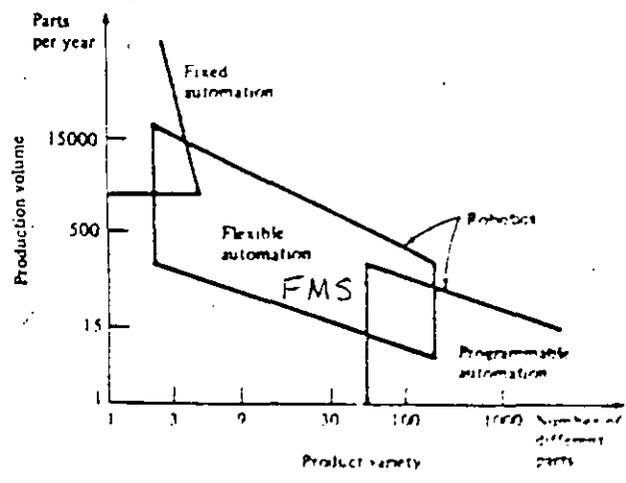
Es el desempeño de operaciones automáticas dirigidas por medio de comandos programados con una medición automática de la acción, retroalimentación y toma de desiciones



La computadora ofrece la forma más flexible de programación.



Los robots ofrecen la forma más flexible de realizar las operaciones.



M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

POLAR

CILÍNDRICA

COORDENADAS CARTESIANAS

BRAZO ARTICULADO

M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

- LOS MOVIMIENTOS INDIVIDUALES DE CADA UNA DE LAS ARTICULACIONES SE DESIGNAN COMO "GRADOS DE LIBERTAD"

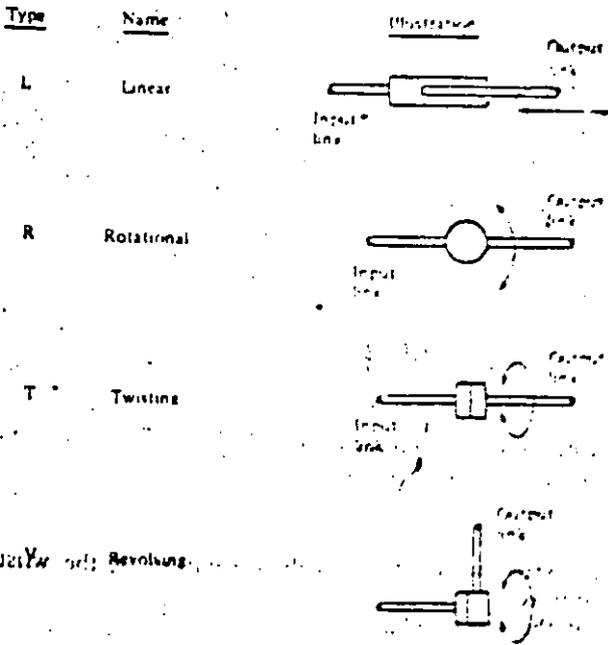


Figure 2-9 Several types of joints used in robots. (a) rotational joint with rotation along an axis perpendicular to arm member axes. (b) rotational joint with twisting action. (c) linear motion joint, usually achieved by a sliding action.

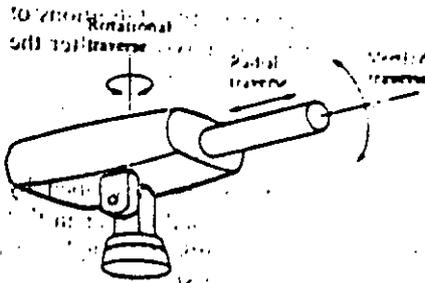


Figure 2-10 Three degrees of freedom associated with arm and body of a power transmission robot.

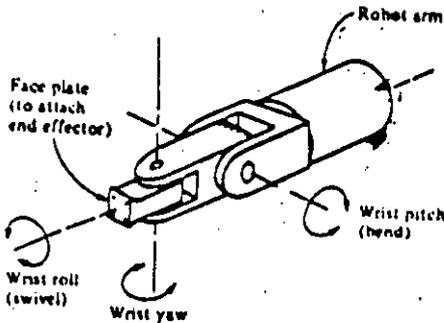


Figure 2-11 Three degrees of freedom associated with the robot wrist.

**CLASIFICACION DE ROBOTS**  
(según sus avances tecnológicos)

**Baja tecnología**

Secuencia de movimientos limitados  
Rangos de velocidad bajos  
Cargas de velocidad bajas  
Pocos grados de libertad  
Controlados por mecanismos No servos  
Baja repetibilidad

**Mediana tecnología**

Son servo-controlados  
Punto a punto  
De trayectoria continua  
6 grados de libertad  
Cargas elevadas  
Ciclos largos de trabajo  
Buena repetibilidad

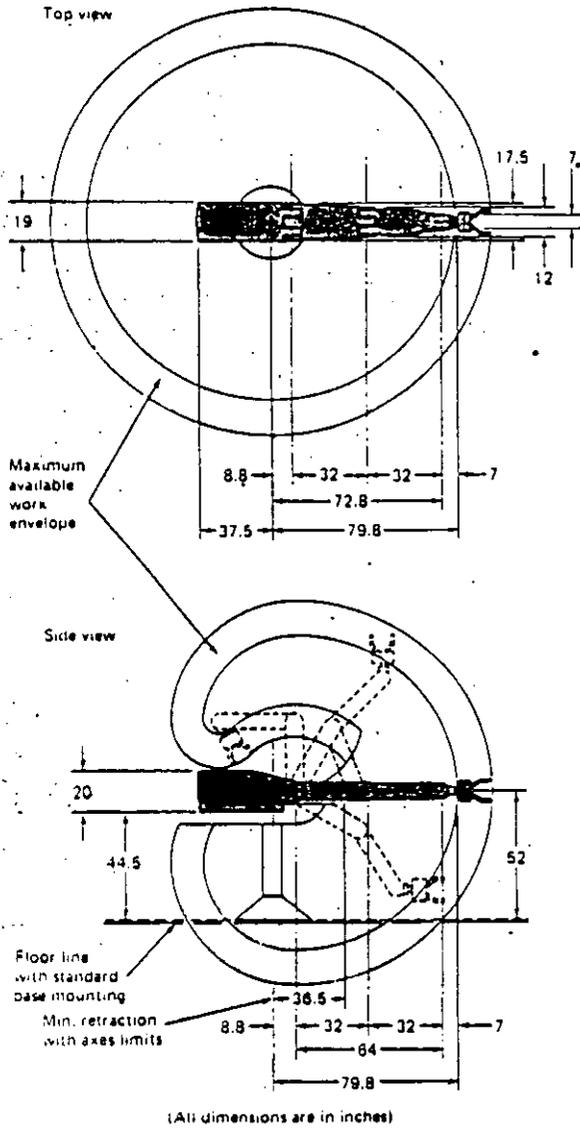


Fig. 15-9 Work envelope of a jointed spherical robot.

- 4. Low-technology type
- 5. Three-axis robot
- 6. Pneumatic robot
- 7. Pick-and-place robot
- 8. Rectangular-coordinate robot
- 9. Limited-sequence robot

There is a problem with using any single classification system. Look again at Fig. 15-11. This robot is also in the nonservo-controlled and low-technology categories. However, it is a jointed spherical arm and has some differences that make it suited to a different range of applications. It may use different actuators (other than pneumatic) and have very different speed and strength characteristics. You are

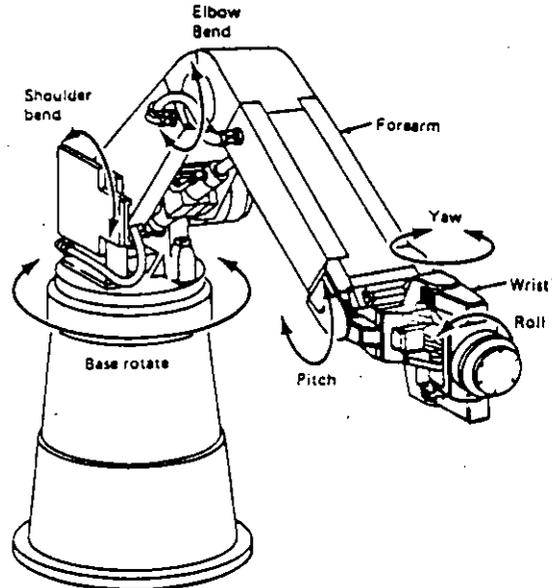


Fig. 15-10 Six-axis jointed spherical robot.

urged to learn the terms and use them in combinations to describe any robot accurately. Another trap to avoid is the assumption that low-technology robots are limited in accuracy and usefulness. Actually, they tend to be the most accurate of all robots. They can be expanded with more degrees of freedom to perform fairly intricate tasks. Figure 15-14 shows the addition of roll, pitch, and yaw to the low-technology robot of Fig. 15-12 and Fig. 15-13. In a sense, the term *low technology* is unfortunate; it can cause people to reach erroneous conclusions about robot capabilities and has even caused some companies to install high-technology robots in applications in which less expensive robots would have done the job faster and better.

The general attributes assigned to low-technology robots include the following:

1. Limited sequence of movements
2. Only the endpoints of travel are controllable
3. A speed range of 80 to 160 cm/s
4. Low cost and low maintenance
5. A 0.03-mm resolution and 0.15-mm repeatability
6. Load capacities from 150 g to 15 kg
7. Controls ranging from electromechanical timers to microprocessors
8. Usually 2 to 4 degrees of freedom
9. Nonservo-controlled
10. Short cycle time (typically 30/min)
11. Used in parts transfer, assembly, loading, packaging, inspection, and automatic testing

Medium- and high-technology robots are servo-controlled. *Servo control* can be divided into two types: *point-to-point* and *continuous path*. *Point-to-*

point servos move from one work envelope position to the next in a straight-line segment. They exhibit jerky motions; however, more than one axis can be activated at a time to alleviate this somewhat. Continuous path servos produce true curves as the work envelope is traversed. They are useful in applications such as spray painting and welding. They require more memory to store all the positions needed to follow a smooth path.

The general attributes assigned to medium-technology robots include the following:

1. Point-to-point servo control
2. Up to 6 degrees of freedom
3. Payloads up to 70 kg
4. Longer cycle time than that of low-technology types.
5. Less accurate than low-technology types
6. Electrohydraulic actuators typically used
7. Electronic controls (typically microprocessor-based)
8. Walk-through programming
9. Medium cost and maintenance requirements

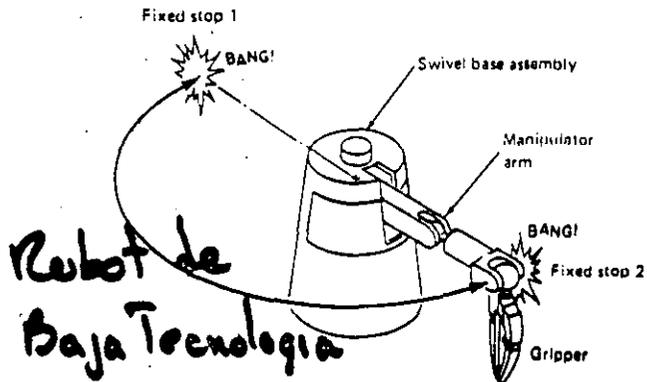


Fig. 15-11 Nonservo-controlled "bang-bang" robot.

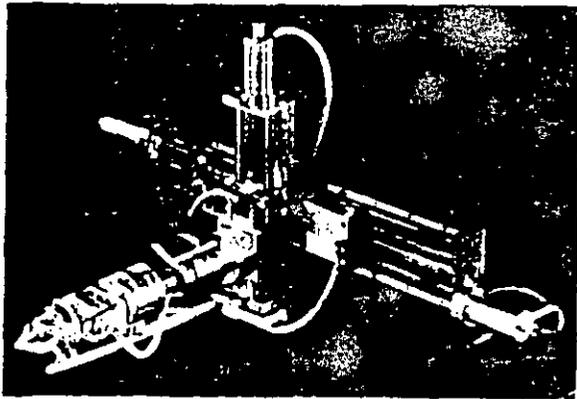
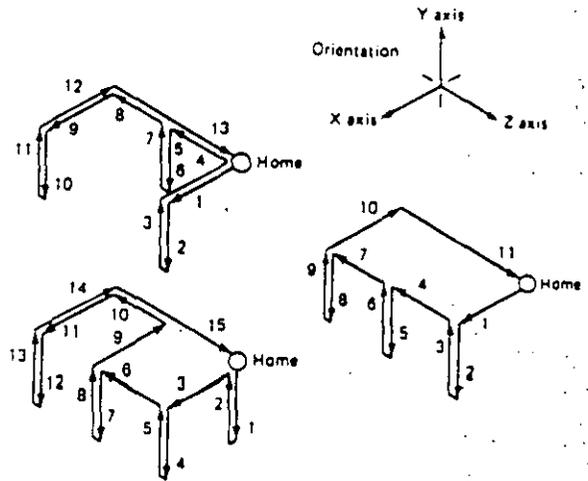


Fig. 15-12 Nonservo-controlled robot. (Courtesy of Mack Corporation)



Typical motion patterns

Fig. 15-13 Robot parts and typical motion patterns. (Mack Corporation)

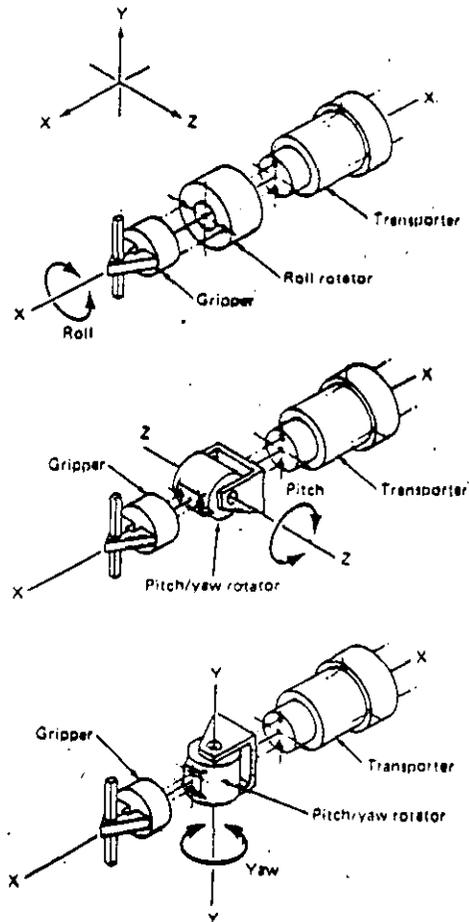
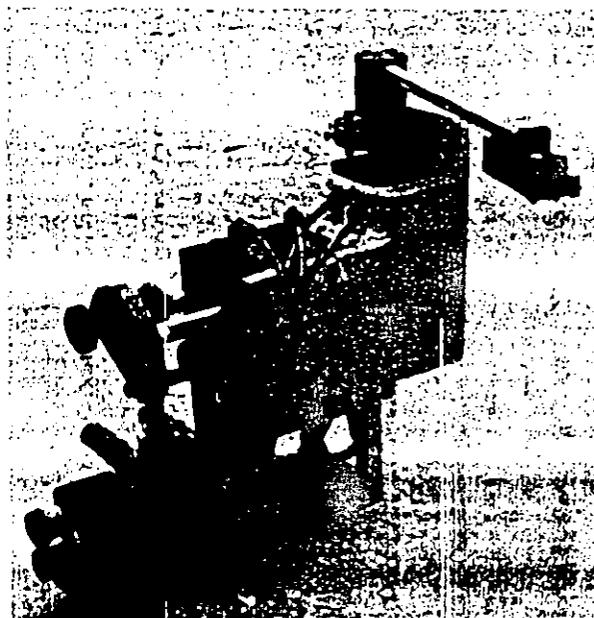
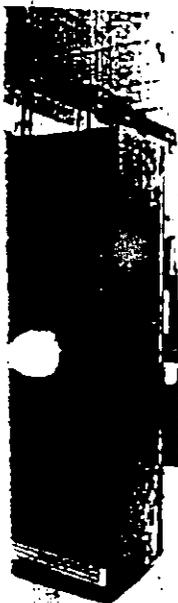


Fig. 15-14 Adding roll, pitch, and yaw.

**MOBOT**

105



ansferring.  
vice using.  
pecial low

Figure 23. SEIKO Pick and Place Robot. This pick and place non servo robot is used for part transfer or small parts assembly.

- **Entorno de trabajo:** Volúmen al que puede acceder el elemento terminal.  
(Espacio Tridimensional).
- **Fuerza:** Carga máxima de trabajo.  
  
Valor típico 10 kg 22 [lb].
- **Precisión:** Qué tan cerca esta el elemento terminal de la posición especificada por el ordenador.
- **Repetibilidad:** Cuánto varía la posición del elemento terminal cada vez que vuelve al mismo punto del ciclo.  
(Milésimas de milímetro).

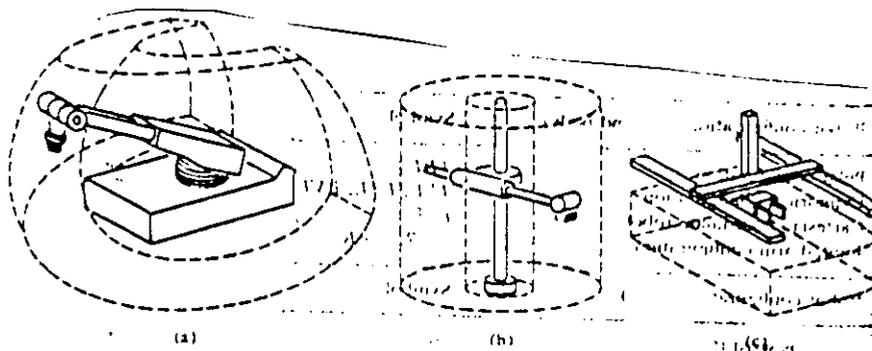


Figure 2-12 Work volumes for various robot anatomies: (a) polar, (b) cylindrical, and (c) cartesian.  
(Reprinted from Reference [7].)

## TIPOS DE CONSTRUCCION

Los miembros de los robots, a diferencia de sus equivalentes humanos y animales, varían no sólo en tamaño y proporción, sino también en su construcción. Cuando se habla de robots la mayoría de la gente piensa siempre en el diseño del brazo articulado —quizá porque es la que más se parece a nuestra anatomía—, pero en la ilustración de la página de la derecha se muestra que éste es tan sólo uno de los cuatro diseños más populares.

El motivo para que exista tal variedad es en parte histórico y en parte funcional. Si se estuviera desarrollando un robot dedicado únicamente a coger componentes de un sistema de estanterías, la construcción cartesiana sería la más adecuada. Si el robot estuviera destinado al servicio de varias máquinas herramienta, la construcción más económica sería la de un círculo, con un robot polar o cilíndrico en el centro. Sin embargo, si el robot debe llegar a espacios difíciles —como a menudo suele suceder con la pintura por spray o la soldadura de puntos— el diseño con brazo articulado ofrece muchas ventajas. Cada fabricante de robots industriales prefiere un tipo, en función del entorno y de las aplicaciones en las que debe especializarse.

Aunque la articulación pivotante está copiada de la naturaleza, la extensión telescópica que forma la base de tres de los diseños no tiene equivalente natural. Aunque la naturaleza proporciona algunos modelos excelentes de construcción, potencia motriz y sensores, el ingeniero de robots nunca debe caer en la trampa de pensar que son éstas las únicas soluciones.

### Especificaciones

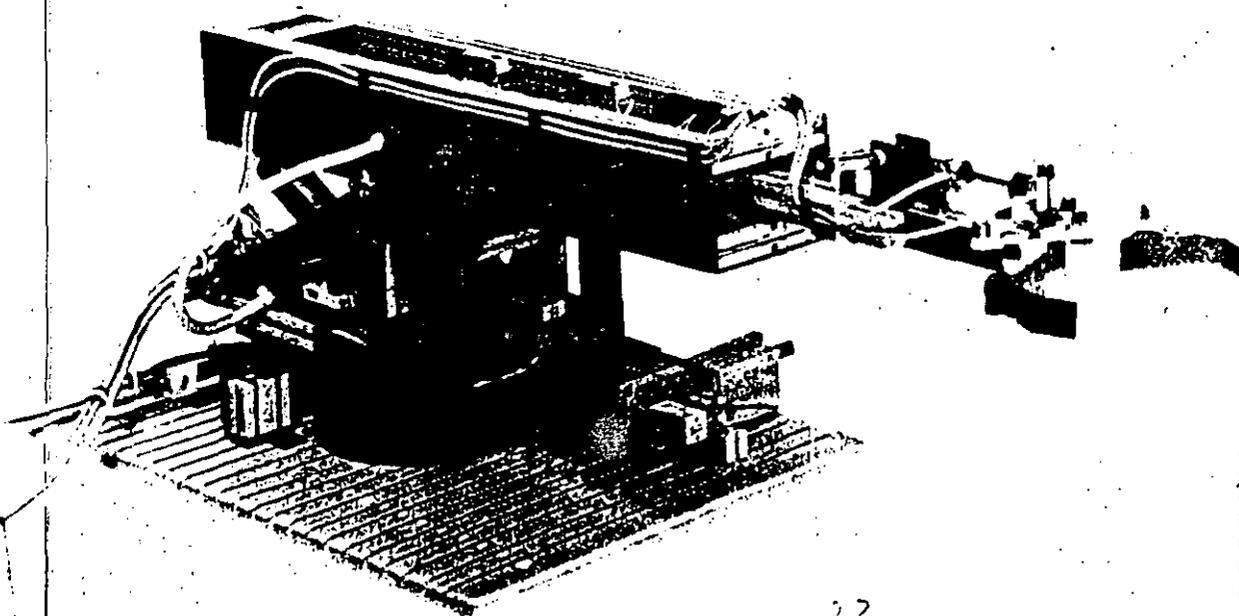
Además de su método de construcción, las especificaciones de un robot industrial deberán incluir su entorno de trabajo, su fuerza (a veces llamada su

carga máxima), su precisión y repetibilidad. El entorno de trabajo es el volumen —el espacio tridimensional— que puede ser recorrido por el efector terminal del robot. La forma de este entorno puede ser bastante irregular, ya que cada articulación y sección móvil tendrá limitaciones de movimiento, y será bastante distinto para cada tipo de construcción. Muchas veces será más económico para un fabricante reorganizar sus piezas de trabajo para que se adapten al entorno de trabajo de un robot estándar, en lugar de diseñar un robot especial.

A pesar de su tamaño comparativamente grande, muchos brazos de robot son sorprendentemente débiles y no son adversarios para un campeonato de pulso con el hombre, lo que no es desaconsejable con respecto a la seguridad. Es cierto que algunos robots pueden levantar media tonelada, pero otros muchos tienen una carga máxima de 10 kilos (22 libras) como valor típico. Al detallar las especificaciones de un brazo de robot, el fabricante debe especificar el peor de los casos; al igual que en el brazo humano, la capacidad de levantar un peso, disminuye a medida que el brazo se extiende.

Además, los brazos de robots son notablemente ineficientes. La mayoría son muy pesados, y gran parte de la potencia motriz se emplea por lo tanto en superar la inercia inherente. Es el momento del propio brazo en movimiento, más que la fuerza útil que pueda producir, lo que necesita tantos procesos de seguridad. El sustituir las estructuras de acero convencionales por materiales más ligeros como fibra de carbón, da mejores resultados, pero aumentan considerablemente el precio.

Cuanto más preciso sea un brazo, más cerca estará el efector terminal de la posición especificada por el ordenador de control. La repetibilidad es una capacidad medible relativa, pero más útil. Si se programa un robot para repetir una secuencia de movimientos, ¿cuánto variará la posición cada vez que vuelva al mismo punto del ciclo? Un robot muy grande quizá pueda repetir el ciclo volviendo a la posición original con un error inferior al milímetro cada vez, mientras que la repetibilidad de un robot de precisión de baja potencia podría medirse en milésimas de milímetro.



Los pequeños brazos de robot pueden seguir cualquiera de los diseños representados a la derecha aunque el sistema polar es el más fácil de implementar. El principal motivo de esto es la distribución de peso. Las partes más pesadas de cualquier robot son los actuadores —las unidades de potencia motriz—. El robot será más eficiente si no tiene que levantar a los actuadores además de la carga y si éstos están lo más cerca posible del centro de rotación. En un diseño polar, los actuadores del brazo pueden estar muy juntos. Para el mismo en el caso de un brazo articulado, serán necesarias una serie de poleas y correas para transferir el movimiento hasta las propias articulaciones.

Estos son los elementos que determinan la velocidad del Robot, la fuerza y su respuesta dinámica.

Sistemas de Transmisión	Hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robots grandes</li> <li>- Alta velocidad y fuerza</li> <li>- Se requiere mas espacio</li> <li>- Se pueden presentar fugas (Suciedad)</li> </ul>
	Eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menos potentes y grandes que los anteriores</li> <li>- Buenos para operaciones de ensamble</li> </ul>
	Neumáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No son tan comunes</li> <li>- Suelen ser pequeños</li> <li>- Bajas capacidades</li> </ul>

Existe una tendencia muy clara hacia la fabricación de Robots Eléctricos.

Velocidad = f (Exactitud, Peso, Distancia).

= 1.7 [m/seg]

DE ACUERDO A SU SISTEMA DE CONTROL, LOS ROBOTS SE PUEDEN CLASIFICAR EN:

Robots de secuencia limitada

Play back con control punto a punto

Play back con control de trayectoria

Robots Inteligentes

### **Robots de Secuencia Limitada**

- No utilizan Servo-Controles para indicar la posición relativa de las articulaciones.
- Utilizan switches o paros mecánicos.
- Todas las articulaciones se mueven a sus posiciones externas.
- La Neumática es muy utilizada en este tipo de robots.
- El control es secuencial.

### **Tipo Play Back**

- El robot se programa enseñándole los movimientos.
- Tienen control tipo Servo (Malla Cerrada).

## **Tipo Punto a Punto**

- Realiza el movimiento alcanzando una serie de puntos que se desean, se le enseñan todos los puntos deseados y los guarda en su memoria.
- No existe el control tipo Servo.
- Se utilizan principalmente como:
  - + Alimentadores de piezas.
  - + Punteadores.

## **Trayectoria Continua**

- El control define una serie de puntos (muy próximos entre sí) para irlos siguiendo.
- El control debe almacenar una gran cantidad de puntos individuales.
- La trayectoria se Servo-controla.
- Se requiere una computadora como elemento de control.

## **Robots Inteligentes**

- Interactúan con el medio ambiente.
- Alteran su ciclo de movimientos programado, dependiendo de lo que ocurre en su volúmen de trabajo.
- Los robots toman decisiones lógicas de acuerdo con la información que obtienen de los sensores.

M.I. Leopoldo González González  
Centro de Diseño y Manufactura  
1994

**PARAMETROS DE UN ROBOT****Precisión**

(alcanzar un punto dentro de su volúmen de trabajo)

**Repetibilidad**

(habilidad del robot para posicionarse en un punto en el espacio que ha sido previamente enseñado al robot).

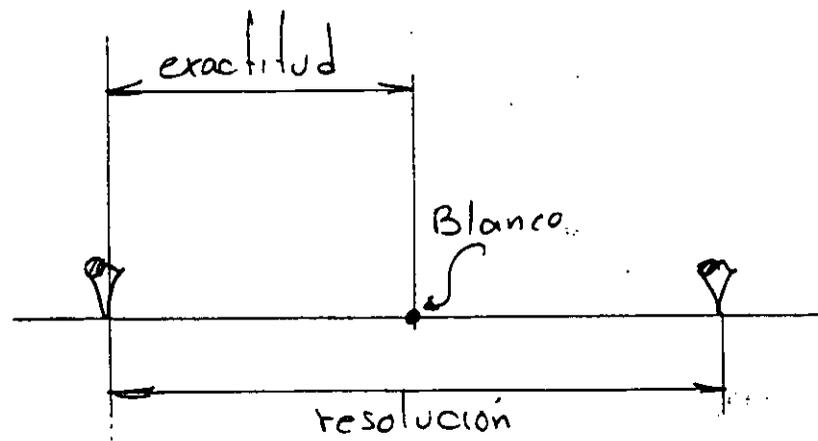
La **Precisión** de un robot está en función de

**Resolución**

(incremento mas pequeño de movimiento)

**Exactitud**

(habilidad para posicionarse en el punto deseado)



## ELEMENTOS DE UN ROBOT

### - Elemento terminal

Este se acopla a la muñeca del robot para realizar una tarea específica.

- + sujetadores de objetos
- + herramientas

### - Controlador (Microprocesador)

### - Sensores

- + Táctiles
  - \* Contacto
  - \* Fuerza
- + De proximidad
  - \* Ópticos
  - \* Acústicos
  - \* Campo eléctrico
- + Visión
  - \* Sencen y digitalizan la imagen
  - \* Procesan y analizan la imagen
  - \* Aplicación

### Uso de los sensores

- Monitoreo de seguridad
- Retroalimentación
- Inspección
- Determinar posición

# PARTES PRINCIPALES DE UN ROBOT INDUSTRIAL

Elemento Motriz

Pueden identificarse cuatro sistemas distintos dentro de un típico robot de trabajo. La primera es la estructura y el diseño mecánico del propio brazo. Después tiene que existir algún medio para hacer que el brazo se mueva. En robótica esto recibe el nombre de potencia motriz, y los aparatos que proporcionan la fuerza y el movimiento se llaman actuadores. El tercer sistema es para proporcionar información al robot, tanto respecto a su posición como respecto a sobre lo que está operando. Esto se consigue mediante sensores. Finalmente, la instalación completa debe ser controlada y coordinada; una tarea para la que el ordenador es el elemento ideal.

Los sistemas son muy interdependientes; los sensores miden alguna magnitud física o algún movimiento y envían una señal eléctrica hacia el ordenador encargado del control. Entonces el ordenador da las instrucciones a los actuadores de cómo moverse y, a su vez, éstos están conectados a la estructura mecánica del brazo.

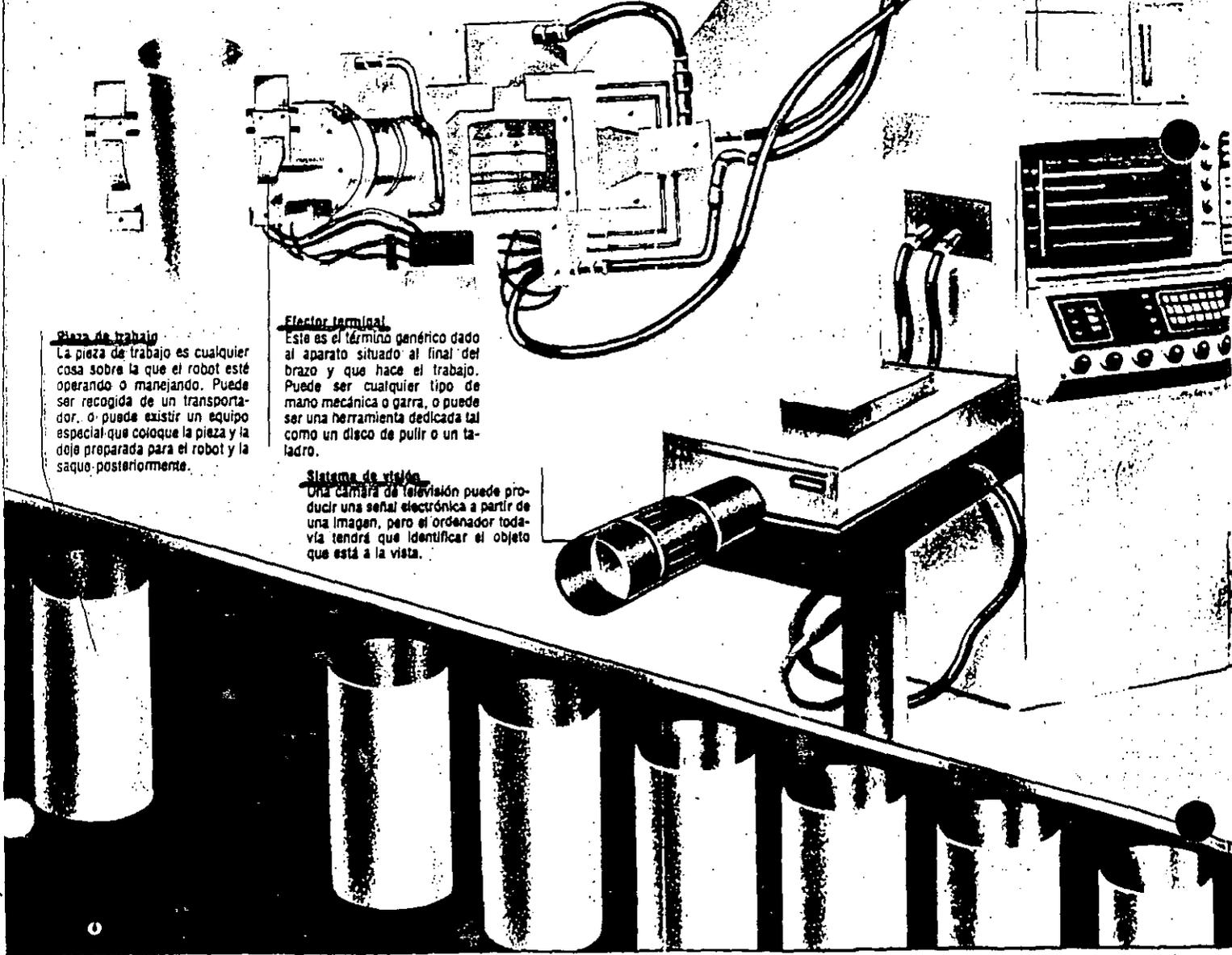
**Construcción.**  
Este robot sigue la construcción de brazo articulado; éste es más o menos análogo a un miembro humano. Sin embargo, existen otros diseños bastante distintos.

**Ordenador de control.**  
La mayoría están basados en diseños de microordenadores estándar, modificados para poderse conectar al sistema del robot. El panel de control posee siempre un botón de emergencia para el paro.

**Pieza de trabajo.**  
La pieza de trabajo es cualquier cosa sobre la que el robot esté operando o manejando. Puede ser recogida de un transportador, o puede existir un equipo especial que coloque la pieza y la deje preparada para el robot y la saque posteriormente.

**Ejecutor terminal.**  
Este es el término genérico dado al aparato situado al final del brazo y que hace el trabajo. Puede ser cualquier tipo de mano mecánica o garra, o puede ser una herramienta dedicada tal como un disco de pulir o un taladro.

**Sistema de visión.**  
Una cámara de televisión puede producir una señal electrónica a partir de una imagen, pero el ordenador todavía tendrá que identificar el objeto que está a la vista.



### Sensores de posición

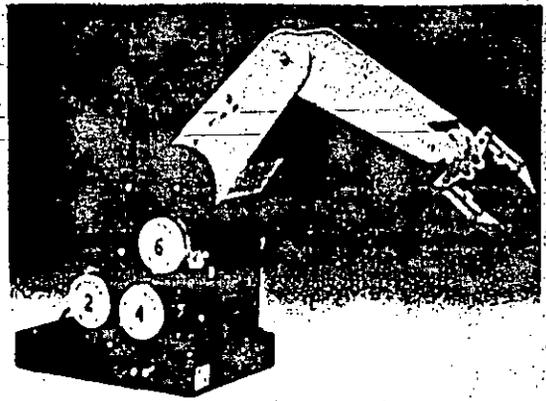
Aunque no tenga sensores externos que simulen el tacto o la vista, cada articulación del brazo poseerá un sensor de posición que le dice al ordenador el ángulo de la articulación. Sin los sensores de posición, aparecerán errores, o más como resultado de que el efector terminal no esté donde el ordenador cree que está.

### Actuadores

Los actuadores proporcionan la potencia motriz para cada sección móvil del robot. Pueden ser eléctricos, hidráulicos o neumáticos. En el caso de un brazo, la potencia será suministrada a los actuadores a través de un grueso cable o de una tubería de presión; mediante cables más pequeños se transmiten las señales de control desde el ordenador hasta cada actuador. Un robot móvil quizás tenga que transportar su propia fuente de potencia con él; generalmente, serán baterías recargables.

### Versión reducida

La mayoría de los principios de funcionamiento de los grandes robots industriales pueden aplicarse igualmente a los pequeños brazos educativos. Un ordenador doméstico sustituye al ordenador de control diseñado específicamente para ello y la construcción se hace sencillamente a escala reducida. Algunos tipos de actuadores no pueden realizarse tan fácilmente a escala reducida, por lo que los experimentadores de robots domésticos tendrán una variedad más limitada de sistemas de potencia motriz. Tan sólo respecto a los sensores existe una marcada diferencia con los robots industriales, los brazos de bajo precio raramente incorporan sensores como algo estándar.

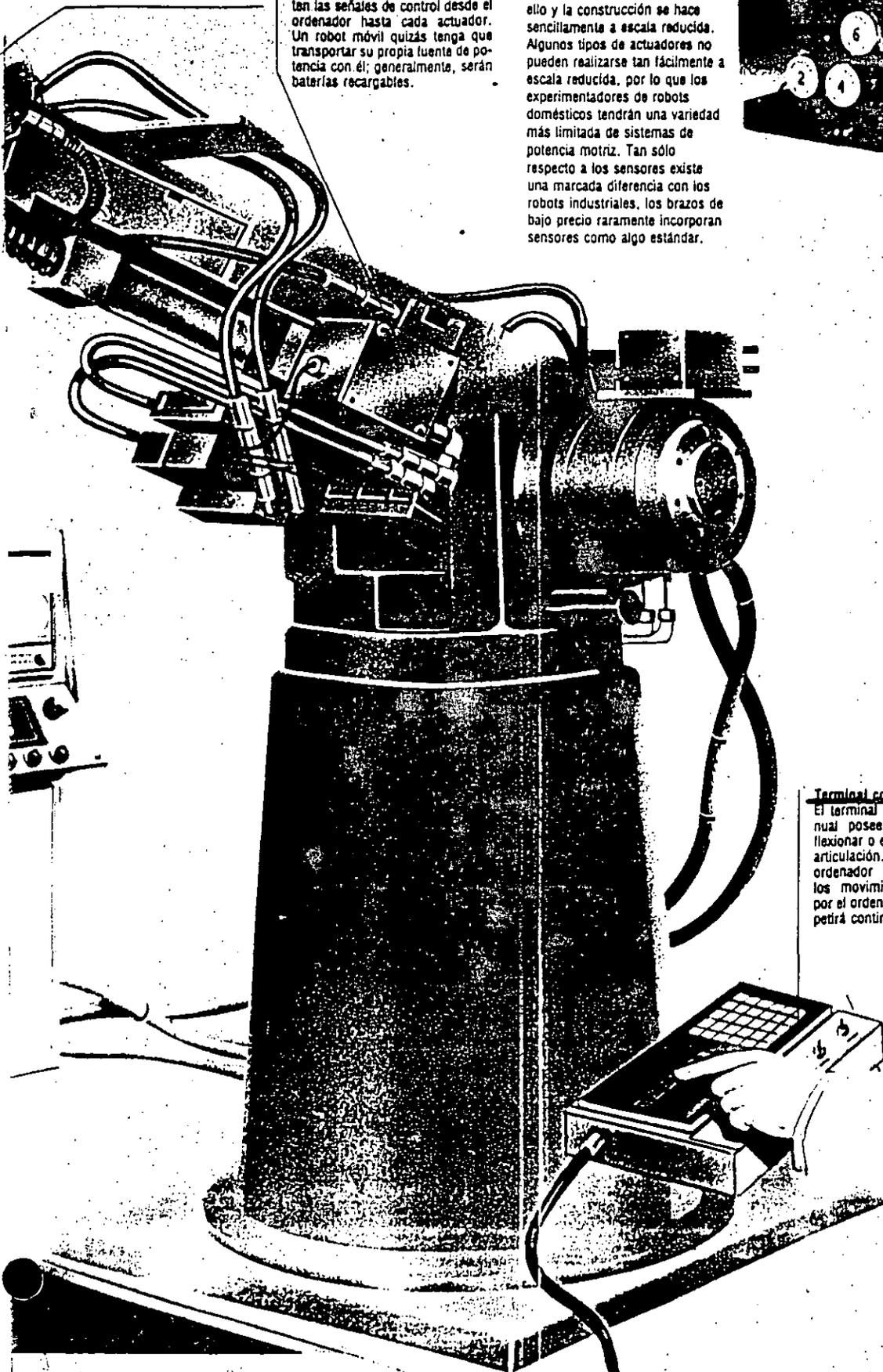


### Programador

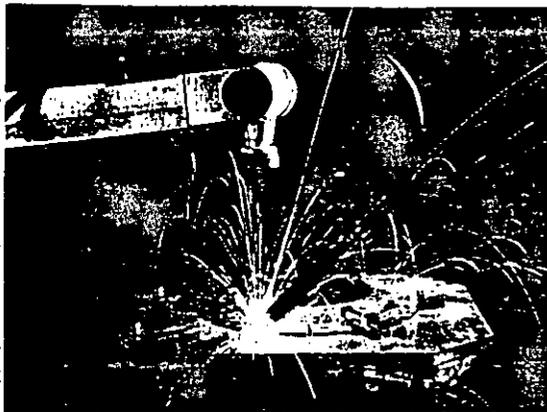
Generalmente se necesita un programador para que instruya al ordenador cada vez que deba aprender una nueva tarea. En el futuro, y especialmente en el diseño y fabricación de nuevos coches, el ordenador utilizado en la oficina de diseño será capaz de programar directamente a los robots de fabricación.

### Terminal colgante

El terminal colgante manual posee teclas para flexionar o extender cada articulación. Entonces el ordenador «aprenderá» los movimientos dados por el ordenador y los repetirá continuamente.



# EFECTORES TERMINALES

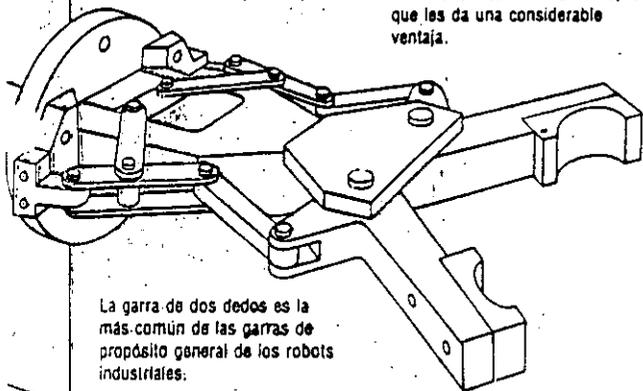


Herramientas especializadas, tales como soldadoras de arco, pueden colocarse directamente en

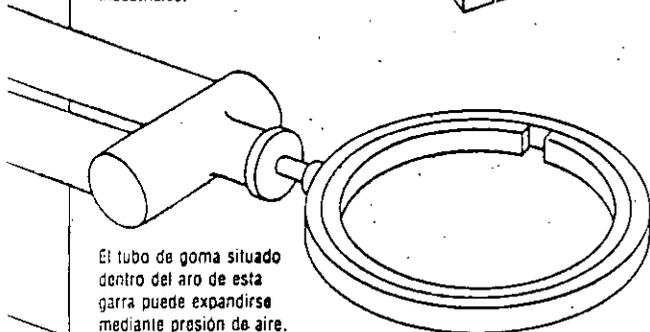
los brazos del robot en lugar de las garras de propósito general.

A continuación se ilustran ejemplos de los efectores terminales que se encuentran en

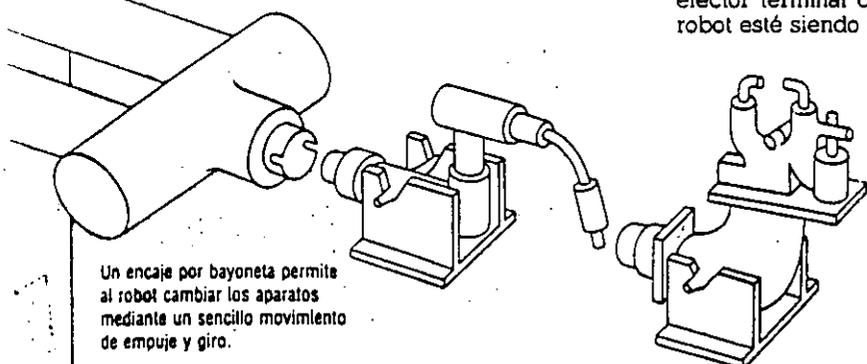
los robots industriales. Algunos robots tienen la posibilidad de seleccionar una herramienta entre varias situadas en un armario, lo que les da una considerable ventaja.



La garra de dos dedos es la más común de las garras de propósito general de los robots industriales.



El tubo de goma situado dentro del aro de esta garra puede expandirse mediante presión de aire.



Un encaje por bayoneta permite al robot cambiar los aparatos mediante un sencillo movimiento de empuje y giro.

Muchos expertos creen que un equivalente electrónico del cerebro humano es un objetivo más alcanzable que una copia mecánica de la mano humana. Las similitudes que existen entre la construcción de un brazo de robot y nuestros propios miembros no son ciertamente evidentes cuando examinamos los efectores terminales.

Los brazos de robot poseen generalmente uno de los siguientes tres tipos de efectores terminales: la «garra» de propósito general; mordazas o garras diseñadas para sujetar un tipo muy específico de objeto, y una herramienta de trabajo. La mayoría de los robots industriales se utilizan para manejar materiales, desde transferir tubos de ensayo entre experimentos, hasta almacenar barriles de cerveza. Estos, y el pequeño número de robots utilizados en trabajos de ensamblaje, poseen mordazas o garras. Los robots que realizan procesos como la pintura por spray o la soldadura por puntos, emplean herramientas específicas colocadas directamente al final del brazo.

La forma más común de la garra de propósito general tiene únicamente dos dedos, de forma parecida a unas pinzas; las que se utilizan para manejar objetos muy delicados se parecen a las pinzas de depilar. Generalmente, las garras tienen dedos rígidos, con cierta forma para que puedan cogerse objetos redondos o cuadrados. Cuando existen tres dedos, pueden ser idénticos y separados uniformemente, o puede existir un pulgar diferenciado, opuesto a los dos dedos. Las manos con más de dos dedos deben diseñarse muy cuidadosamente para que cada dedo ejerza la misma presión sobre el objeto, con independencia de su forma. A veces, esto se consigue incluyendo articulaciones parecidas a los nudillos, con muelles, en cada dedo. Aunque se ha intentado realizar manos de robot con cuatro y cinco dedos, ninguna de estas versiones ha llegado a pasar a la producción comercial.

Algunas garras de propósito general no tienen ningún parecido con la mano, como por ejemplo, los tentáculos que se muestran a la derecha. Otro planteo muy ingenioso utiliza una gran bolsa de limaduras de acero, que se deja caer sobre el objeto, entonces un imán «congela» la bolsa, dejándola convertida en un sólido, con lo que la bolsa toma la forma del objeto y lo agarra fuertemente. Cuando se desconecta el imán, la bolsa puede utilizarse de nuevo sobre otra forma.

Sin embargo, la tecnología actual no puede compararse con la fuerza, ligereza, flexibilidad y control de la mano humana. ¿Plantea esto una desventaja real con respecto al robot? Un aparato diseñado específicamente para coger latas de conserva realizará mejor esta tarea que la mano humana. Y aunque ningún robot pueda superar la adaptabilidad de la mano, muchos tienen la posibilidad de cambiar el efector terminal completamente, ya sea cuando el robot esté siendo reprogramado para una nueva tarea o, en algunos casos, mientras está funcionando. Un campo en el que la mano sigue sin ser superada es en las tareas de ensamblaje, donde la realimentación táctil es tan importante como la destreza. Los diseñadores de robots han descubierto que el dar cierta elasticidad a la muñeca mejora su actuación, por ejemplo cuando se in-



Esta garra de robot de propósito general (arriba), desarrollada por Hitachi, incorpora sensores táctiles que le permiten manejar objetos muy delicados, incluyendo un huevo crudo. Los sensores indican el tamaño, forma y presión requerida para coger el objeto. Se dice que tiene una sensibilidad que se acerca a la de la mano humana (fotografía por cortesía de Hitachi Europe GmbH).

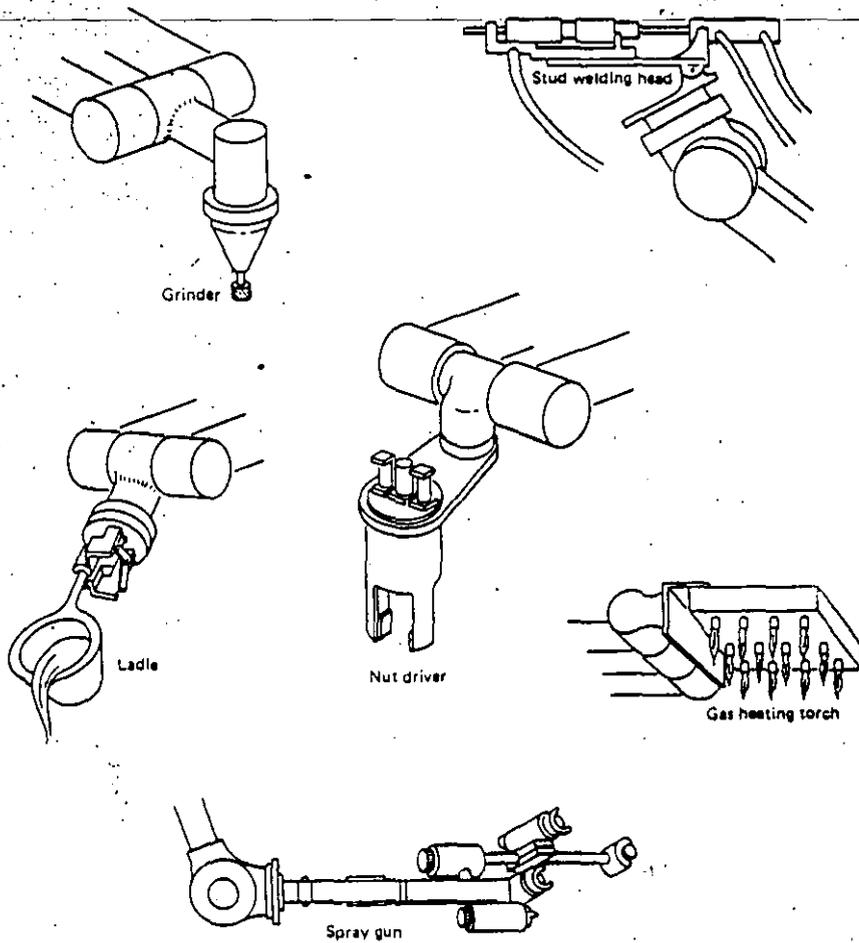


Fig. 15-15 Robot end effectors.

*Walk-through programming* involves a human operator leading the robot through the desired routine step by step. It will be covered in more detail in a later section.

*High-technology robots* are the most complicated. Their attributes include the following:

1. Continuous path servo control
2. 6 to 10 degrees of freedom
3. Microprocessor and minicomputer controls
4. Expensive and increased maintenance requirements
5. Most flexibility of all robots
6. Advanced programming, including high-level languages
7. Built-in editing and diagnostic software packages
8. Mass storage devices (disk and tape)
9. Looping, subroutine, interrupt, and branching capabilities
10. Control of some other machines around them

11. Sensor inputs such as vision, proximity, touch, and sound
12. Applications include sorting, inspection, welding, painting, and assembly

*Robot actuators* include pneumatic cylinders or motors, hydraulic cylinders or motors, and electric motors. The *pneumatic actuators* are low in cost, require little maintenance, and are well suited for high-speed operations with light payloads. *Hydraulic actuators* are more costly, require more maintenance, and are best suited to heavy loads. *Electric motors* are the easiest to control, have moderate cost and maintenance requirements, and lend themselves to applications that do not require high speed or heavy loads.

The robot arm may be called a *manipulator*. The part that handles the work piece or holds the tool is often referred to as an *end effector*. Figure 15-15 shows some examples of end effectors. These may be changed automatically, as shown in Fig. 15-16. The end effectors are stored in a tool holder within

## Lista de factores en la selección y diseño de grippers (tenazas)

Factor	Consideración
Parte a manejar	Peso y tamaño Forma Cambios en la forma durante el proceso Tolerancias en el tamaño Condición de la superficie, protección de las superficies delicadas
Método de acción	Grasping mecánico Taza de vacío Imán Otros métodos (adhesivos, scoops, etc.)
Potencia y transmisión de señal.	Neumática Eléctrica Hidráulica Mecánica
Gripper mecánico	Peso del objeto Método de agarre (constricción física o fricción) Coeficiente de fricción entre dedos y objetos Velocidad y aceleración durante el ciclo de movimiento
Problemas de posicionamiento	Longitud de los dedos Precisión y repetibilidad inherentes del robot. Tolerancias en el tamaño

<p>Condiciones de servicio</p>	<p>Número de actuaciones durante el tiempo de vida del gripper Reemplazamiento de las partes usadas (dedos) Mantenimiento y servicio</p>
<p>Ambiente de operación</p>	<p>Calor y temperatura Humedad, polvo, químicos</p>
<p>Protección de temperatura</p>	<p>Placas de calentamiento Dedos largos Refrigeración forzada (aire comprimido, agua, etc.) Uso de materiales resistentes al calor.</p>
<p>Materiales de fabricación</p>	<p>Deformación, resistencia y durabilidad Deformación por fatiga Costo y facilidad de fabricación Propiedades de fricción para las superficies de los dedos Compatibilidad con el medio de operación</p>
<p>Otras consideraciones</p>	<p>Uso de dedos intercambiables Normas de diseño Conexiones de montaje e interfaces con el robot Riesgo de cambios en el diseño y su efecto en el diseño del gripper Tiempo para el diseño y fabricación Partes, mantenimiento y servicio Retiro del gripper en la producción</p>



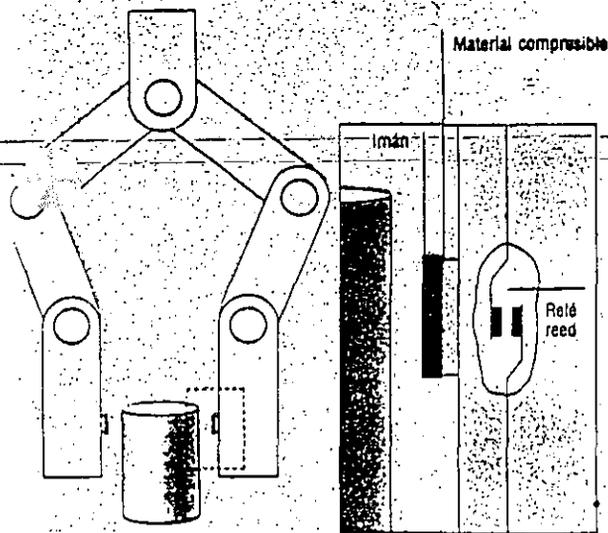
Figure 7-10. Robot-robot-vision system. (Photo courtesy of Object Recognition Systems, Inc.)

finder using triangulation or other techniques to determine the distance to the object.

Machine vision, coupled with the force and torque sensors discussed in Chap. Six, can immensely enhance a robot's applicability in manufacturing. Representative tasks in which such highly sensed systems could be applied include manipulation of parts during deburring, flash removal, and assembly. We will discuss the particular technical problems encountered in robotic assembly and the need for sensors in this application in Chap. Fifteen.

## REFERENCES

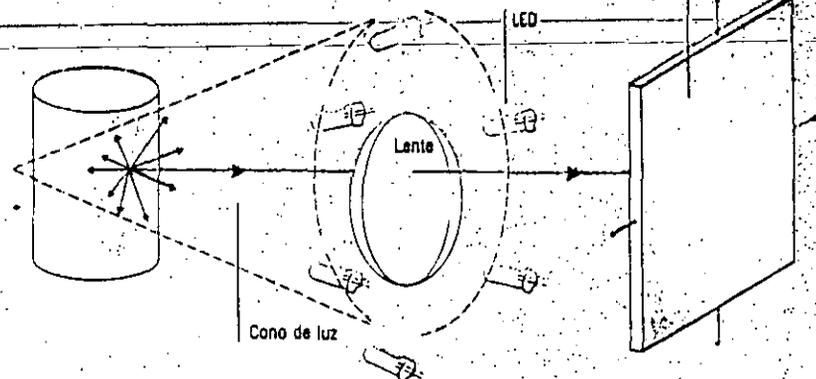
1. I. Aleksander (ed.), *Artificial Vision for Robots*, Chapman and Hall, New York, 1983.
2. D. H. Ballard and C. M. Brown, *Computer Vision*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.



**Relé Reed**

Dentro de los dedos del robot hay reles Reed en miniatura cada uno con dos contactos que se pueden cerrar magnéticamente.

Hay una pequeña barra magnética y, cuando los dedos ejercen presión sobre un objeto, este imán se acercará al relé, cerrando los contactos.

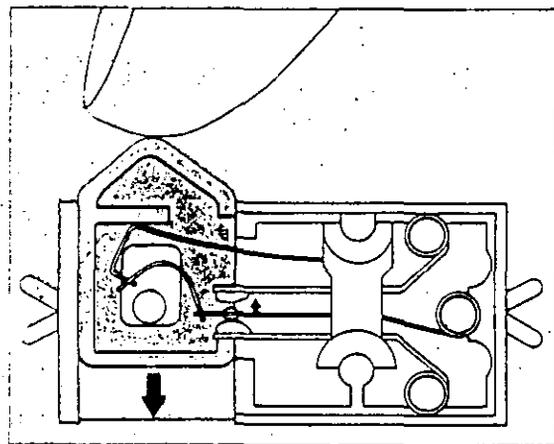


**Sensores de proximidad**

Un aro de diodos emisores de luz (LEDs) proyectan un cono de luz infrarroja a unos pocos centímetros de longitud. Si un objeto corta este cono luminoso aparecerá un punto luminoso

sobre su superficie, y el tamaño de este punto será proporcional a la distancia del objeto hasta el vértice del cono. Mediante una lente se enfoca la mancha de luz reflejada sobre una célula sensible a los rayos infrarrojos (a

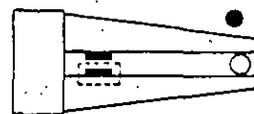
la derecha del diagrama) lo que produce un voltaje proporcional a la intensidad de la luz. Los sensores de proximidad de este tipo se utilizan cuando los robots tienen que manejar objetos muy delicados.



**Microinterruptor**

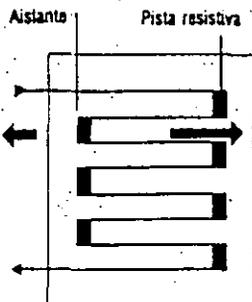
Un microinterruptor es un interruptor eléctrico convencional que puede activarse mediante una presión muy débil, o por un movimiento casi instantáneo o por ambas cosas. El que se muestra aquí posee tres salidas; generalmente, las dos inferiores están conectadas, pero cuando se pulsa el botón se conectan las dos superiores. El contacto central está montado sobre una lámina muy delgada.

Microinterruptores como éste pueden utilizarse como una forma rudimentaria de sensores táctiles, y como detectores de colisión para los robots móviles.



**Galgas extensiométricas**

Este tipo de sensores táctiles dan como salida una tensión proporcional a la fuerza ejercida por los dedos sobre el objeto. Incluso las garras metálicas se deforman ligeramente bajo la presión, y estos sensores de deformación, si están montados sobre los dedos, pueden medir esta deformación. Un sensor de deformación, como el que se



muestra, consta de una pista en zigzag de material resistivo, impreso sobre una lámina de plástico y encajada firmemente en el metal. Incluso una ligera deformación aumentaría la longitud de la pista.

cierto número de sensores en una matriz, puede determinarse la forma general del objeto. El medir la textura de la superficie es más difícil. Para superficies relativamente pulidas, tal como piezas torneadas, la textura de la superficie mecanizada puede leerse mediante una aguja lectora (de forma parecida a la aguja de un tocadiscos) y grabando las ondas de tensión obtenidas.

Además de las aplicaciones cuasiestáticas que representan el coger un objeto, los sensores de tacto también podrían utilizarse para el control dinámico. Mediante sensores de tacto, el brazo de un robot podría seguir fácilmente la línea de la carrocería de un coche con mucha precisión y distribuir una solución para sellar las juntas. El mismo resultado podría conseguirse utilizando un sistema de visión para el robot, pero sería mucho más caro.

El ejemplo más extremo del control dinámico es el robot esquilador de corderos. Los sensores de tacto montados sobre la herramienta para cortar la lana detectarán la forma del cordero —que, aunque esté atrapado para inmovilizarlo, seguirá moviéndose— y al mismo tiempo tensarán la piel para evitar que se formen pliegues. El esquilador de ovejas es uno de los primeros ejemplos de la sustitución de habilidades y artesanías tradicionales por un robot.



**Detector de formas**

Este es un sensor táctil experimental diseñado no sólo para detectar la presencia de un objeto, sino también su forma.

Consiste en una matriz cuadrada de sensores táctiles convencionales, conectados todos a un microprocesador, el cual estima la forma

tridimensional a partir de la secuencia de señales producidas. Los sensores son células piezoeléctricas que producen una tensión proporcional a la presión aplicada.

# SONIDO

Muy pocos trabajos se basan en el sentido del oído: el afinador de piano o los motores de coche son los mejores ejemplos de aquellos que lo hacen. Un fabricante de coches utiliza actualmente un pequeño brazo de robot, equipado con dos micrófonos como efectores terminales, para trazar las curvas de ruido en un banco de pruebas de motor.

## Reconocimiento de la voz

El principal incentivo para equipar a los robots con oídos es para imitar otra de las capacidades humanas —la de recibir órdenes verbales—. Si a un robot se le pudiera enseñar un proceso sólo diciéndoselo, entonces cualquiera podría programarlo para aplicaciones sencillas. Además, sería factible realizar complejas aplicaciones interactivas en las que el hombre y el robot trabajasen uno junto a otro. El robot realizando las tareas pesadas o repetitivas en un ensamblaje, mientras que el hombre, utilizando su mayor habilidad de percepción y destreza, avisaría o instruiría verbalmente al robot.

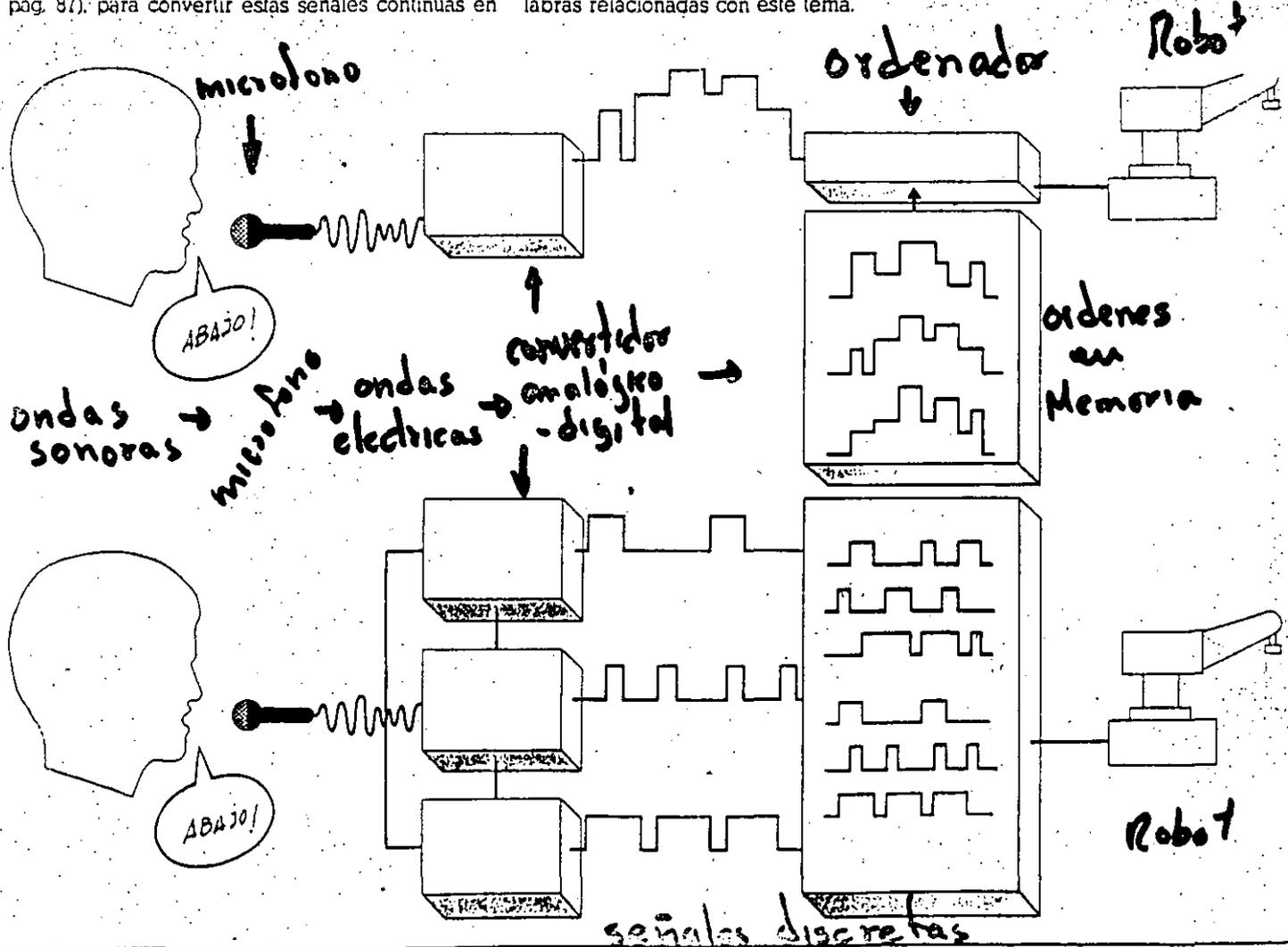
Para entrar la voz o el sonido en un ordenador se requiere únicamente un micrófono —para convertir las ondas sonoras en electricidad— y un circuito convertidor de señal analógica en digital (véase pág. 87), para convertir estas señales continuas en

bloques discretos que pudieran ser procesados por el ordenador. El problema reside en la interpretación de las estructuras de datos resultantes.

La mayoría de los sistemas electrónicos de reconocimiento de la voz funcionan mediante tres grandes limitaciones. En primer lugar deben entrenarse para reconocer únicamente la voz de un operador particular (aunque este proceso necesita tan sólo unos segundos). En segundo lugar, las palabras deben pronunciarse con un pequeño intervalo entre ellas, pero bien delimitado; muy pocos sistemas pueden tratar a la velocidad de una conversación continua normal. El concepto de una máquina de escribir computerizada que pueda aceptar un dictado a la misma velocidad que una buena secretaria es muy atractivo, pero en realidad los únicos prototipos que se acercan a esta realización cuestan muchos millones de pesetas. En tercer lugar, en cualquier momento, la mayoría de los sistemas de reconocimiento de la voz pueden reconocer únicamente un número muy pequeño de palabras, por lo general 64 o menos —lo que es un vocabulario muy limitado—. Sin embargo, la lista de las palabras que el robot o el ordenador está esperando puede cambiarse casi al instante, generalmente cargando un nuevo «diccionario» desde los discos del ordenador hacia la memoria principal. Así por ejemplo, después de oír la palabra «muñeca» el robot sabe que la siguiente palabra debe referirse al movimiento de la muñeca, y podrá cargar en su memoria una nueva lista de palabras relacionadas con este tema.

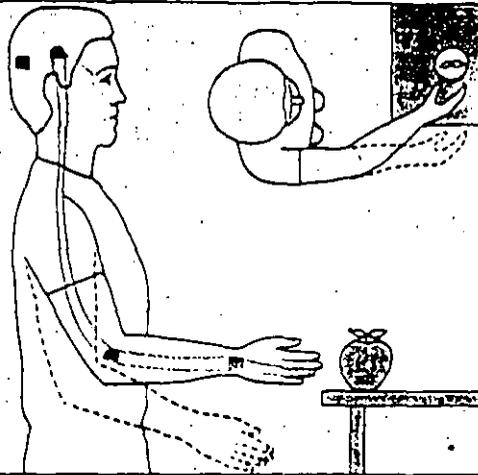
Aquí se muestran dos for distintas de reconocimiento voz mediante un ordenador, a través de diagramas. El ejemplo superior requiere menos hardware, pero es más lento en cuanto a funcionamiento. La señal sonora que proviene del micrófono se convierte en una secuencia binaria mediante un convertidor analógico-digital (A/D). En la memoria del ordenador está guardada una secuencia binaria para cada orden permisible. El procesador busca con cual coincide más exactamente, utilizando las mismas técnicas que para el reconocimiento de estructuras visuales (véase pág. 94-95).

En el ejemplo inferior, los circuitos del hardware extraen las características principales de la señal sonora, como los sonidos vocales, los fricativos y los silencios. El procesador compara estas características con una lista de características similares para cada una de las órdenes permitidas. Esta lista es más compacta que en el caso de las señales totalmente digitalizadas y es por lo tanto más rápida de recorrer.



# ACCIONAMIENTO Y ELEMENTOS DE RETROALIMENTACION

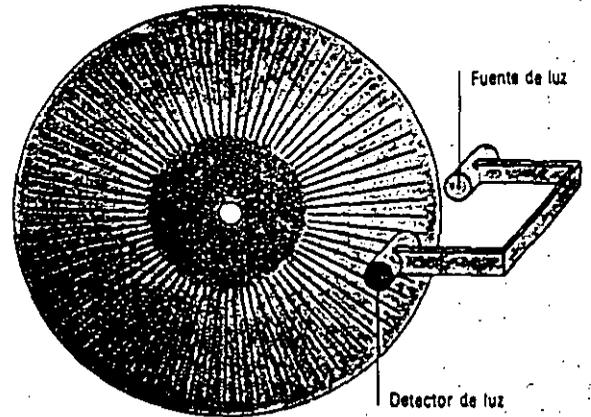
Equipo de sistema de control	Equipo controlador	
	Sensores	
	Actuadores	
	Equipo transmisor de potencia	
Sensores de posición	Potenciómetro	
	Resolver	
	Encoder	Incremental
		Absoluto
Sensores de velocidad	Tacómetro	
	Encoder	
Actuadores	Neumáticos	
	Hidráulicos	Servo motor CC
	Motores	De pasos
		Servomotor CA
Equipo transmisor de potencia	Engranés	
	Tornillos sin fin	
	Poleas	
	Cadenas	
	Transmisión armónica	



**El sexto sentido**  
 La propiocepción es el nombre que se da a nuestra habilidad para captar la posición de cada uno de nuestros miembros.  
 Mediante nervios especiales se comunica el estado de cada músculo al cerebro. Cuando más utilizamos este «sexto sentido» es cuando no vemos.  
 Los sensores de posición colocados en las articulaciones de un manipulador industrial (abajo) comunican el ángulo de cada articulación al ordenador de control. Entonces éste podrá calcular lo lejos que está el efector terminal del objetivo, y enviar instrucciones de movimiento a las unidades de potencia matriz.



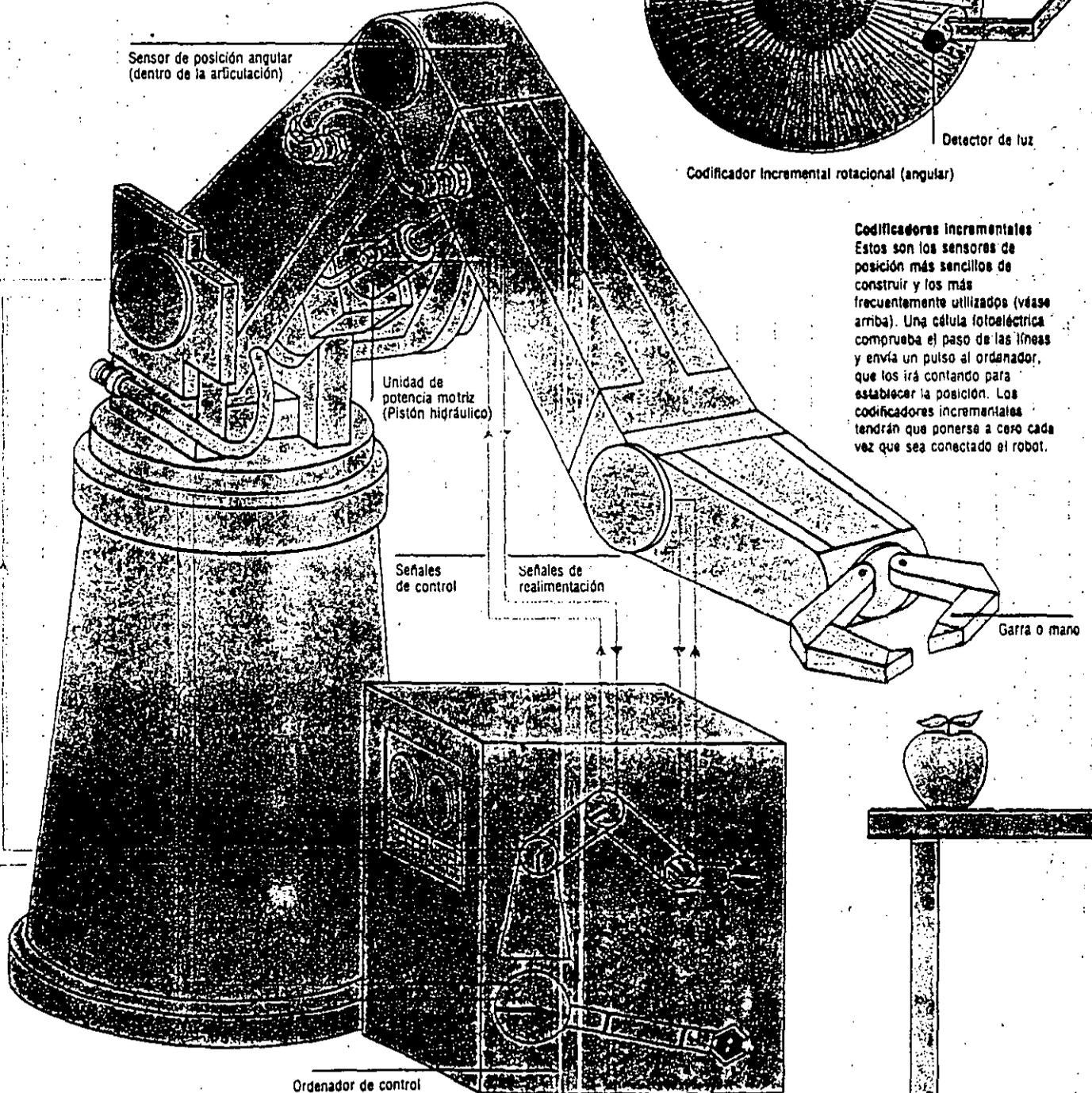
Codificador incremental lineal

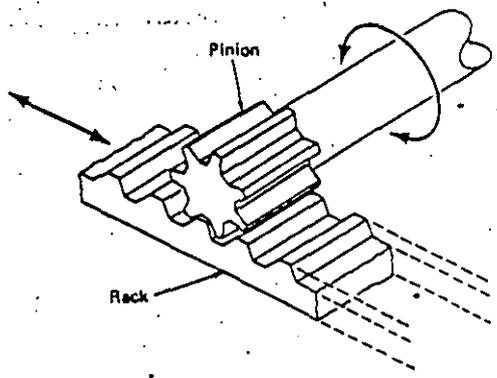


Codificador incremental rotacional (angular)

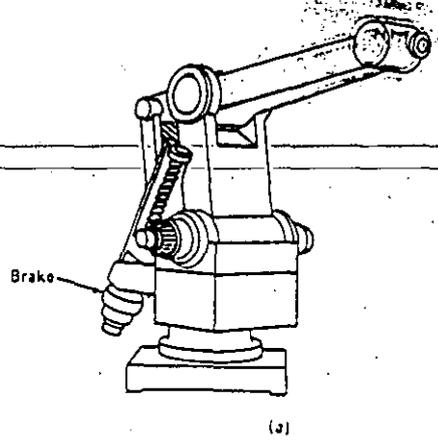
Sensor de posición angular (dentro de la articulación)

**Codificadores incrementales**  
 Estos son los sensores de posición más sencillos de construir y los más frecuentemente utilizados (véase arriba). Una célula fotoeléctrica comprueba el paso de las líneas y envía un pulso al ordenador, que los irá contando para establecer la posición. Los codificadores incrementales tendrán que ponerse a cero cada vez que sea conectado el robot.

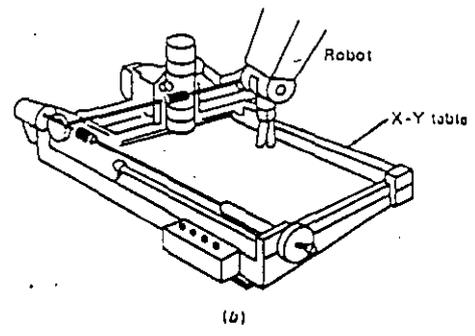




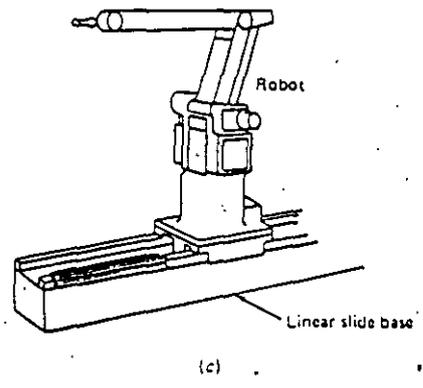
Rack and pinion system.



(a)

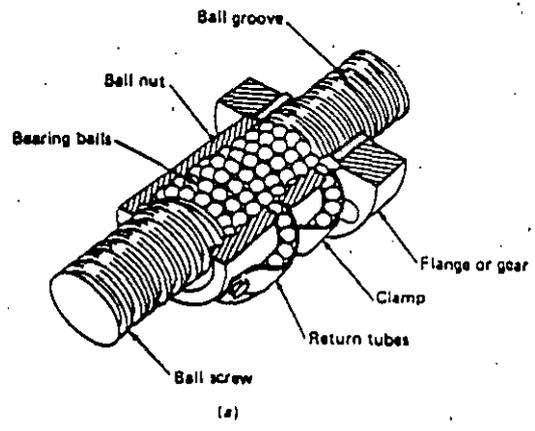


(b)

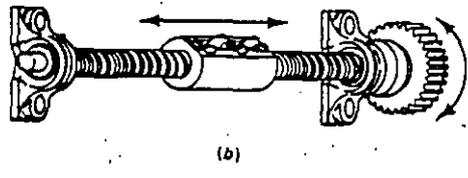


(c)

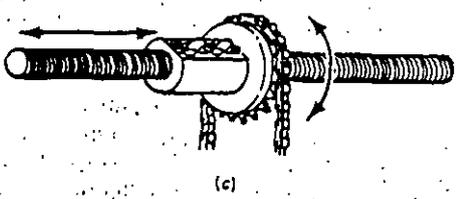
Applications of ball screw drives. (a) In the robot itself, (b) In the axes of an X-Y table, (c) In a linear slide base.



(a)

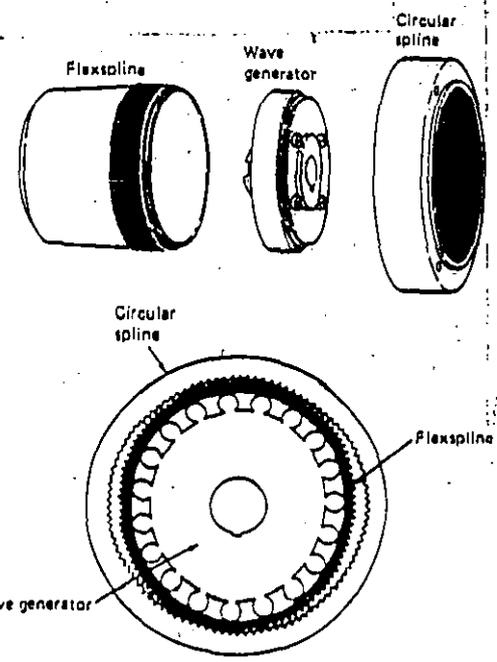


(b)



(c)

The ball bearing screw drive. (a) Screw and nut assembly. (b) Driving the ball screw. (c) Driving the ball nut.



Harmonic drive transmission.

# SENSORES DE POSICIÓN

Cuando intentamos coger un objeto, no tenemos que pensar cuáles son los movimientos a realizar. Sin embargo, la parte subconsciente de nuestro cerebro está haciendo una gran cantidad de trabajo. La información referente a la posición relativa de la mano con respecto al objeto llega a través de los ojos, y, a partir de esto, el cerebro es capaz de elaborar mensajes apropiados para enviarlos a los músculos.

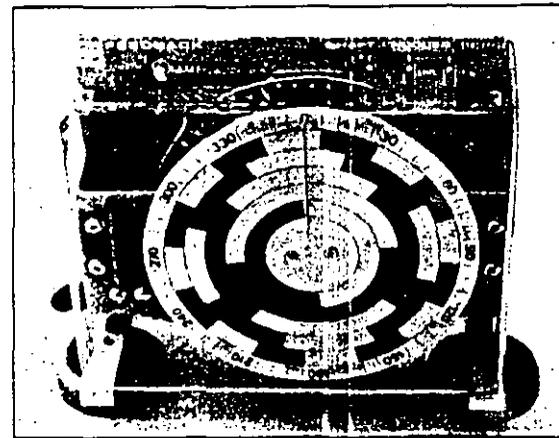
Si eliminamos la visión, tapándonos los ojos, la operación será más difícil, aunque no imposible —particularmente si hemos practicado antes varias veces—. Ahora el cerebro no está reproduciendo la secuencia de impulsos que enviaba hacia cada nervio, que utilizó con anterioridad cuando podía ver el objeto; este procedimiento no sería suficientemente preciso. De hecho, el cerebro puede comprobar la posición de cada articulación del cuerpo, y ajustará cada músculo hasta que crea que las articulaciones están en la misma posición que cuando consiguió coger adecuadamente el objeto en el proceso anterior.

A esto se le llama «propiocepción» y es un sentido tan válido, como el tacto, gusto, olfato, vista y oído. Los nervios propioceptores comunican el estado de cada músculo al cerebro.

La propiocepción es aún más importante para la robótica. Comparativamente, muy pocos robots tienen algún tipo de visión, y no obstante deben ser capaces de posicionar el efector terminal con precisión. Los robots activados por motores de c.c. tienen los sensores de posición incorporados en las propias servounidades. En otros tipos, los sensores pueden estar montados dentro de las articulaciones y separados de las unidades de la potencia motriz.

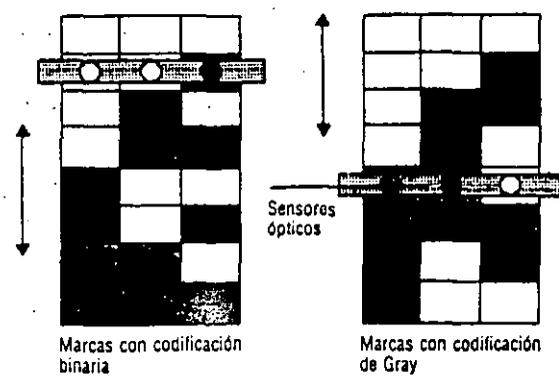
### Codificadores absolutos

Los tres sensores de posición que se muestran a la derecha son codificadores absolutos, uno angular, para ser montado sobre una articulación giratoria, y dos lineales para la medida en extensiones telescópicas. Una rueda o cinta se marca con un código en blanco y negro que será leído por una fila de células fotosensibles. El código está diseñado de forma que a cada posición de la rueda o cinta le corresponda un único código de unos y ceros (blanco y negro) de las células. La posición del robot siempre podrá leerse directamente; el ordenador no tendrá necesidad de mantener un registro de los movimientos anteriores.



El problema de la utilización del código binario (cerca, a la derecha) para los codificadores absolutos es que, si el brazo se detiene en un punto intermedio entre dos posiciones, puede obtenerse una lectura muy inexacta, ya que en algunas posiciones todos los bits cambian su valor.

El código Gray (más a la derecha) es más adecuado para los codificadores, ya que tan sólo cambia un bit entre dos posiciones adyacentes. Por lo tanto las células fotoeléctricas siempre leerán el código correcto, ya sea de un lado u otro de la posición.



Un sensor de posición convierte el ángulo de una articulación o la extensión de una sección telescópica, en una señal eléctrica. Los sensores de posición analógicos son más sencillos de construir, aunque los sensores digitales se utilizan más frecuentemente debido a su mayor precisión.

### Sensores analógicos

El control de volumen del amplificador de alta fidelidad es una forma de sensor analógico. Un contacto eléctrico se mueve sobre una pieza de material resistivo, tal como carbón; cuanto más se gire el mando, menos será el material incorporado al circuito, con lo que mayor será la señal de salida. Si se fija un trozo de este material sobre una parte que se mueva de la articulación y la aguja de contacto se fija sobre la otra, entonces cualquier cambio en el ángulo o en la extensión de la articulación, cambiará la tensión de realimentación que va hacia el ordenador.

### Sensores digitales

La forma más sencilla de un sensor de posición digital consiste en que una cara de la articulación móvil contenga una serie de marcas y en el otro lado de la articulación un sistema para comprobar la presencia/ausencia de la marca. Estas marcas podrían grabarse físicamente sobre una superficie y detectarse mediante una aguja similar a la aguja de un tocadiscos, o podrían ser marcas de material que fuese conductor eléctrico, intercaladas con material aislante. La técnica más popular es el grabar marcas negras sobre un fondo blanco y detectarlas mediante un sistema fotosensible. No existirá el contacto físico por lo que no habrá ningún tipo de desgaste ni rozamiento.

La mayoría de los sensores digitales son codificadores incrementales. Mediante un sencillo circuito se cuentan las marcas a medida que pasan por delante de la célula fotoeléctrica. Cuando el robot se conecta, el brazo está programado para que se mueva hasta una posición conocida, con todas las articulaciones totalmente retraídas. Los contadores electrónicos se ponen todos a cero, por lo que el ordenador podrá entonces convertir cualquier movimiento relativo, en una posición absoluta.

### Código de Gray

Un codificador absoluto funciona de una forma diferente, y no necesita ningún tipo de puesta a cero, ya que las marcas están grabadas de forma que constituyan un código, que será leído por varias fotocélulas, y en las que cada posición tiene un único código. El código binario quizá parezca el ideal, ya que los ordenadores trabajan con el sistema binario, pero existe un problema. Si el brazo se detiene entre dos códigos, cada célula fotoeléctrica individual puede que lea un valor correspondiente a uno de los dos lados. En binario, pueden cambiar varios bits entre dos posiciones. El sensor, por lo tanto, podría leer algo que no correspondiese al código de ninguna de las dos posiciones, por lo que la lectura no tendría sentido o sería tan inexacta que tendría consecuencias desastrosas. Por lo tanto, se utiliza el código de Gray. Este código es muy parecido al binario, pero con la excepción de que tan sólo cambia un bit entre dos posiciones adyacentes. Cuando está entre dos posiciones, el sensor sólo podrá dar la lectura que codifica un lado u otro, ya que no puede existir más de un bit distinto.

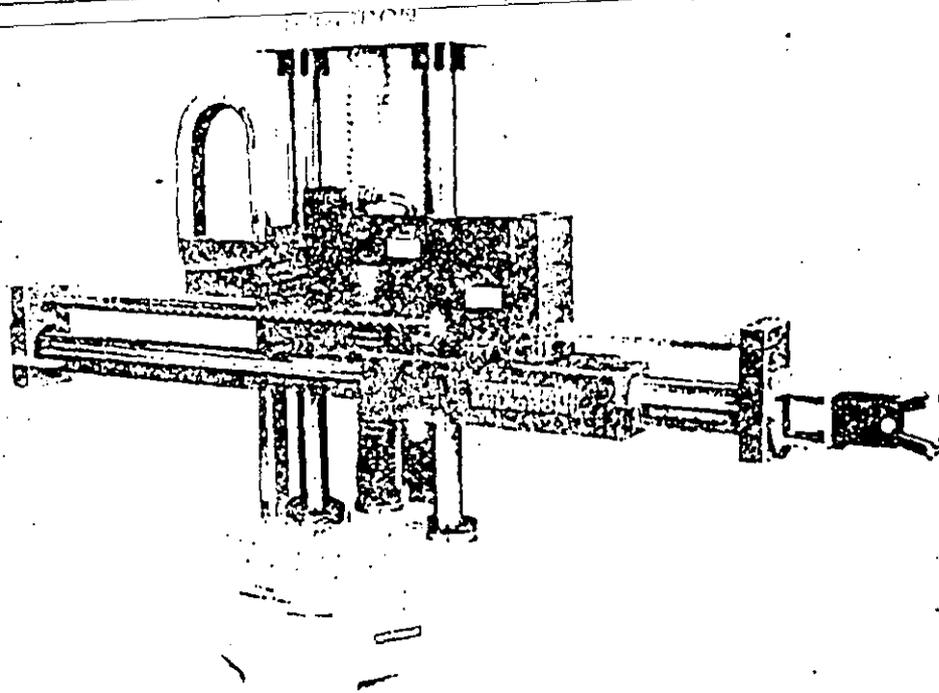


Fig. 41. The Cincinnati Milacron T<sup>3</sup> 36J<sup>\*\*</sup> industrial robot designed primarily for materials handling operations.

TABLE 13. General Specifications of the Milacron T<sup>3</sup> 36J<sup>\*\*</sup> Industrial Robot.

<b>Load Capacity</b>		
Load 8 in (200 mm) from tool mounting plate		110 lb (50 kg)
with Pitch or Yaw axis option		75 lb (35 kg)
<b>Number of axes, configuration, servo system, control type</b>		
Number of servoed axes		3
with Pitch or Yaw axis option		4
Configuration		Cylindrical
Drive system		DC Motor
Power amplifiers		PWM
Control type		Sequential Point-to-Point
with control option		Simultaneous Point-to-Point
<b>Positioning repeatability</b>		
Repeatability, in cycle		± 0.020 in (± 0.5 mm)
<b>Range of motion, velocity</b>		
Base, $\theta$	Range	Velocity
Vertical, Z <sup>†</sup>	300 deg	90 deg/sec
Horizontal, R	24 in (610 mm)	20 ips (0.5 m/sec)
optional extended, R	26 in (666 mm)	40 ips (1.0 m/sec)
Pitch, D, option	45 in (1146 mm)	40 ips (1.0 m/sec)
Yaw E, option	240 deg	90 deg/sec
	240 deg	90 deg/sec
<b>Reach</b>		
Horizontal	3 Axis	4 Axis
with extended reach option	57 in (1450 mm)	70 in (1785 mm)
	76 in (1930 mm)	89 in (2265 mm)
<b>Memory capacity, I/O contacts</b>		
Data area size/Average number of data points		8 kb/500
with memory expansion option		24 kb/1500
Number of input contacts/Maximum optional		8/24
Number of output contacts/Maximum optional		8/24
<b>Floor space and approximate net weight</b>		
Robot		4.5 ft <sup>2</sup> (0.4 m <sup>2</sup> )/1550 lb (705 kg)
Robot control		7.6 ft <sup>2</sup> (0.70 m <sup>2</sup> )/950 lb (430 kg)
<b>Ambient temperature</b>		
		40° to 105°F (5° to 40°C)
with air conditioner option		40° to 120°F (5° to 50°C)
<b>Power requirements</b>		
		230/460 volts, 1 $\phi$ , 60 Hz <sup>**</sup>
<b>Power rating/Power required for typical cycle</b>		
with air conditioner option		3.7 kVA/1.0kW
with simultaneous control option		5.7 kVA/***
with air conditioner and simultaneous control options		7.5 kVA/***
		9.5 kVA/***

<sup>†</sup>Consult factory for greater vertical range  
<sup>\*\*</sup>Other voltages and 50 Hz available  
<sup>\*\*\*</sup>Consult factory.

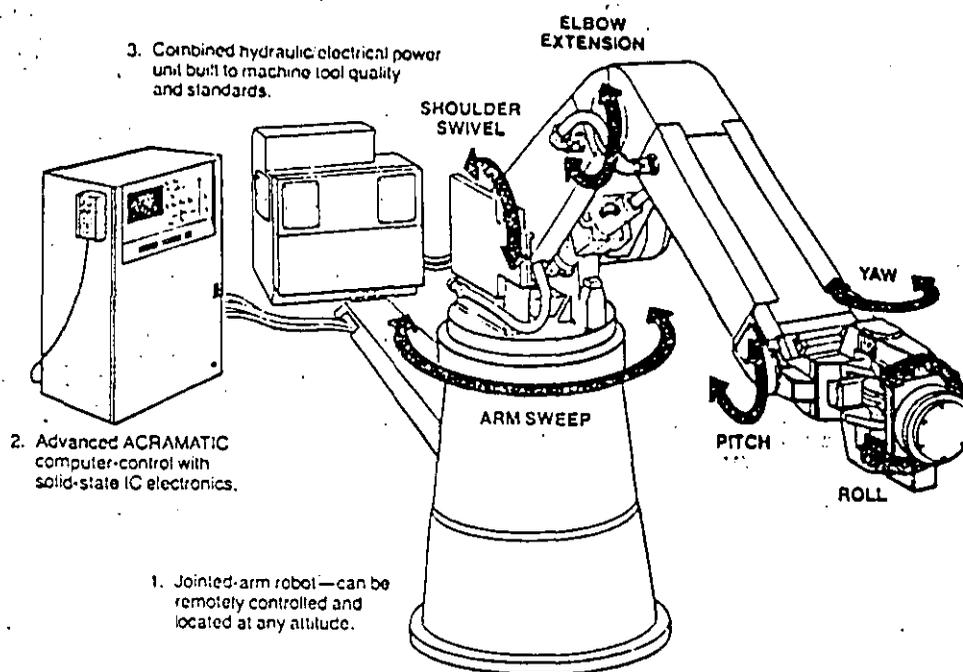


Fig. 40. The general configuration and operating parameters of the Cincinnati Milacron T<sup>3</sup> series of industrial robots.

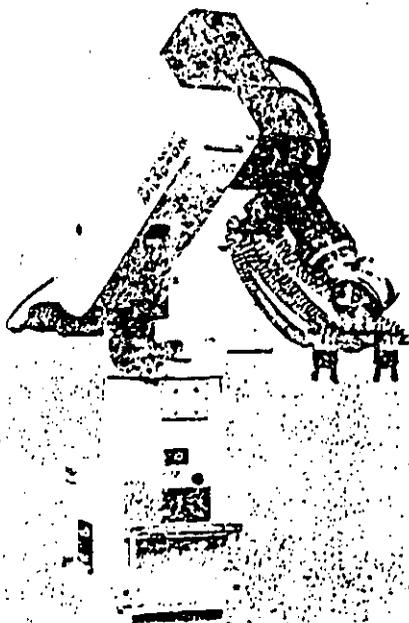


TABLE 14. General Specifications of the Milacron T<sup>3</sup> 726 Industrial Robot.

<b>Load Capacity</b>	
Load 5 in (125 mm) out and 2 in (50 mm) offset from tool mounting plate	14 lb (6 kg)
<b>Number of axes, configuration, servo system, control type</b>	
Number of servoed axes	6
Configuration	Articulated
Drive system	DC Motor
Position feedback	Brushless resolver
Control type	Controlled path at Tool Center Point
<b>Positioning repeatability</b>	
Repeatability to any previously taught point	±0.004 in (±0.10 mm)
<b>Range of motion, velocity</b>	
Basesweep	285 deg
Horizontal reach to tool mounting plate	41 in (1040 mm)
Vertical reach to tool mounting plate	72 in (1830 mm)
Pitch and Yaw relative to forearm	238 deg
Roll relative to wrist	90 deg
Nominal velocity at Tool Center Point (TCP)	40 ips (1000 mm/sec)
Base slew rate	250 deg/sec
<b>Memory capacity, I/O contacts</b>	
Data area size/Average number of data points	48 k byte/3000
Number of input contacts/Maximum optional	16/32
Number of output contacts/Maximum optional	16/32
<b>Floor space and approximate net weight</b>	
Robot	2.1 ft <sup>2</sup> (0.2 m <sup>2</sup> )/1,050 lb (480 kg)
Robot control	8.1 ft <sup>2</sup> (0.75 m <sup>2</sup> )/1,470 lb (670 kg)
<b>Ambient temperature</b>	
	40 to 105°F (5 to 40°C)
with air conditioner option	40 to 120°F (5 to 50°C)
<b>Power requirements</b>	
	460 volts, 3φ, 60 Hz
Power rating/Power required for typical cycle	10kVA

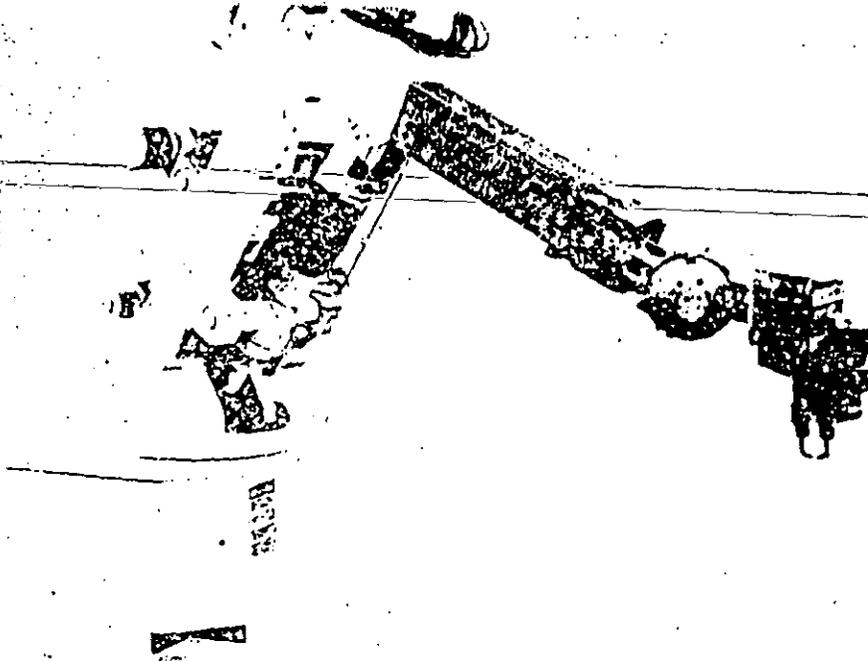


Fig. 43. The Cincinnati Milacron T<sup>3</sup> 776<sup>™</sup> industrial robot designed primarily for heavy-payload process applications.

TABLE 15. General Specifications of the Milacron T<sup>3</sup> 776<sup>™</sup> Industrial Robot.

<b>Load Capacity</b>	
Load 10 in (250 mm) out and 5 in (125 mm) offset from tool mounting plate .....	150 lb (68 kg)
<b>Number of axes, configuration, servo system, control type</b>	
Number of servoed axes .....	6
Configuration .....	Articulated
Drive system .....	DC Motor
Position feedback .....	Brushless resolver
Control type .....	Controlled path at Tool Center Point
<b>Positioning repeatability</b>	
Repeatability, in cycle .....	±0.010 in (±0.25 mm)
<b>Range of motion, velocity</b>	
Base sweep .....	270 deg
Horizontal reach to tool mounting plate .....	101 in (2585 mm)
Vertical reach to tool mounting plate .....	139 in (3530 mm)
Pitch and Yaw relative to forearm .....	238 deg
Roll relative to wrist .....	900 deg
Nominal velocity at Tool Center Point (TCP) .....	25 ips (835 mm/sec)
Base slew rate .....	95 deg/sec
<b>Memory capacity, I/O contacts</b>	
Data area size/Average number of data points .....	48 k byte/3000
Number of input contacts/Maximum optional .....	16/32
Number of output contacts/Maximum optional .....	16/32
<b>Floor space and approximate net weight</b>	
Robot .....	15ft <sup>2</sup> (1.4 m <sup>2</sup> )/5,250 lb (2385 kg)
Robot control .....	8.1ft <sup>2</sup> (0.75 m <sup>2</sup> )/1,470 lb (670 kg)
Ambient temperature, .....	40 to 105°F (5 to 40°C)
with air conditioner option .....	40 to 120°F (5 to 50°C)
Power requirements .....	460 volt, 3ϕ, 60 Hz
Power rating/Power required for typical cycle .....	23kVA/4kW

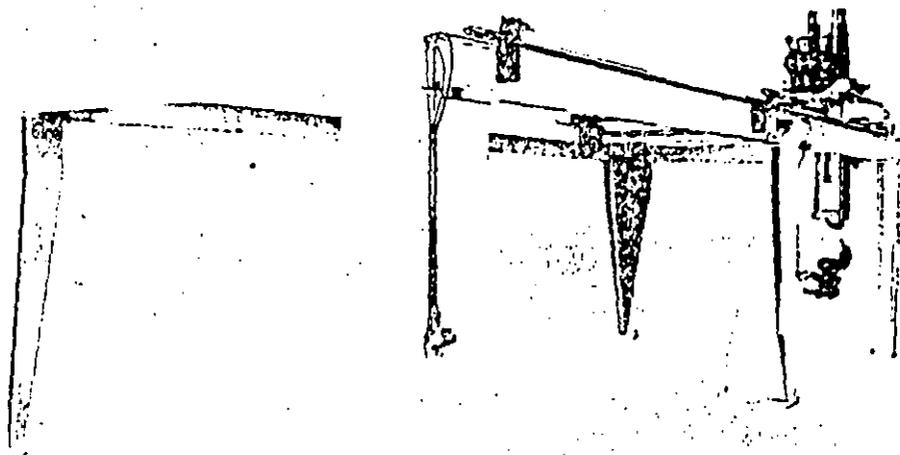


Fig. 44. The Cincinnati Milacron T<sup>3</sup> 800<sup>®</sup> gantry-type industrial robot designed primarily for large work volume applications. Robots in this series are particularly applicable where there is a large work volume, or where space is a premium. Their modular design allows up to 40 feet (12 meters) of X-axis travel and 200 inches (5 meters) Y-axis travel. Side-by-side gantries with a common center rail are available. Gantry robots are used in spot welding, arc welding, light machining, material handling, machine loading, and other general-purpose robotic applications.

TABLE 16. General Specifications of the Milacron T<sup>3</sup> 800<sup>®</sup> Gantry Series of Industrial Robots.

Load Capacity		
Load 10 in (250 mm) out and 5 in (125 mm) offset from tool mounting plate		200 lb (90 kg)*
Number of axes, configuration, servo system, control type		6
Number of servoed axes		6
Configuration		Gantry
Drive system		DC Motor
Position feedback type		Brushless resolver Absolute
Control type		Controlled path at Tool Center Point
Repeatability		
Repeatability to any previously taught point		0.010 in (0.25 mm)
Range of motion	T <sup>3</sup> 886**	T <sup>3</sup> 896**
X Axis	80 120 160 in (2.0 3.0 4.0 m)	192 288 384 480 in (4.8 7.2 9.6 12.0 m)
Y Axis	36 56 76 in (0.9 1.4 1.9 m)	70 128 200 in (1.8 3.3 5.0 m)
Z Axis	40 in (1.0 m)	40 60 in (1.0 1.5 m)
Pitch and Yaw relative to forearm		238 deg
Roll relative to wrist		900 deg
Nominal velocity at Tool Center Point (TCP)		40 ips (1.0 m/sec)
Memory capacity, I/O contacts		
Data area size Average number of data points		48 k bytes 3000
Number of input contacts Maximum optional		16 32
Number of output contacts Maximum optional		16 32
Ambient temperature		40 to 105 F (5 to 40 C)
with air conditioner option		40 to 120 F (5 to 50 C)
Power requirements		460 volt, 3 $\phi$ , 60 Hz***

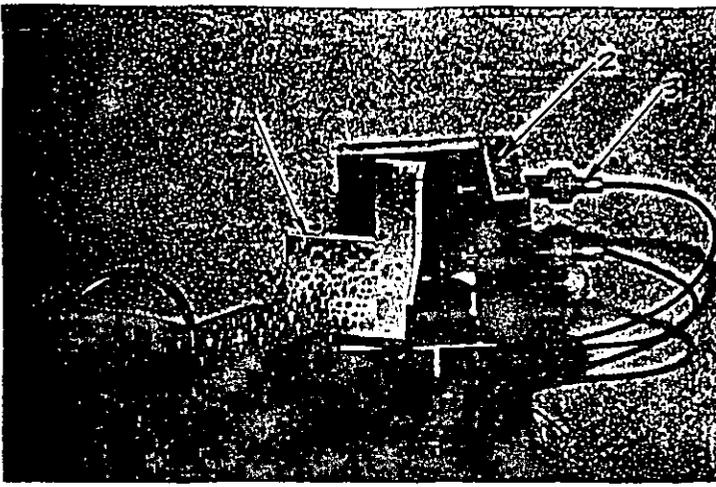


Fig. 3. Pose repeatability measuring system  
 (1) Measuring device  
 (2) Sensing head  
 (3) LVDTs

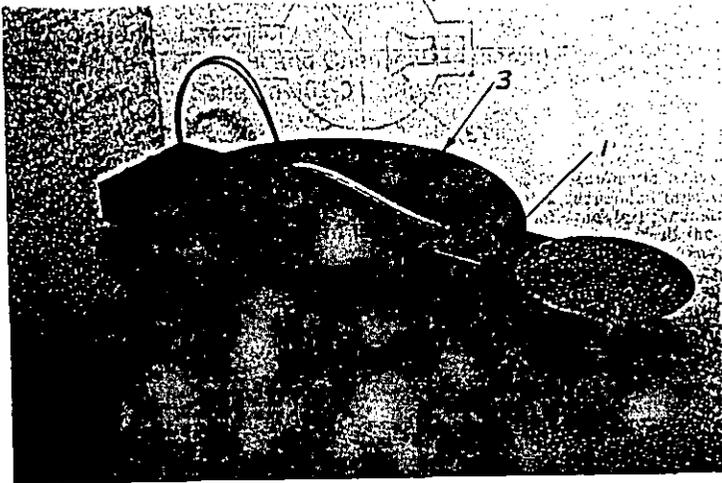


Fig. 2. Rotary plate  
 (1) End-effector  
 (2) Wafer  
 (3) Rotary plate

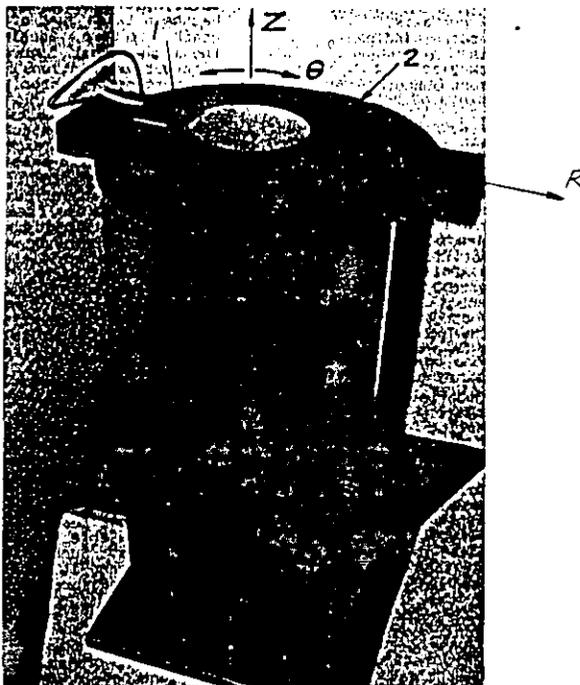


Fig. 1. R2B Robot  
 (1) End-effector  
 (2) Rotary plate

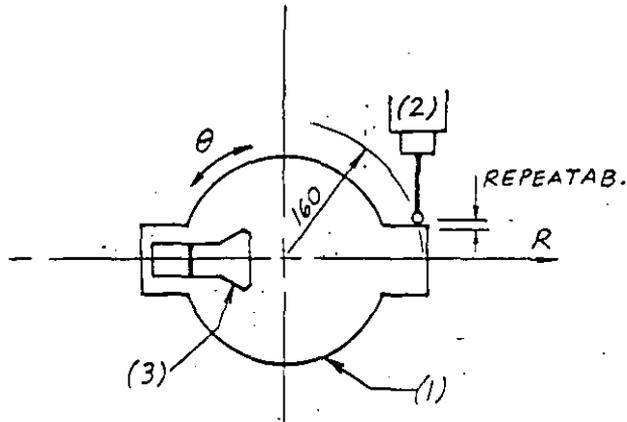


Fig. 4.  $\theta$ -axis repeatability

- (1) Rotary plate
- (2) CMM - probe
- (3) End-effector

TABLE 1 Results of way-4 repeatability tests  
Z-axis (Payload = 150 grs)

Speed (mm/sec)	Repeat. (mm)
8.8	0.0587
26.4	0.0237
44.0	0.0229
88.0	0.0347

TABLE 4 Results of way-4 repeatability tests  
R-axis (Payload = 250 grs)

Speed (mm/sec)	Repeat. (mm)
77.6	0.1195
232.8	0.0702
388.0	0.0426

TABLE 2 Results of way-4 repeatability tests  
R-axis (Payload = 150 grs)

Speed (mm/sec)	Repeat. (mm)
77.6	0.1102
232.8	0.0447
388.0	0.0374

TABLE 5 Results of way-4 repeatability tests  
 $\theta$ -axis (Payload = 150 grs)

Speed (rev/sec)	Repeat. (mm)
0.088	0.0862
0.264	0.1529

TABLE 3 Results of way-4 repeatability tests  
Z-axis (Payload = 250 grs)

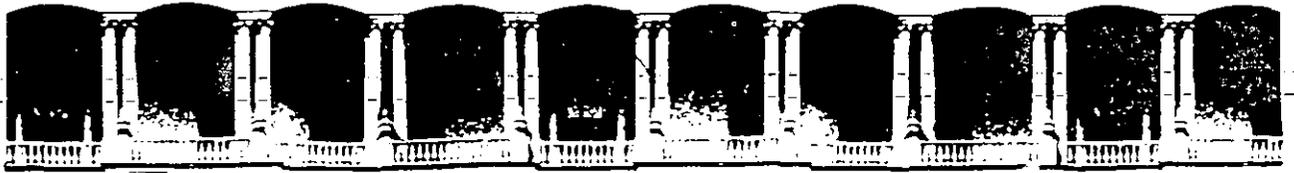
Speed (mm/sec)	Repeat. (mm)
8.8	0.1119
26.4	0.0497
44.0	0.0285
88.0	0.0462

TABLE 6 Results of way-4 repeatability tests  
 $\theta$ -axis (Payload = 250 grs)

Speed (rev/sec)	Repeat. (mm)
0.088	0.1779
0.264	0.1370

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- MIKELL P. GROOVER, MITCHELL WEISS, INDUSTRIAL ROBOTICS, Mc. GRAW HILL, 1986.
- 2.- SHULER AND MCNAMEE, INDUSTRIAL ELECTRONICS AND ROBOTICS, Mc. GRAW HILL, 1986.
- 3.- PAWSON, EL LIBRO DEL ROBOT, GUSTAVO GILI, 1986
- 4.- ZELDMAN, WHAT EVERY ENGINEER SHOULD KNOW ABOUT ROBOTS, ED. DEKKER, 1984.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**ROBOTICA INDUSTRIAL.**

**ASPECTOS TEORICOS DE LA ROBOTICA**

**1 9 9 4 .**

### 2.1- Introducción.

Un robot industrial consiste de algunos elementos rígidos conectados en serie, el acoplamiento de cuerpos rígidos forman una cadena cinemática, siendo considerado cada cuerpo como un eslabón de la cadena.

Si existen eslabones acoplados a un solo eslabón vecino, la cadena es abierta y constituye un manipulador. El manipulador está constituido por tres elementos básicos: cuerpo, brazo y antebrazo, que se relacionan entre sí mediante articulaciones o pares cinemáticos. Cada elemento dispone de dos pares cinemáticos, estando el primero de ellos fijo a la base y el último con un extremo libre, en donde se sitúa la mano o herramienta.

### 2.2 Tipo de articulaciones.

Únicamente son posible seis tipos diferentes de articulaciones, las cuales se muestran en la figura(2.2.1), estas son:

Rotación (R), permite giro alrededor de un eje y evita traslación. Impone cinco restricciones, tres de traslación y dos de rotación.

Prismática (P), permite únicamente traslación a lo largo de una dirección. Impone cinco restricciones, tres de rotación y traslación sobre dos direcciones.

Tornillo (T), permite traslación a lo largo de un eje o rotación alrededor del mismo eje, existiendo una relación entre ellos. Por lo tanto también impone cinco restricciones.

Cilíndrica (C), permite dos movimientos independientes, traslación sobre un eje y rotación alrededor del mismo. Impone cuatro restricciones.

Esférica (S), permite rotación alrededor de tres ejes no coplanares e impide movimientos de traslación. Impone tres

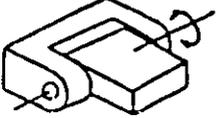
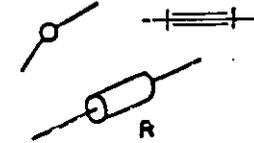
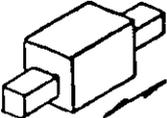
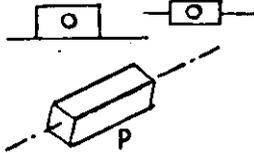
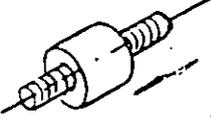
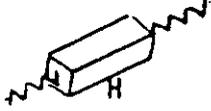
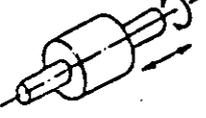
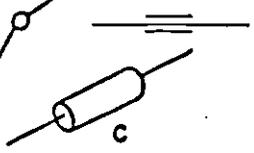
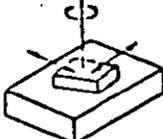
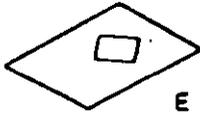
Nombre del par	Unión mecánica forma de los pares	Representación esquemática
1. Rotación ( R )		
2. Prismático ( P )		
3. Tornillo ( H )		
4. Cilíndrico ( C )		
5. Esférico ( S )		
6. Plano ( E )		

Figura ( 2.2.1 ) - Representación de los seis pares inferiores.

restricciones.

Planar (E), permite traslación a lo largo de dos direcciones independientes y rotación alrededor de un eje perpendicular al plano de esas direcciones. Impone tres restricciones.

De éstas articulaciones, pueden considerarse básicas la de rotación y la prismática ya que mediante ellas pueden simularse las demás. (tres rotaciones que se intersectan en un punto son equivalentes a una articulación esférica, Duffy [6]).

### 2.3 Grados de libertad.

Grado de libertad es el número mínimo de parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación de un elemento o cuerpo rígido, tal como el órgano o elemento terminal del manipulador. También se puede definir como los posibles movimientos básicos. En la figura(2.3.1), se muestra el esquema de un robor de estructura moderna con seis grados de libertad; tres de ellos determinan la posición en el espacio de la mano ( $q_1, q_2, q_3$ ), y los otros tres la orientación de la mismo ( $q_4, q_5, q_6$ ).

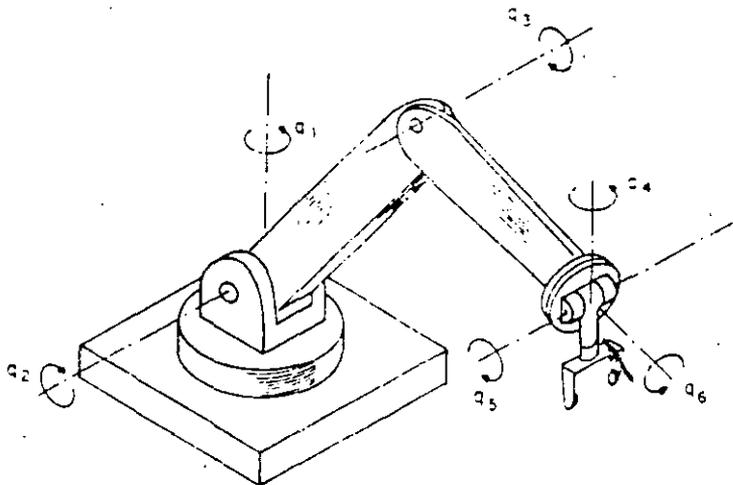


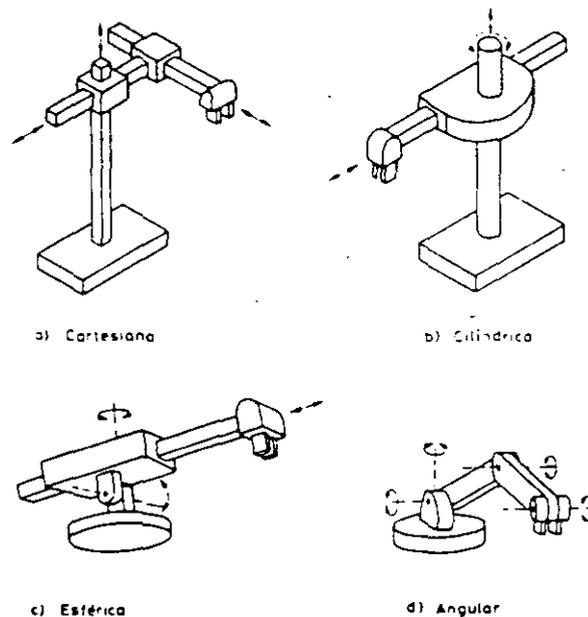
Figura (2.3.1.)-Esquema de un manipulador con 6 grados de libertad.

El tipo de manipulador empleado más frecuentemente en la

industria, tiene tres grados de libertad en su estructura, más otros tres en la muñeca. Con el movimiento de cada elemento (grados de libertad  $q_1, q_2, q_3$  ). se consigue posicionar la mano en un punto de la zona operativa ( el extremo libre ) y con los otros tres grados de libertad de la muñeca, se logra orientar en cualquier dirección el elemento terminal o mano.

#### 2.4 Coordenadas generalizadas.

La estructura del manipulador y la disposición entre sus elementos proporciona una configuración mecánica, la cual conduce a establecer las relaciones funcionales para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente existen cuatro estructuras básicas en los manipuladores, que se muestran en la figura(2.4.1) y se citan a continuación.



Figura(2.4.1)-Diversas estructuras de robots  
 Estructura de Coordenadas cartesianas ( tres ejes lineales )  
 (ejemplo: robot RS-1 de IBM y el robot sigma de Olivetti).  
 Estructura de Coordenadas cilíndricas( dos ejes lineales y un rotacional)(ejemplo: robot Versatran 600 de Prob).

Estructura de Coordenadas esféricas ( un eje lineal y dos de rotación)(ejemplo robot Unimate 2000B de Unimation-Inc.)-.

Estructura de Coordenadas de rotación o articuladas(tres ejes rotacionales.)(ejemplo: robot T<sup>3</sup> de Cincinnati Milacron y el puma de Unimation Inc.).

Cada una de las variables que especifican un grado de libertad, que pueden indicar rotación o desplazamiento seran denominadas coordenadas generalizadas y se representaran por  $q_i$ .

## 2.5 Zona de trabajo.

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

La zona de trabajo se subdivide en áreas diferentes entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal en cada una de ellas . Por ejemplo, la zona en la que se puede orientar horizontalmente del elemento terminal, es diferente a la que permite orientarlo verticalmente o con un determinado ángulo de inclinación, figura(2.5.1).

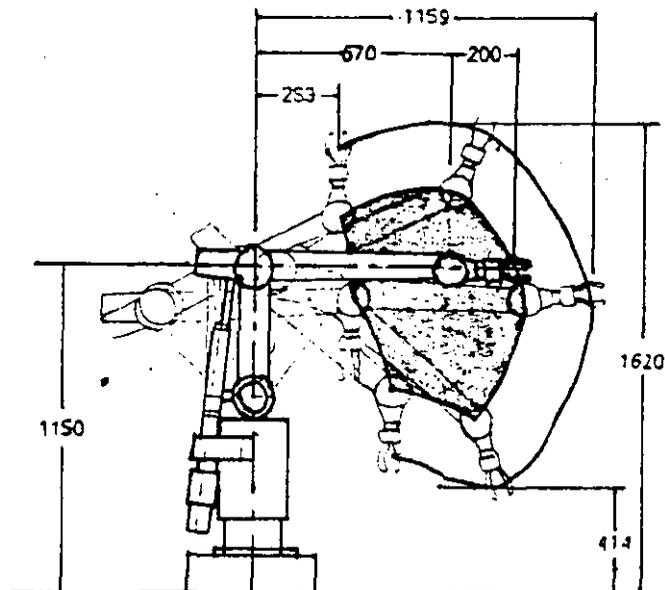
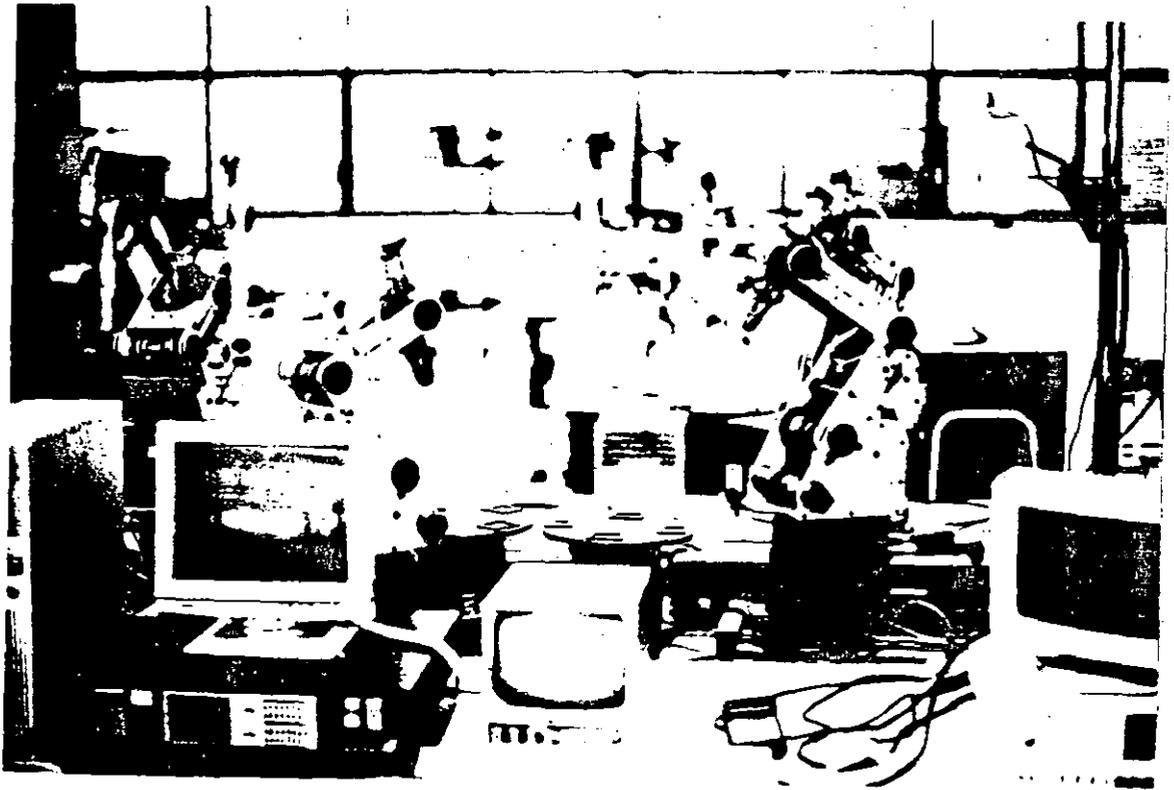


Figura (2.5.1.)-Dimensiones y zona de trabajo del manipulador del sistema de robot industrial IRB 6/2.



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

## 2.6 Cinemática del manipulador.

### 2.6.1 Introducción.

La cinemática del brazo del robot trata con el estudio analítico de la geometría del movimiento del brazo del robot, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo, sin considerar las fuerzas o momentos que originan el movimiento. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular de las relaciones entre la posición de las variables de articulación, la posición y orientación de la mano del robot.

Hay dos problemas fundamentales en la cinemática del robot. El primer problema se suele conocer como el problema cinemático directo en el cual se conocen los giros de las articulaciones, mientras que el segundo es el problema cinemático inverso en el cual se conocen las coordenadas de la trayectoria de la mano o herramienta. Como las variables independientes de un robot son las variables de articulación ( giros o desplazamientos de los eslabones ), y una tarea se suele dar en términos del sistema de coordenadas de referencia, se utiliza de manera más frecuente el problema cinemático inverso. Denavit y Hartenberg (1964), propusieron un enfoque sistemático y generalizado, el cual emplea álgebra matricial para describir y representar la geometría espacial de los elementos del brazo del robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. La matriz que se obtiene mediante el método de Denavit-Hartenberg (D-H), representa una transformación de cada uno de los ejes de coordenadas definido en la articulación con respecto al sistema de coordenadas del elemento previo. Así mediante transformaciones secuenciales, un punto de la herramienta expresado en las coordenadas de la mano, se puede transformar y expresar en las coordenadas de la base, que constituye un

sistema inercial.

Cada sistema de coordenadas se determina y establece sobre la base de estas tres reglas:

1. El eje  $Z_{i-1}$  es paralelo al eje de la articulación.
2. El eje  $X_i$  es perpendicular a los eje  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$ .
3. El eje  $Y_i$  completa el sistema de coordenadas según se requiera.

La representación de D-H de un elemento rígido depende de los parámetros geométricos asociados con cada elemento. Cuatro parámetros describen completamente cualquier eslabón, estos parámetros se definen como sigue:

- $\theta_i$ : Es el ángulo de la articulación entre el eje  $X_i$  y el eje  $X_{i+1}$  respecto del eje  $Z_i$ .
- $d_i$ : Es la distancia entre los ejes  $Z_i$  y  $Z_{i+1}$  siempre positivo y medido sobre  $X_{i+1}$ .
- $b_i$ : Es la coordenada  $Z_i$  de la intersección de los ejes  $X_{i+1}$  y  $Z_i$ .
- $\alpha_i$ : Es el ángulo entre el eje  $Z_i$  al eje  $Z_{i+1}$  respecto del eje  $X_i$ .

### 2.6.2 Posición y orientación.

Para definir la posición y orientación de la mano o herramienta a través de los eslabones intermedios se hace uso de transformaciones afines, que consiste en una traslación del origen de coordenadas y una rotación de los ejes coordenados. Con referencia a la figura (2.6.2). Sea  $(X_1, Y_1, Z_1)$  y  $(X_2, Y_2, Z_2)$  dos sistemas coordenados relacionados por una transformación afín. El vector de posición de cualquier punto P referido en el sistema 2 se puede expresar en el sistema 1 como:

$$[ p ]_1 = [ a_{1,2} ]_1 + [ Q_{1,2} ]_1 [ p ]_2 \quad (2.6.2.1)$$

donde  $a_{1,2}$  es el vector de traslación que une a los orígenes del sistema 1 con el 2 y  $Q_{1,2}$  es la matriz de rotación que sobre

pone los sistemas 1 y 2 mediante un giro y el subíndice de los paréntesis cuadrados indica el marco de referencia en el cual se representa el vector.

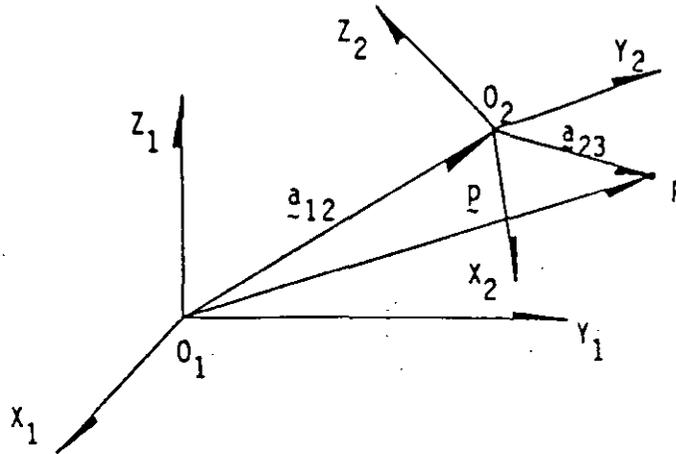


Figura (2.6.2)-Posición y orientación.

Para relacionar otro conjunto de coordenadas con los anteriores, sea  $(X_3, Y_3, Z_3)$  el nuevo sistema. La transformación afín entre 2 y 3 es.

$$[p]_2 = [a_{2,3}]_2 + [Q_{2,3}]_2 [p]_3 \quad (2.6.2.2)$$

para referir al sistema 1, y obtener una relación de coordenadas 3 a 1, se procede en la siguiente forma.

$$\begin{aligned} [p]_1 &= [a_{1,2}]_1 + [Q_{1,2}]_1 [a_{2,3}]_2 + \\ &\quad + [Q_{1,2}]_1 [Q_{2,3}]_2 [p]_3 \\ &= [a_{1,3}]_1 + [Q_{1,3}]_1 [p]_3 \end{aligned} \quad (2.6.2.3)$$

donde

$$[a_{1,3}]_1 = [a_{1,2}]_1 + [Q_{1,2}]_1 [a_{2,3}]_2$$

Al tener definidos los parámetros de Denavit-Hartenberg, podremos definir la matriz de rotación  $[Q_{i,i+1}]_i$ , que denota una rotación que lleva el sistema coordenado  $(X_i, Y_i, Z_i)$  a

coincidir con el  $( X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1} )$ . Esta matriz se obtiene mediante la composición de dos rotaciones, una de un ángulo  $\theta_1$  alrededor de  $Z_1$ , seguida de un ángulo  $\alpha_1$  alrededor de eje  $X_1$ . Así se obtiene.

$$[ Q_{1,i+1} ]_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 C\alpha_1 & S\theta_1 S\alpha_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 C\alpha_1 & -C\theta_1 S\alpha_1 \\ 0 & S\alpha_1 & C\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2.6.2.4)$$

así mismo

$$[ \tilde{a}_{1,i+1} ]_1^T = [ d_1 \ C\theta_1, \ d_1 S\theta_1, \ b_1 ] \quad (2.6.2.5)$$

expresión para el vector que une los orígenes de los sistemas  $i$  e  $i+1$ .

El análisis cinemático directo consiste en determinar la posición, la velocidad y la aceleración de cada eslabón, incluyendo la mano o herramienta, dados los parámetros y desplazamientos relativos de las articulaciones, así como su primera y segunda derivada.

Algunos autores ( Paul 1981, Lee 1982 ), utilizan una matriz de transformación homogénea de  $4 \times 4$  para describir la relación espacial entre dos elementos mecánicos rígidos adyacentes y reducen el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea de  $4 \times 4$  que relacione el desplazamiento espacial del sistema de coordenadas de la mano al sistema de coordenadas de referencia. Esta matriz de transformación se define como:

$${}^{i-1} T_i = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6.2.6)$$

el empleo de matrices de transformación homogénea es ineficiente desde el punto de vista numérico, ya que se trabaja con términos nulos que conducen a operaciones superfluas.

### 2.6.3 Análisis de velocidad y aceleración.

La ubicación de la mano o herramienta está dada por el vector de posición  $\underline{u}$  definido como:

$$\underline{u}(\theta) = [{}_{1,2}^1 a_1] + [{}_{1,2}^1 Q_1] [{}_{2,3}^2 a_2] + \dots + [{}_{1,2}^1 Q_1] [{}_{2,3}^2 Q_2] \dots \dots [{}_{n-1,n}^{n-1} Q_{n-1}] [{}_{n,n-1}^n a_n] \quad (2.6.3.1)$$

Para simplificar la notación, se indicará  $[{}_{1,1+1}^1 Q_1]$  con  $Q_1$  y  $[{}_{1,1+1}^1 a_1]$  con  $a_1$ .

por lo tanto, la ecuación (2.6.3.1) resulta en :

$$\underline{u}(\theta) = a_1 + Q_1 a_2 + \dots + Q_1 Q_2 \dots Q_{n-1} a_n \quad (2.6.3.2)$$

La velocidad de la mano se obtiene derivando la ec.(2.6.3.2) con respecto al tiempo, obteniéndose.

$$\dot{\underline{u}} = \dot{a}_1 + Q_1 \dot{a}_2 + \dot{Q}_1 a_2 + \dots + Q_1 Q_2 \dots Q_{n-1} \dot{a}_n + \dots + \dot{Q}_1 Q_2 \dots Q_{n-1} a_n + \dots + \dot{Q}_1 Q_2 \dots Q_{n-1} \dot{a}_n \quad (2.6.3.3)$$

definiendo la matriz de velocidad angular como:

$$\underline{\Omega} = \dot{Q}_1 Q_1^T = \theta_1 \underline{e} \times \underline{1} \quad (2.6.3.4)$$

y considerando las propiedades de las matrices ortonormales

$$Q_1^T Q_1 = \underline{1} \quad (2.6.3.5)$$

siendo  $\underline{e} = (0, 0, 1)^T$  el vector unitario paralelo al eje de rotación y  $\underline{1}$  es la matriz identidad.

Aplicando las ecs.(2.6.3.4 y 2.6.3.5) en la ec.(2.6.3.3) se tiene :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}} = & \dot{\tilde{a}}_1 + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_1^T \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_1^T \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \tilde{Q}_2^T \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \dots + \\ & + \tilde{\omega}_{n-1} \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n \end{aligned} \quad (2.6.3.6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}} = & \dot{\tilde{a}}_1 + \theta_1 e \times \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + \theta_1 e \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \theta_2 \tilde{Q}_1 [ e \times \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 ] + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \\ & + \dots + \tilde{\omega}_{n-1} \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n + \tilde{Q}_1 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n \end{aligned}$$

además se tiene que

$$\dot{\tilde{a}}_k = \theta_k e \times \tilde{a}_k \quad k = 1, 2, \dots, n-1$$

teniendo al sustituir.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}} = & \theta_1 e \times \tilde{a}_1 + (\theta_1 e + \theta_2 \tilde{Q}_1 e) \times \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + (\theta_1 e + \theta_2 \tilde{Q}_1 e + \theta_3 \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 e) \times \\ & \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \dots + \tilde{\omega}_{n-1} \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n + \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dots \theta_n e \times \tilde{a}_n \end{aligned} \quad (2.6.3.7)$$

para simplificar, las diferentes velocidades angulares pueden definirse y calcularse recursivamente como:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_1 &= \theta_1 e \\ \tilde{\omega}_2 &= (\tilde{\omega}_1 + \theta_2 \tilde{Q}_1 e) \\ &\vdots \\ \tilde{\omega}_n &= \tilde{\omega}_{n-1} + \theta_n \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} e \end{aligned} \quad (2.6.3.8)$$

Entonces la ec.(2.6.3.7), resulta:

$$\dot{\tilde{u}} = \tilde{\omega}_1 \times \tilde{a}_1 + \tilde{\omega}_2 \times \tilde{Q}_1 \dot{\tilde{a}}_2 + \tilde{\omega}_3 \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dot{\tilde{a}}_3 + \dots + \tilde{\omega}_n \times \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 \dots \tilde{Q}_{n-1} \dot{\tilde{a}}_n \quad (2.6.3.9)$$

Simplificando la expresión tenemos:

$$\dot{\tilde{u}} = \tilde{\omega}_1 \times \tilde{a}_1 + \tilde{\omega}_2 \times [\tilde{a}_2]_1 + \dots + \tilde{\omega}_n \times [\tilde{a}_n]_1 \quad (2.6.3.10)$$

Este resultado también puede obtenerse recursivamente.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}}_1 &= \dot{\tilde{a}}_1 + \tilde{\omega}_1 \times \tilde{a}_1 \\ \dot{\tilde{u}}_2 &= \dot{\tilde{u}}_1 + \tilde{\omega}_2 \times [\tilde{a}_2]_1 \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{u}}_n &= \dot{\tilde{u}}_{n-1} + \tilde{\omega}_n \times [\tilde{a}_n]_1 \end{aligned} \quad (2.6.3.11)$$

La aceleración lineal se obtiene derivando la ec. (2.6.3.10) con respecto al tiempo.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{u}}_1 &= \dot{\tilde{\omega}}_1 \times \tilde{a}_1 + \tilde{\omega}_1 \times \dot{\tilde{a}}_1 = \dot{\tilde{\omega}}_1 \times \tilde{a}_1 + \tilde{\omega}_1 \times (\tilde{\omega}_1 \times \tilde{a}_1) \\ \dot{\tilde{u}}_2 &= \dot{\tilde{u}}_1 + \dot{\tilde{\omega}}_2 \times [\tilde{a}_2]_1 + \tilde{\omega}_2 \times (\tilde{\omega}_2 \times [\tilde{a}_2]_1) \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{u}}_n &= \dot{\tilde{u}}_{n-1} + \dot{\tilde{\omega}}_n \times [\tilde{a}_n]_1 + \tilde{\omega}_n \times (\tilde{\omega}_n \times [\tilde{a}_n]_1) \end{aligned} \quad (2.6.3.12)$$

La aceleración angular se obtiene al derivar la ec. (2.6.3.8) con respecto al tiempo quedando.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}}_1 &= \dot{\theta}_1 e_{1-1} \\ \dot{\tilde{\omega}}_2 &= \dot{\tilde{\omega}}_1 + \dot{\theta}_2 e_{2-2} + \tilde{\omega}_2 \times \theta_2 e_{2-2} \\ &\vdots \\ \dot{\tilde{\omega}}_n &= \dot{\tilde{\omega}}_{n-1} + \dot{\theta}_n e_{n-n} + \tilde{\omega}_n \times \theta_n e_{n-n} \end{aligned} \quad (2.6.3.13)$$

siendo en este caso  $e_{n-n} = Q_1 Q_2 \dots Q_{n-1} e_{1-1}$

Con las ecuaciones anteriores se tienen las bases para el cálculo de la cinemática directa, al emplear en algunos casos recursividad, lo cual incrementa la eficiencia de cálculo, al ejecutarse operaciones mínimas y aprovechar cálculos previamente realizados.

## 2.7- Cinemática inversa.

### 2.7.1- Introducción.

El problema cinemático inverso, para sistemas articulados, consiste en determinar los valores de las variables que definen a cada par inferior que integra al sistema articulado y sus variaciones con el tiempo, conocida la historia de posición, velocidad y aceleración de uno de sus eslabones.

Dependiendo de la tarea a realizar, las estructuras requeridas de los manipuladores son diferentes, es decir, cuando solo se requiere que la herramienta se posicione en un punto en el

espacio de la trayectoria y no es importante su orientación, una estructura con tres grados de libertad es suficiente, si la herramienta tiene que mover un plano, es decir se desea colocar un vidrio redondo en alguna pieza para ensamble, una estructura con cuatro grados de libertad es suficiente, si se trata de posicionar una línea, cinco grados de libertad son suficientes, y para colocar y orientar un cuerpo rígido en el espacio una estructura con seis grados de libertad es necesaria.

Aquí será tratada una estructura con cinco grados de libertad y su cinemática inversa, ya que en algunas aplicaciones industriales, tales como la soldadura con arco eléctrico y el pintado en spray, se requiere el movimiento de piezas con ejes de simetría a través de un conjunto de configuraciones preescritas.

El algoritmo está basado en un sistema algebraico sobredeterminado no lineal de seis ecuaciones con cinco incógnitas, el cual resulta de la ubicación de dos puntos de un cuerpo rígido, siendo aplicable también cuando sólo interesa la ubicación de un solo punto. Una línea queda completamente definida al fijar dos puntos de ella. Para el cálculo de las dos primeras derivadas de las variables de las uniones que integran el sistema articulado se requiere la velocidad y la aceleración de cualquier par de puntos del eje de simetría. Como se trata de ubicar un cuerpo rígido, es necesario satisfacer la condición de compatibilidad, la cual establece que la distancia entre dos puntos de cualquier línea es constante a través del movimiento. Para ubicar un punto en el espacio se requiere una estructura flexible con tres articulaciones, por lo que se aprovecha la estructura definida al modelar el caso de cinco articulaciones para un punto. Las variables en cada articulación son obtenidas mediante el método de Newton - Gauss. El objetivo es formar un algoritmo capaz de operar en tiempo real y con él resolver el problema de control asociado con la conducta de la mano.

La solución del problema cinemático inverso se obtiene empleando un proceso iterativo, que requiere en cada iteración la solución de un sistema sobredeterminado por mínimos cuadrados. Obteniéndose un algoritmo robusto que elimina errores

### 2.7.2- Análisis de desplazamiento.

Aplicando el método y la notación de Denavit y Hartenberg (1964), descrita en la sección (2.6.1). El problema se limita a la posición y orientación de una línea. El problema es resuelto determinando las cinco variables ( Tsai y Morgan 1984 ) que están asociadas con la articulación del manipulador. Sea la línea  $\underline{SS}, S$  el eje de simetría de la mano o herramienta, posicionada y orientada en el espacio, si se conoce la distancia  $h$  entre estos puntos el problema está completamente definido. Si se especifican los vectores de posición como  $\underline{ss}$  y  $\underline{s}$  respectivamente se debe satisfacer la condición.

$$(\underline{ss} - \underline{s})^T (\underline{ss} - \underline{s}) = h^2 \quad (2.7.2.1)$$

Sean  $\underline{ss}$  y  $\underline{s}$  los vectores a través de los eslabones, los cuales depende de  $\theta$ , este último es el vector de incógnitas que contiene los pares de rotación ( o un prismático ) es decir  $\theta^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5]$  si todos los pares son de rotación, en caso contrario  $\theta_i = b_i$  en la  $i$ -ésima articulación.

Los vectores  $\underline{ss}$  y  $\underline{s}$  se calculan aplicando un esquema recursivo similar al de Horner, para calcular el polinomio ( Angeles 1985) teniéndose.

$$\begin{aligned} \underline{ss}_4 &= \underline{a}_4 \\ \underline{ss}_k &= \underline{a}_k + Q_k \underline{a}_{k+1} \quad k= 3,2,1 \end{aligned} \quad (2.7.2.2)$$

$$\begin{aligned} \underline{s}_5 &= \underline{a}_5 \\ \underline{s}_j &= \underline{a}_j + Q_j \underline{a}_{j+1} \quad j= 4,3,2,1 \end{aligned} \quad (2.7.2.3)$$

Las ecuaciones de cerradura en desplazamiento son:

$$f_1(\theta) = \underline{ss}_1 - \underline{ss} = 0 \quad (2.7.2.4a)$$

$$f_2(\theta) = \underline{s}_1 - \underline{s} = 0 \quad (2.7.2.4b)$$

La cuales forman un sistema no lineal con seis ecuaciones y

cinco incógnitas, definido como.

$$f(\theta) = \begin{bmatrix} f_1(\theta) \\ f_2(\theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.7.2.5)$$

Los datos  $\underline{s}$  y  $\underline{ss}$  son consistentes (verifican la ec. 2.7.2.1)), el sistema sobredeterminado dado en la ec. (2.7.2.5) es únicamente formal y una aproximación de mínimos cuadrados da la solución.

El método de Newton - Gauss consiste en proponer una configuración inicial  $\theta_0$  cercana a la solución y se realiza una secuencia monótona hacia la solución, el esquema iterativo es.

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta\theta^k \quad (2.7.2.6)$$

donde  $\Delta\theta^k$  se calcula de la serie de Taylor truncada de  $f(\theta)$  alrededor de  $\theta = \theta^k$ , reteniendo únicamente los términos de primer orden, los que exigen que los incrementos  $\Delta\theta$  sean pequeños y permite escribir.

$$J(\theta^k) \Delta\theta^k = -f(\theta^k) \quad (2.7.2.7)$$

donde  $J(\theta)$  es la matriz jacobiana que se evalúa en  $\theta_i$  y se calcula a partir de:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \partial f_1(\theta) / \partial \theta \\ \partial f_2(\theta) / \partial \theta \end{bmatrix}$$

Cuando  $\theta_1$  está asociado a un par de rotación

$$\begin{aligned} \partial f_1(\theta) / \partial \theta_1 &= \partial ss_1 / \partial \theta_1 = Q_1 \dots Q_{1-1} (\underline{e} \times ss_1) \\ \partial f_2(\theta) / \partial \theta_1 &= \partial s_1 / \partial \theta_1 = Q_1 \dots Q_{1-1} (\underline{e} \times s_1) \end{aligned}$$

y si está asociado a un par prismático.

$$\begin{aligned} \partial f_1(\theta) / \partial \theta_1 &= \partial ss_1 / \partial \theta_1 = Q_1 \dots Q_{1-1} \underline{e} \\ \partial f_2(\theta) / \partial \theta_1 &= \partial s_1 / \partial \theta_1 = Q_1 \dots Q_{1-1} \underline{e} \end{aligned}$$

donde  $\underline{e}$  es el vector unitario asociado al par  $i$ , paralelo al eje  $Z_i$ .

La ec.(2.7.2.7) representa un sistema algebraico de seis ecuaciones en cinco incógnitas y contiene 5 ecuaciones linealmente independientes, en este caso  $f(\theta^k)$  se encuentra en el rango de  $J(\theta^k)$ , si y solo si, los puntos SS y S no violan la condición de rigidez. Bajo estas condiciones  $J(\theta)$  no puede invertirse para obtener una solución, por lo tanto, la solución se obtiene por mínimos cuadrados, siendo las reflexiones de Householder( Golub 1983 ) la forma más eficiente de lograrlo, estas reflexiones producen implícitamente la inversa generalizada de  $J(\theta)$ , esto es.

$$\Delta\theta^k = J^I(\theta^k) f(\theta^k) \quad (2.7.2.8)$$

con  $J^I(\theta^k)$  definido como

$$J^I(\theta^k) = [ J^T(\theta^k) J(\theta^k) ]^{-1} J^T(\theta^k)$$

la cual se conoce como la inversa generalizada de " Moore - Penrose ".

El método empleado para obtener  $\Delta\theta^k$  se realiza en dos etapas, en la primera se descompone la matriz  $J(\theta)$  numericamente dada en la ec.(2.7.2.7) en triangular superior mediante reflexiones de Householder ( Moler 1973 ) y en la segunda etapa la sustitución regresiva para obtener los valores de  $\Delta\theta^k$ . El criterio de convergencia es.

$$|| \Delta\theta^k || < \epsilon \quad (2.7.2.9)$$

donde  $\epsilon$  es la tolerancia preescrita.

En forma semejante a la descrita se procede cuando se tienen tres articulaciones, las ecuaciones de cerradura en este caso se expresan como.

$$f(\theta) = \underline{a}_1 + Q_1 \underline{a}_2 + Q_1 Q_2 \underline{a}_3 - r = 0 \quad (2.7.2.10)$$

que forma un sistema no lineal con tres componentes en

tres incógnitas, que también es resuelto aplicando aproximaciones lineales mediante el método de Newton - Gauss, solo que  $J^I(\theta)$  se transforma en  $J^{-1}(\theta)$ . La solución por mínimos cuadrados es correcta ya que las reflexiones de Householder no alteran la condición de la matriz  $J(\theta)$ , por lo cual no alteran los resultados.

### 2.7.3- Análisis de velocidad.

Las velocidades de los pares cinemáticos se calculan a partir de la ec. (2.7.2.4) la cual se deriva con respecto al tiempo, en este caso son conocidas las velocidades  $\underline{\underline{s}}\dot{s}$  y  $\underline{\underline{s}}\dot{\dot{s}}$ , es decir.

$$\underline{\underline{s}}\dot{s} = \left( \frac{\partial \underline{\underline{s}}s_1}{\partial \theta} \right) \dot{\theta} \quad (2.7.3.1a)$$

$$\underline{\underline{s}}\dot{\dot{s}} = \left( \frac{\partial \underline{\underline{s}}_1}{\partial \theta} \right) \dot{\theta} \quad (2.7.3.1b)$$

que conduce al sistema

$$J(\theta)\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{\underline{s}}s_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \underline{\underline{s}}_1}{\partial \theta} \end{bmatrix} \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{s}}\dot{s} \\ \underline{\underline{s}}\dot{\dot{s}} \end{bmatrix} \quad (2.7.3.2)$$

cuya solución se obtiene por reflexiones de Householder, ya que la triangulación de  $J(\theta)$  se calculó al obtener la convergencia en la ec. (2.7.2.8), solo que requiere la sustitución regresiva.

### 2.7.4- Análisis de aceleración.

El cálculo de  $\ddot{\theta}$  se obtiene derivando la ec. (2.7.2.10) con respecto al tiempo y con los valores  $\underline{\underline{s}}\dot{s}$  y  $\underline{\underline{s}}\dot{\dot{s}}$  congruentes con la aceleración del cuerpo rígido conduce a.

$$\underline{\underline{s}}\ddot{s} = \left[ \frac{\partial \underline{\underline{s}}s_1}{\partial \theta} \right] \ddot{\theta} + \left[ \left( \frac{\partial^2 \underline{\underline{s}}s_1}{\partial \theta^2} \right) \dot{\theta} \right] \dot{\theta} \quad (2.7.4.1a)$$

$$\underline{\underline{s}}\ddot{\dot{s}} = \left[ \frac{\partial \underline{\underline{s}}_1}{\partial \theta} \right] \ddot{\theta} + \left[ \left( \frac{\partial^2 \underline{\underline{s}}_1}{\partial \theta^2} \right) \dot{\theta} \right] \dot{\theta} \quad (2.7.4.1b)$$

donde, para pares de rotación, la derivada segunda de  $\underline{\underline{s}}s_1$  es

$$\frac{\partial^2 \underline{s}_1}{\partial \theta_j \partial \theta_i} = Q_1 \dots Q_{i-1} e^{-x} \left( -\frac{\partial \underline{s}_1}{\partial \theta_j} \right) \quad \begin{matrix} i=1,2,3,\dots \\ j=1,i+1,\dots \end{matrix}$$

y para pares prismáticos, la derivada existe si  $i < j$ , si no es así, la derivada es nula, o sea

$$\frac{\partial^2 \underline{s}_1}{\partial \theta_j \partial \theta_i} = Q_1 \dots Q_{i-1} e^{-x} \left( \frac{\partial \underline{s}_1}{\partial \theta_j} \right) \quad i < j$$

Reordenando la ec. (2.7.3.2), conduce a

$$J(\theta) \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{s} - [(\frac{\partial^2 \underline{s}_1}{\partial \theta} \dot{\theta}) \dot{\theta}] \dot{\theta} \\ \dot{s} - [(\frac{\partial^2 \underline{s}_1}{\partial \theta} \dot{\theta}) \dot{\theta}] \dot{\theta} \end{bmatrix} = g \quad (2.7.4.2)$$

En ésta última ecuación, para obtener los valores del vector  $\dot{\theta}$  sólo se requiere la sustitución hacia atrás, ya que  $J(\theta)$  se triangulizó al obtenerse la solución del vector  $\theta$ .

## 2.8 - Planificación de trayectoria.

Los esquemas de planificación de trayectorias, generalmente interpolan o aproximan el camino deseado, generan una secuencia de puntos de consigna para su control a lo largo del tiempo, con el fin de controlar el manipulador desde su posición inicial hasta su destino. Los puntos extremos del camino pueden ser especificados en coordenadas de la articulación o en coordenadas cartesianas. Se suele especificar en coordenadas cartesianas, porque es más fácil visualizar las configuraciones correctas de la mano o herramienta en dichas coordenadas que en coordenadas de articulación.

Con bastante frecuencia, existe una serie de trayectorias posibles entre los dos puntos extremos dados. Por ejemplo, se puede necesitar mover la mano o herramienta a lo largo de una línea recta (trayectoria en línea recta): o mover la herramienta a lo largo de una trayectoria polinomial uniforme que satisface la unión de posición y orientación en ambos puntos

extremos ( trayectoria de la articulación interpolada ).

Para la planificación de las variables de articulación se planifica la historia temporal de todas las variables de articulación y de sus dos primeras derivadas respecto al tiempo para describir el movimiento deseado del manipulador. Para la planificación en el espacio cartesiano se define la historia temporal de la posición de la mano del manipulador, su velocidad y se definen las correspondientes posiciones, velocidades y aceleraciones de la articulación a partir de la información de la mano (cinemática inversa). En la actualidad ha crecido el interés por la aplicación de síntesis de curvas. Este método permite al diseñador modificar las propiedades geométricas de la curva en los puntos de interés, mediante adecuadas modificaciones en algunos parámetros de la curva interpolada, permaneciendo los puntos de apoyo sin cambio. La síntesis de funciones y de curvas planas puede realizarse por medio de funciones SPLINE que satisfacen propiedades geométricas locales ( pendientes, curvas etc. ) prescritas. Al introducir funciones SPLINE con puntos de apoyo indeterminados, las coordenadas de éstas son tratadas como un conjunto finito de incógnitas, y determinadas mediante la solución de un sistema algebraico ( lineal o no lineal ) de ecuaciones.

El empleo de curvas SPLINE garantiza, la obtención de una curva continua para el manipulador, al pasar por la trayectoria que une los puntos, y no este sujeto a cambios que provoquen discontinuidad en la aceleración, lo que a su vez puede provocar discontinuidad en los esfuerzos a que esta sometida la estructura.

Para situar el problema en el contexto del análisis numérico es necesario ubicar el empleo de curvas SPLINE dentro de la solución de ecuaciones. Para esto, considerense las transformaciones siguientes.

$$T(x) = y$$

donde  $x \in X$ ,  $y \in Y$ , siendo  $X$  y  $Y$  espacios lineales, no necesariamente de la misma dimensión, en tanto que  $T$  es una

transformación de X a Y.

~~De la relación anterior se pueden reconocer tres tipos de~~  
problemas, a saber:

1. Problema directo: datos T y x, calcular y
2. Problema inverso: datos T y y, calcular x
3. Problema de identificación: datos x y y, determinar T.

En el lenguaje de ingeniería, x, y y T representan la excitación, la respuesta y el sistema, respectivamente.

Así, en el problema directo se trata de determinar la respuesta generada por un sistema con excitación conocida. El problema inverso es buscar una excitación que genere una respuesta conocida. En el problema de identificación se tienen que determinar las leyes que rigen el sistema a partir de una relación conocida entre la excitación y la respuesta.

El problema directo es relativamente fácil de tratar, mientras que el problema inverso, por sus aplicaciones importantes, ocupa un plano central en el análisis numérico.

El caso de identificación es el más difícil, ya que mediante un número finito de observaciones, se tienen que encontrar las leyes que gobiernan un sistema. Esto es generalmente imposible de realizar, a menos que se tenga información específica sobre la estructura del sistema.

El problema de la aproximación de funciones es un caso especial del de identificación y consiste en determinar una función que pase por un conjunto de puntos  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , donde n es el número de puntos de muestra.

Uno de los métodos más conocidos de aproximación es la interpolación polinómica, la cual consiste en determinar un polinomio  $P_n(t)$  (polinomio de grado n) que tome valores prescritos  $y_i$  en ciertos puntos  $x_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ .

Una de las formas más eficientes de obtener continuidad tanto en la primera como en la segunda derivada simultáneamente, es por medio del empleo de funciones SPLINE.

Una función SPLINE es un polinomio cúbico definido por tramos de la forma.

$$f_k(x) = A_k (X - X_k)^3 + B_k (X - X_k)^2 + C_k (X - X_k) + D_k$$

para  $k = 1, 2, \dots, n-1$

$$X_{k-1} < X_k < X_{k+1}$$

donde  $n$  es el número de puntos de apoyo, en tanto que  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$  y  $D_k$  son coeficientes de la SPLINE.

Para determinar los coeficientes se evalúan  $f_k$ ,  $f'_k$ ,  $f''_k$  para  $X_k$  y  $X_{k+1}$  obteniéndose los siguientes valores.

$$A_k = \frac{1}{6\Delta X_k} (Y''_{k+1} - Y''_k) = \frac{\Delta Y''_k}{6\Delta X_k}$$

$$B_k = \frac{1}{2} Y''_k$$

$$C_k = \frac{\Delta Y_1}{\Delta X_k} - \frac{1}{6} \Delta X_k (Y''_{k+1} + 2Y''_k)$$

$$D_k = Y_k$$

Para la evaluación de los coeficientes, es necesario imponer condiciones de frontera, así como las condiciones del tiempo de recorrido.

## 2.9 - Análisis dinámico del manipulador.

El control del manipulador exige un conocimiento preciso de las variables que actúan en cada articulación. El control de una articulación depende del conocimiento de las fuerzas que están actuando sobre ella y de las inercias que se reflejan en ella decada uno de los eslabones ( las masas de las articulaciones y los enlaces del manipulador ). La dinámica del robot trata con la formulación matemática que da lugar a las ecuaciones de

movimiento que rigen el brazo. Las ecuaciones de movimiento del manipulador son un conjunto de ecuaciones que describen la fuerzas dinámicas en cada articulación, tales ecuaciones son útiles para la simulación en computadora de las fuerzas y pares en el robot, para el diseño de un control apropiado y para la evaluación del diseño y estructura del brazo.

El modelo dinámico de un robot se puede obtener a partir de las leyes físicas, conocidas tales como las leyes de la mecánica Newtoniana y Lagrangiana. Esto conduce a las ecuaciones de movimiento dinámico para las diversas articulaciones del manipulador en términos de los parámetros geométricos e inerciales de los elementos. Mediante estas formulaciones se obtienen diferentes formas de describir la dinámica del brazo del robot, estas ecuaciones de movimiento son equivalentes unas a otras en el sentido de que describen la conducta dinámica del mismo manipulador. Sin embargo sus estructuras pueden diferir porque se obtienen mediante diferentes razonamientos y objetivos. Algunas ecuaciones son para lograr tiempos de cálculo mínimo en la evaluación de los momentos que actúan en las articulaciones nominales, para controlar el manipulador, otras se obtienen para facilitar el análisis y la síntesis del control, así como para obtener la simulación en computadora del movimiento del manipulador.

### 2.9.1 - Ecuaciones de Newton - Euler.

Las ecuaciones de Newton - Euler incluyen las fuerzas de restricción internas del manipulador, que no se requieren en el problema dinámico inverso, el cual consiste en evaluar las fuerzas y momentos necesarios en cada articulación necesarias. Como una alternativa para obtener ecuaciones de movimiento más eficientes, algunos investigadores recurrieron a la segunda ley de Newton y a las ecuaciones de Euler, desarrollaron diversas formas de ecuaciones de movimiento en base a las de Newton - Euler para una cadena cinemática abierta. Estas formulaciones

cuando se aplican a un robot resultan en un conjunto de ecuaciones cinemáticas recursivas hacia adelante (es decir a partir de la base) hacia atrás ( a partir de la mano ) con terminos vectoriales. El aspecto más significativo de esta formulación es que el tiempo de cálculo de los pares aplicados se pueden reducir suficientemente para permitir un control en tiempo real.

La obtención se basa en el principio de D'Alambert, aplicado a cada elemento del manipulador, se tomará como;

- $m_1$  = masa total del elemento 1, es un escalar.
- $\hat{r}_1$  = posición del centro de masa del elemento 1 desde el origen del sistema de referencia de la base.
- $\hat{v}_1 = d \hat{r}_1 / dt$ , velocidad del centro de masa del elemento 1, referido al sistema coordenado de la base.
- $f_1$  = vector de fuerza externa ejercido en el elemento 1.
- $n_1$  = vector de momentos externos ejercidos en el elemento 1.
- $J_1$  = matriz de inercia del elemento 1 sobre el centro de masa referido a la base

Cuando los efectos de rozamiento viscoso son omitidos.

$$f_1^* = \frac{d}{dt} ( m_1 \hat{v}_1 ) = m_1 \dot{\hat{v}}_1 \quad (2.9.1.1)$$

$$n_1^* = \frac{d}{dt} ( J_1 \omega_1 ) = J_1 \dot{\omega}_1 + \omega_1 \times ( J_1 \omega_1 ) \quad (2.9.1.2)$$

donde  $\omega_1$  y  $\dot{\omega}_1$  son obtenidas de las ecs. (2.6.3.11 y 2.6.3.13), respectivamente.

Por conveniencia se omitieron los efectos de rozamiento viscoso esto serán conciderados posteriormente y sumados a las ecuaciones de fuerza generalizada ( fuerza/torque  $\tau_1$  ).

Refiriendose a la figura ( 2.9.1 ), donde  $O'$  está situado en el centro de masa, en ella se muestran los vectores,  $u_{1-1}$ ,  $u_1$ ,  $a_1$ ,  $\hat{r}_1$ , y  $\hat{\rho}_1$ .

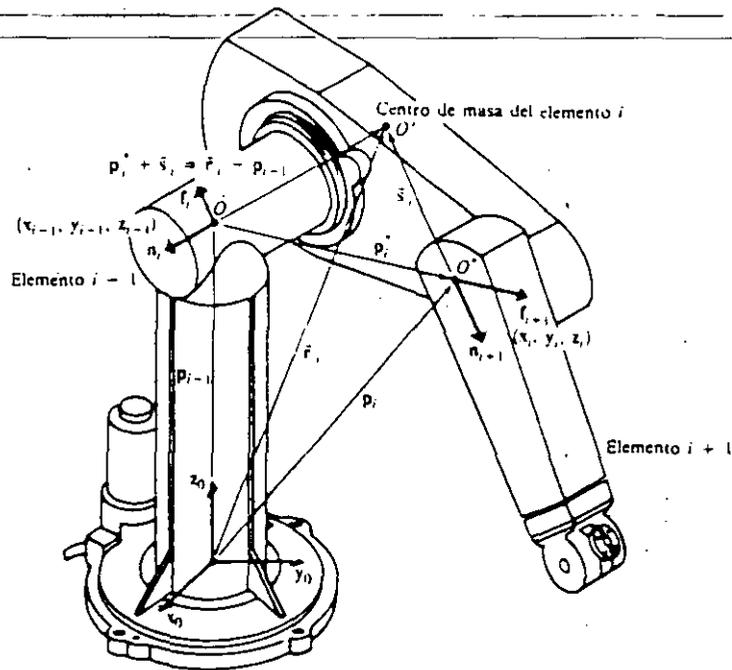


Figura (2.9.1)- Fuerzas y momentos sobre el elemento i.

De la figura , se concluye que  $d \hat{\rho}_1 / dt = 0 = d^2 \hat{\rho}_1 / dt^2$ ,  
consecuentemente.

$$\hat{v}_1 = \omega_1 \times \hat{\rho}_1 + \dot{u}_1 \quad (2.9.1.3)$$

$$\dot{\hat{v}}_1 = \dot{\omega}_1 \times \hat{\rho}_1 + \omega_1 \times (\omega_1 \times \hat{\rho}_1) + \dot{u}_1' \quad (2.9.1.4)$$

donde  $\dot{u}_1$  y  $\dot{u}_1'$  estan expresados en las ecs. ( 2.6.3.10 - 12)

Las fuerza  $f_1$  y  $f_{1+1}$  en el eslabón y momentos  $n_1$  son ejercidos por los eslabones i-1 e i+1 respectivamente. Con referencia a la figura (2.9.1), se toma :

$f_1$  = fuerza aplicada en el elemento i por el elemento i-1.

$n_1$  = momento aplicado en el elemento i por el elemento i-1.

de tal forma que.

$$f_1^* = f_1 - f_{1+1} \quad (2.9.1.5)$$

$$n_1^* = n_1 - n_{1+1} + (u_{i-1} - \hat{r}_1) \times f_1 - (u_i - \hat{r}_1) \times f_{1+1}$$

$$= n_1 - n_{1+1} + (u_{1-1} - \hat{r}_1) \times F_1 - a_1 \times f_{1+1} \quad (2.9.1.6)$$

siendo  $(\hat{r}_1 - u_{1-1}) = (a_1 + \rho_1)$ , entonces de las ecs. (2.9.1.5 y 2.9.1.6) se obtiene una relación recursiva a partir de la mano o herramienta en la siguiente forma.

$$f_1 = f_{1+1} + f_1^* \quad (2.9.1.7)$$

$$n_1 = n_{1+1} + a_1 \times f_{1+1} + (u_1 + \hat{\rho}_1) \times f_1^* + n_1^* \quad (2.9.1.8)$$

donde  $f_{1+1}$  y  $n_{1+1}$  con  $i =$  número de grados de libertad del manipulador, representa la fuerza y el par que ejerce la herramienta sobre la pieza o medio externo al manipulador, estas ecuaciones se emplean para obtener las fuerzas y momentos  $(f_1, n_1)$  en los elementos del manipulador, el momento requerido en cada par se obtiene proyectando  $n_1$  sobre el eje que define al par esto es  $\tau_1 = n_1^T A_1 e$ . La recursividad necesaria hacia adelante, a partir de la base, propaga información cinemática tal como velocidad, aceleración angular y lineal. La recursividad hacia atrás propaga las fuerzas ejercidas sobre cada elemento desde la mano del manipulador hasta el sistema de referencia de la base, y los pares que se aplican en las articulaciones se calculan a partir de estas fuerzas.

Una desventaja obvia de las anteriores ecuaciones de movimiento es que todas las matrices inerciales  $J_1$  y los parámetros físicos-geométricos se refieren al sistema de coordenadas de la base. Como resultado de ello, cambian cuando el brazo del robot se mueve. Luh realizó mejoras a las ecuaciones de movimiento de N-E al referir todas las velocidades, aceleraciones, matrices de inercia, localización del centro de masa de cada elemento y fuerza/momento a su propio sistema de coordenadas. Debido a la naturaleza sistemática, los pares de las articulaciones, se calculan en forma más simple. La consecuencia más importante de esta modificación es en el tiempo de cálculo de los pares aplicados, estas son linealmente proporcionales al número de articulaciones del brazo e independientes de la configuración del mismo.

Esto permite la realización de un algoritmo de control en tiempo-real para un brazo en el espacio de las variables de articulación.

Sea  $Q_{1-1}$  una matriz de rotación  $3 \times 3$  que trasforma cualquier vector con referencia al sistema coordenado  $(X_1, Y_1, Z_1)$  al sistema coordenado  $(X_{1-1}, Y_{1-1}, Z_{1-1})$ , se define el siguiente producto.

$$A_1 = Q_1 Q_2 \dots Q_i \quad (2.9.1.9)$$

como cada sistema coordenado es ortonormal, entonces.

$$A_1 = A_1^T \quad (2.9.1.10)$$

en lugar de calcular  $\omega_1, \dot{\omega}_1, v_1, \dot{v}_1, f_1^*, n_1^*, f_1, \tau_1$  que se refieren al sistema de coordenadas de la base, calculamos.

$$A_{1+1}^T \omega_{1+1} = \begin{cases} Q_{1+1}^T ( Q_1^T \omega_1 + e \dot{q}_{1+1} ), & \text{si el elemento } 1+1 \text{ es rotacional.} \\ Q_{1+1}^T ( Q_1^T \omega_1 ), & \text{si el elemento } 1+1 \text{ es translacional.} \end{cases} \quad (2.9.1.11)$$

en donde  $q_1$  es la variable de articulación ( $\theta_1, \theta_1, \theta_1$  o  $b_1, b_1, b_1$ )

$$A_{1+1}^T \dot{\omega}_{1+1} = \begin{cases} Q_{1+1}^T [ Q_1^T \dot{\omega}_1 + e \dot{q}_{1+1} + ( Q_1^T \omega_1 ) \times ( e \dot{q}_{1+1} ) ] & \text{si el elemento } 1+1 \text{ es rotacional.} \\ Q_{1+1}^T ( A_1^T \dot{\omega}_1 ), & \text{si el elemento } 1+1 \text{ es translacional.} \end{cases}$$

donde  $e^T = (0, 0, 1)$

$$A_{i+1}^T v_{i+1} = \begin{cases} (A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times (A_{i+1}^T u_{i+1}) + Q_{i+1}^T (A_{i+1}^T v_i) \\ \text{si el elemento } i+1 \text{ es} \\ \text{rotacional.} \\ A_{i+1} (e \dot{q}_{i+1} + A_{i+1}^T v_i) + (A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times (A_{i+1}^T a_{i+1}) \\ \text{si el elemento } i+1 \text{ es} \\ \text{translacional.} \end{cases}$$

(2.9.1.12)

$$A_{i+1}^T \dot{v}_{i+1} = \begin{cases} (Q_{i+1}^T \dot{\omega}_{i+1}) \times (Q_{i+1}^T a_{i+1}) + (A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times \\ [(A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times (A_{i+1}^T a_{i+1})] + Q_{i+1}^T (A_{i+1}^T \dot{v}_i) \\ \text{si el elemento } i+1 \text{ es rotacional} \\ Q_{i+1}^T (e \ddot{q}_{i+1} + A_{i+1}^T \dot{v}_i) + (A_{i+1}^T \dot{\omega}_{i+1}) \times (A_{i+1}^T a_{i+1}) \\ + 2 (A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times (A_{i+1}^T e \dot{q}_{i+1}) + \\ + (A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times [(A_{i+1}^T \omega_{i+1}) \times (A_{i+1}^T a_{i+1})] \\ \text{si el elemento } i+1 \text{ es translacional.} \end{cases}$$

(2.9.1.13)

$$A_i^T f^* = m_i A_i^T \dot{v}_i \quad (2.9.1.14)$$

$$A_i^T n_i^* = (A_i^T J_i A_i) (A_i^T \dot{\omega}_i) + (A_i^T \omega_i) \times [(A_i^T J_i A_i) (A_i^T \omega_i)] \quad (2.9.1.15)$$

donde  $A_i^T J_i A_i$  es la matriz de inercia del elemento  $i$  sobre su centro de masa referido al sistema de coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$ .

$$A_i^T v_i = (A_i^T \omega_i) \times (A_i^T \rho_i) + A_i^T v_i \quad (2.9.1.16)$$

donde  $A_i^T \rho_i$  es el centro de masa del elemento  $i$  referido a las coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$ .

$$A_{11}^T \dot{v}_1 = (A_{11}^T \dot{\omega}_1) \times (A_{11}^T \rho_1) + (A_{11}^T \omega_1) \times [(A_{11}^T \omega_1) \times (A_{11}^T \rho_1)] + A_{11}^T \dot{v}_1 \quad (2.9.1.17)$$

$$A_{11}^T f_1 = Q_1^T (A_{1+1}^T f_{1+1}) + A_{11}^T F_1 \quad (2.9.1.18)$$

$$A_{11}^T n_1 = Q_1^T [A_{1+1}^T n_{1+1} + (A_{1+1}^T a_1) \times (A_{1+1}^T f_{1+1})] + (A_{11}^T a_1 + A_{11}^T \rho_1) \times (A_{11}^T F_1) + A_{11}^T N_1 \quad (2.1.9.19)$$

$$\tau_1 = \begin{cases} (A_{11}^T n_1)^T (Q_1^T e) + b_1 \dot{q}_1, & \text{si el elemento } i \text{ es} \\ & \text{rotacional} \\ (A_{11}^T f_1)^T (Q_1^T e) + b_1 \dot{q}_1, & \text{si el elemento } i \\ & \text{es translacional.} \end{cases} \quad (2.1.9.20)$$

donde  $b_1$  es el coeficiente de rozamiento.

### 2.9.2 - Ecuaciones de Lagrange - Euler.

Las ecuaciones de movimiento para un manipulador se pueden expresar mediante la aplicación directa de las ecuaciones de Euler - Lagrange. Muchos investigadores utilizan la representación matricial de Denavit - Hartenberg para describir la relación entre los sistemas de coordenadas de elementos vecinos, así como obtener la información cinemática del elemento y emplear la dinámica Lagrangiana para deducir las ecuaciones del movimiento de un manipulador. La descripción mediante la energía cinética y potencial requerida en la formulación Lagrangiana resulta en una descripción algorítmica conveniente y compacta de las ecuaciones de movimiento del manipulador. El algoritmo se expresa mediante operaciones matriciales y facilita tanto el análisis como su realización en una computadora.

La derivación de las ecuaciones dinámicas de un manipulador con  $n$  grados de libertad se basa en los siguientes puntos:

- La ecuación de Euler - Lagrange expresada como.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_1} = \tau_1 - \frac{\partial V}{\partial q_1} \quad (2.9.2.1)$$

para  $i = 1, 2, \dots, n$

donde T se expresa como

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [ \omega_1^T J_1 \omega_1 + m_1 \dot{r}_1^T \dot{r}_1 ]$$

$$\text{y } V = V_0 - g^T r_1$$

siendo

T = energía cinética total del brazo.

V = energía potencial total del brazo.

V<sub>0</sub> = constante que depende de la referencia elegida.

q<sub>1</sub> = coordenadas generalizadas del brazo.

q̇<sub>1</sub> = primera derivada respecto al tiempo de las coordenadas generalizadas.

τ<sub>1</sub> = fuerza ( o par ) generalizado aplicado al sistema en la articulación 1 para mover el elemento 1.

Al desarrollar la ec.(2.9.2.1) se llega a la siguiente expresión ( A. Rojas S., Modelado dinámico de cadenas cinemáticas, 1987 )

$$\tau = \sum_1 \left[ \left[ \frac{\partial r_1}{\partial q} \right]^T m_1 \dot{r}_1 + A^T ( \omega_1 \times J_1 \omega_1 + J_1 \dot{\omega}_1 ) - m_1 g^T \frac{\partial r_1}{\partial q} \right]$$

la cual es similar a la de Newton - Euler donde se proyectan los terminos  $m_1 \dot{r}_1$  y  $\omega_1 \times J_1 \omega_1 + J_1 \dot{\omega}_1$  sobre las articulaciones correspondientes, ya que en este caso

$$A = [ e, Q_1 e, A_2 e, \dots, A_{1-1} e ]^T$$

En la ecuación de Euler - Lagrange anterior se requiere escoger adecuadamente un conjunto de coordenadas generalizadas para describir el sistema. Las coordenadas generalizadas se

utilizan como un conjunto de coordenadas que describen adecuadamente las articulaciones, de un sistema articulado con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

Dentro de los objetivos de éste trabajo no se incluye la descripción detallada de la formulación Euler - Lagrange, por lo cual se sugiere al lector referirse a los textos [1 y 10 ].

## 2.10 Tipos de actuadores.

Los actuadores son los dispositivos que proporcionan la fuerza motriz real para las articulaciones del robot. Los actuadores suelen obtener su energía a partir de una de estas tres fuentes, aire comprimido, fluido por presión o electricidad.

Los robots industriales que se encuentran en el mercado, están accionados por alguno de los siguientes tres tipos de sistema de actuadores:

1. Actuador hidráulico.
2. Actuador eléctrico.
3. Actuador neumático.

Los actuadores hidráulicos y eléctricos son los utilizados principalmente en los robots manipuladores existentes.

El actuador hidráulico suele estar asociado con los robots manipuladores de potencia. La ventaja del sistema de impulsión hidráulica es proporcionar mayor resistencia mecánica y potencia al mover grandes pesos. Los inconvenientes del sistema radican en la necesidad de espacio y en que es propenso a las fugas de aceite.

Los sistemas de impulsión hidráulicos están diseñados para actuar sobre articulaciones rotacionales o prismáticas. Pueden emplearse actuadores de paletas giratorias para proporcionar un movimiento de rotación o bien pueden utilizarse pistones hidráulicos para realizar un movimiento lineal.

Los sistemas de actuadores eléctricos suelen proporcionar velocidad pero no la potencia como los sistemas hidráulicos, la exactitud y la repetibilidad en los robots con actuadores eléctricos suelen ser mejor, son más funcionales en proporción al

peso. En consecuencia, los robots eléctricos tienden a ser más ligeros, con menos exigencia de espacio y sus aplicaciones tienden hacia un trabajo más preciso.

La economía es un factor para la decisión adecuada de su empleo, para la aplicación hidráulica en los robots de potencia y la eléctrica en los pequeños. Resulta que el costo de un motor eléctrico es proporcional a su tamaño, mientras que el costo de un sistema de actuadores hidráulicos depende en menor medida del mismo. En la figura ( 2.10.1 ) se muestra en forma conceptual un punto de equilibrio hipotético, por debajo del cual es conveniente utilizar la impulsión eléctrica y por encima es conveniente el uso de la impulsión hidráulica.

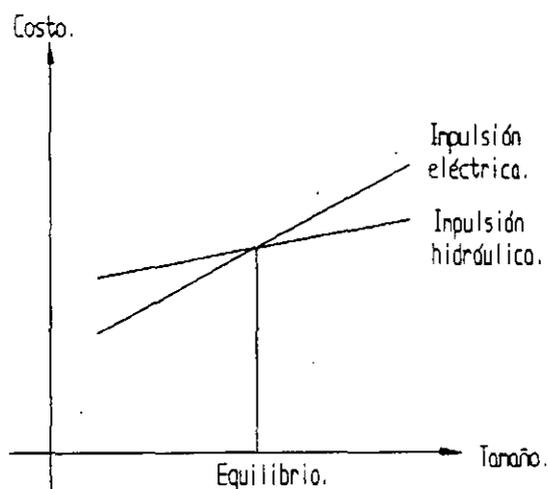


Figura ( 2.10.1 )- Relación entre el costo y el tamaño para los impulsores eléctrico e hidráulico.

Los actuadores neumáticos suelen reservarse para los robots más pequeños, los cuales tienen menos grados de libertad (movimientos con dos a cuatro articulaciones.). Estos robots suelen estar limitados a simples operaciones de <<cojer y situar>> con ciclos rápidos. La potencia neumática puede adaptarse fácilmente a la actuación de dispositivos de pistón, es decir un movimiento de traslación de la articulación. También puede emplearse para accionar actuadores giratorios en articulaciones rotacionales. Tienen la desventaja de tener poca precisión entre movimientos, debido al poco control que se puede

efectuar por las fugas de aire.

### Actuadores neumáticos e hidráulicos.

Los actuadores neumáticos e hidráulicos obtienen la energía mediante el movimiento de fluidos. En el primer caso, el fluido es aire comprimido y en el segundo, el fluido suele ser aceite a presión. Por lo general, el funcionamiento de estos actuadores es similar, excepto en su capacidad para contener la presión del fluido. Los sistemas neumáticos suelen operar a unas 100 Psias y los sistemas hidráulicos de 1000 a 3000 Psias.

La figura (2.10.2) muestra un dibujo sencillo del dispositivo de potencia hidráulico. Este dispositivo se podría utilizar para accionar una articulación lineal. Recibe el nombre de cilindro de extremo único, si el émbolo del pistón sale del cilindro por un solo lado. Otro tipo de cilindro son los cilindros de doble extremo y los cilindros sin émbolo

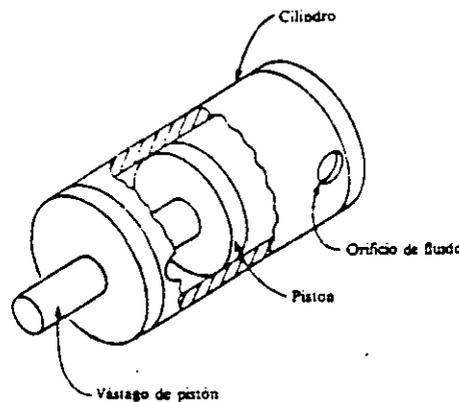


Figura (2.10.2)- Cilindro y pistón

Existen dos relaciones de particular interés cuando se trata de actuadores hidráulicos lineales, las cuales son:

$$v(t) = \frac{C(t)}{A} \quad ( 2.10.1.1 )$$

$$F(t) = P(t) A \quad ( 2.10.1.2 )$$

donde:

$v(t)$ , es la velocidad del pistón

$C(t)$ , es el caudal del fluido volumétrico

$F(t)$ , es la fuerza

$P(t)$ , es la presión del fluido

$A$ , es el área del pistón

La figura (2.10.3), ilustra otro tipo de actuador hidráulico, el actuador de paletas giratorias

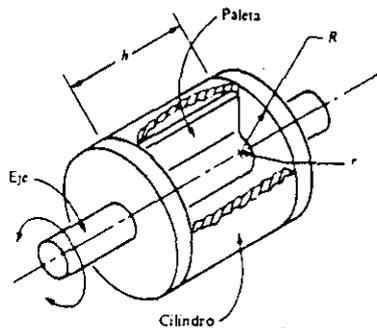


Figura (2.10.3) - Actuador de paletas.

En un actuador giratorio, es importante conocer la velocidad angular  $w$ , y el par  $T$ . Las relaciones que describen un actuador giratorio son:

$$w(t) = \frac{2C(t)}{(R^2 - r^2)h} \quad (2.10.1.3)$$

$$T(t) = 1/2 P(t) h (R^2 - r^2) \quad (2.10.1.4)$$

donde:

$R$ , es el radio de exterior de la paleta

$r$ , es el radio de la base de las paletas

$h$ , es el ancho de la paleta

$w$ , es la velocidad angular en radianes por segundo

$T$ , es el par del motor.

las otras variables son las mismas que el actuador lineal.

Actuadores eléctricos.

Los motores eléctricos son los actuadores de selección en el diseño de robots. Los motores eléctricos proporcionan una excelente controlabilidad requiriendo un mínimo de mantenimiento.

Existe una gran variedad de tipos de motores utilizados en robots. Los más comunes son los servomotores c.c, los motores de fase ( motores de pasos ), y los servomotores de c.a. En la figura (2.10.4), se ilustran varios servomotores de c.c.

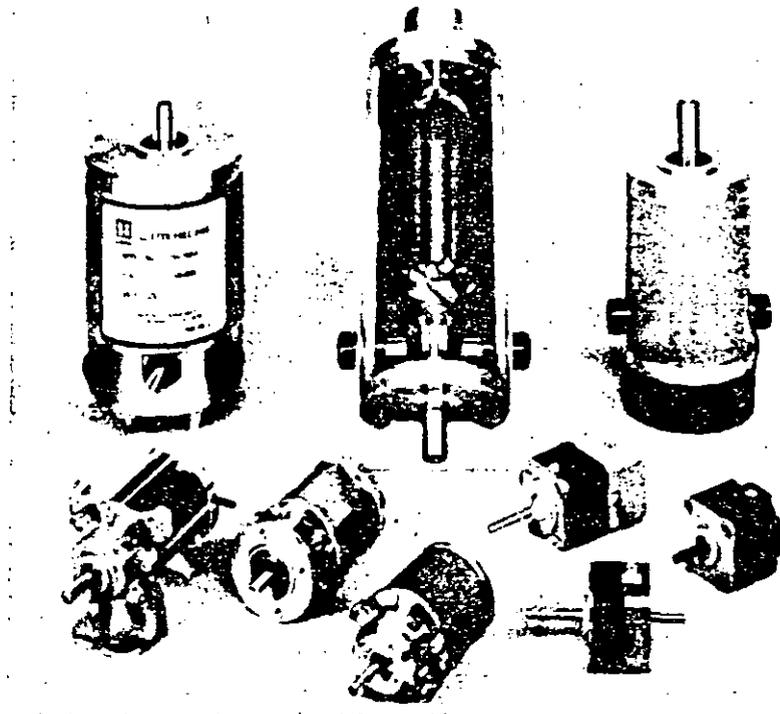


Figura (2.10.4)- Servomotores de corriente continua.

Los principales componentes del servomotor c.c son el rotor y el estator. Con frecuencia, el rotor incluye el inducido y el conjunto del conmutador, y el estator, comprende los conjuntos de las escobillas y los imanes permanentes. Cuando la corriente circula a través de los devanados del inducido, establece un campo magnético opuesto al campo producido por los imanes. Esto proporciona un par motor en el rotor. Cuando el rotor gira, las escobillas y los conjuntos de los conmutadores desvían la corriente al inducido, por lo que el campo permanece opuesto a

uno de los campos establecidos por los imanes.

En cada posición el par de torsión proporcionado por el rotor tiene un valor, el cual es constante en todo el ciclo de 360°. Puesto que la intensidad del campo del rotor es una función de la corriente que circula, el par motor, para un servomotor de c.c, se puede expresar como:

$$T_m(t) = K_m i_a(t) \quad ( 2.10.1.5 )$$

donde:

$T_m$ , es el par motor

$i_a$ , es el flujo de corriente que pasa a lo largo del inducido

$K_m$ , es una constante del par de torsión.

Otros efectos asociados a un servomotor c.c es la fuerza contraelectromotriz. El giro del inducido en la presencia de un campo magnético, proporciona una tensión a través de las terminales del inducido. Esta tensión es proporcional a la velocidad angular del motor

$$E_b(t) = K_b \omega(t) \quad ( 2.10.1.6 )$$

donde  $E_b$ , es la fuerza contraelectromotriz (tensión),

$K_b$ , es la constante de tensión

$\omega$ , es la velocidad angular.

El efecto de la fuerza contraelectromotriz actúa como amortiguamiento viscoso para el motor, del mismo modo que la variación de la velocidad es proporcional al amortiguamiento. Al existir un voltaje  $V_{in}$  a través de las terminales del motor y la resistencia  $R_a$  del inducido, entonces la corriente a lo largo del inducido es ( $i = V_{in} / R_a$ ). Esta corriente proporciona un par motor en el rotor que hace que el motor gire. Cuando el inducido gira, la corriente es generada por una fuerza contraelectromotriz igual a  $K_b \omega(t)$  o  $E_b(t)$ . Este voltaje debe restarse de  $V_{in}$  con el fin de calcular la corriente del inducido mediante.

$$i_a = \frac{V_{in}(t) - E_b(t)}{R_a} \quad ( 2.10.1.7 )$$

A medida que se incrementa la velocidad del motor y aumenta

consecuentemente el voltaje contraelectromotriz, disminuye la corriente disponible para el inducido. La disminución de corriente reduce el par de torsión generado por el rotor. Cuando el par motor se reduce, la aceleración del rotor queda reducida también, por lo tanto, en el punto en que  $E_b = V_{in}$ , el rotor mantiene una velocidad de régimen permanente.

### Motores paso a paso.

Los motores paso a paso son un tipo de actuadores únicos en su género y se utilizan sobre todo en los periféricos de computadoras y en robótica, los motores paso a paso se utilizan para aplicaciones de servicio realmente ligeros.

Un motor paso a paso proporciona una salida de impulsos eléctricos discretos en la forma de incremento discreto de movimiento, para cada impulso eléctrico hay una rotación o desplazamiento de paso único del eje del motor.

La figura (2.10.5), es una representación esquemática simple de un tipo de motor paso a paso.

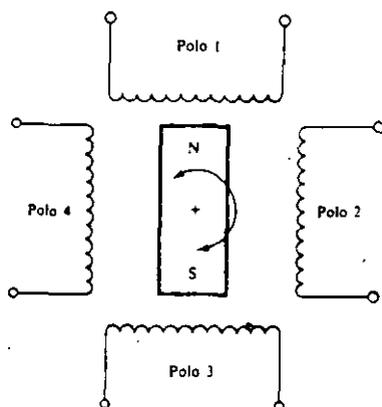


Figura (2.10.5)- Representación esquemática de un motor de pasos.

El estator está constituido por cuatro polos electromagnéticos y el rotor es un imán permanente de dos polos. Si los polos electromagnéticos del estator se activan de tal manera que el polo 3 sea N y el polo 1 sea S, el rotor estará alineado tal como se ilustra en la figura. Si el estator se excita de modo

que el polo 4 sea N y el polo 2 sea S, el rotor realiza un giro de 90° en el sentido de las agujas del reloj, siempre y cuando se desmagnetizen los polos 1 y 3.

La resolución (número de pasos por revolución) de un motor de pasos viene determinada por el número de polos en el estator y el rotor, la relación entre la resolución de un motor paso a paso y los ángulos de paso, está dada por:

$$n = \frac{A}{360^\circ} \quad ( 2.10.1.8 )$$

En donde n es la resolución y A es el ángulo de paso. El par es también función del ángulo entre los polos del estator y del rotor. El par motor se incrementa cuando los polos están alineados. El par máximo se conoce como el par de retención del motor. Es posible aumentar la resolución de un motor paso a paso utilizando una técnica conocida como semiescalamiento o microescalamiento. Aplicando corriente a más de un juego de devanados inductores, es posible hacer que el rotor busque una posición media. Cuando se utilice esta técnica, se reduce el par de retención.

#### Servomotores de c.a.

Hay otros aspectos de los motores eléctricos que pueden investigarse. Recientes avances en los sistemas electrónicos de control están produciendo servomotores c.a. Estos motores tienen la ventaja de ser más económicos de fabricación que los motores de c.c. además no tiene escobillas y poseen una alta potencia de salida. Sus prestaciones pueden hacerse muy similares a las de un motor de c.c.

#### 2.11 Sistemas de transmisión de potencia.

En muchos casos no es posible encontrar un actuador con las características exactas de velocidad para realizar las tareas deseadas. En otros casos se necesita situar el actuador alejado

de la articulación prevista del manipulador, ya sea para disminuir peso y situarlo en la base, por tal motivo, se hace necesario utilizar algún tipo de transmisión de potencia. Las transmisiones de potencia realizan dos funciones; transmitir potencia a una distancia y actuar como un transformador.

Hay varias formas de efectuar la transmisión de potencia mecánica, estas formas incluyen las poleas y bandas, las cadenas, los engranes, los ejes y los tornillos de potencia.

El empleo de engranes para la transmisión de potencia en robots es muy frecuente. Los engranes se utilizan para transmitir giros desde un eje a otro, esta transferencia puede realizarse entre ejes paralelos, ejes que se intersectan o en ejes que se cruzan. Los engranes más sencillos son para la transmisión entre ejes paralelos los cuales se conocen como engranes rectos.

Un tren de engranes se compone con dos o más engranes simples. El engrane impulsor, en este caso es el más pequeño, se conoce como el piñón y el engrane final es el engrane conducido. Este tren de engranes se conoce como un reductor de velocidad.

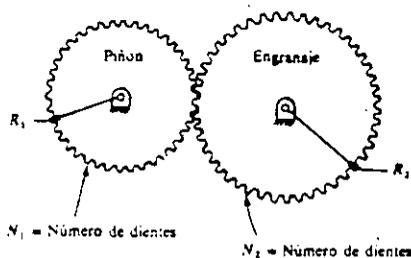
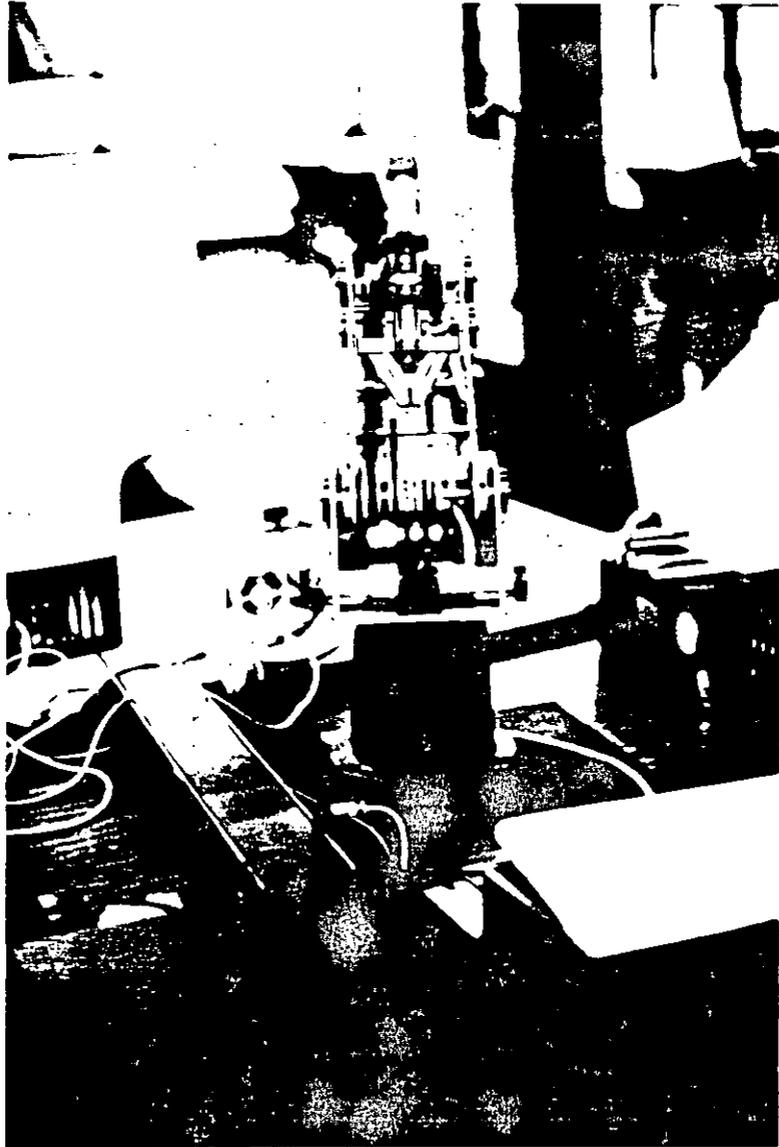


Figura (2.11.1)- Tren de engranes rectos

El número de dientes de un engrane es proporcional a su diámetro. Siendo  $n_p$  el número de dientes en el piñón y  $n_a$  los dientes en el engrane, la relación de engranes viene dada por:



$$n = \frac{-n_p}{n_d} \quad ( 2.11.1.1 )$$

y la velocidad de salida con respecto a la entrada es:

$$w_s = n w_e \quad ( 2.11.1.2 )$$

en donde  $w_s$  es la velocidad de salida y  $w_e$  es la velocidad de entrada. El par del motor en la salida es:

$$T_s = \frac{-T_e}{n} \quad ( 2.11.1.3 )$$

Una gran aplicación ha tenido el tornillo embalado en robótica, máquinas, herramientas de control numérico, instrumentos de medición etc. El tornillo embalado se clasifica dentro de los tornillos de potencia, es un artificio empleado en máquinas para cambiar el movimiento angular en lineal.

El medio de enlazar el tornillo y la tuerca esta compuesto de varios circuitos cerrados, formado por balines, ver figura (2.11.2 )

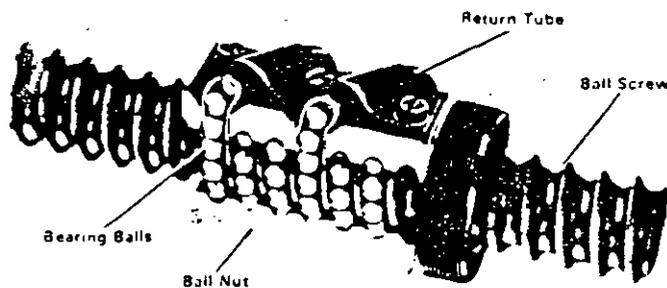


Figura ( 2.11.2 )- Tornillo embalado.

Cuando se gira la tuerca respecto al tornillos, estos balines

ruedan alrededor de los circuitos helicoidales. Se emplean caminos guías para desviarlos del canal del tornillo, recirculando diagonalmente por el exterior de la tuerca y volviendo a introducirse en el circuito helicoidal.

Los tamaños tipificados de los tornillos embalados, van desde un tornillo que tiene un diámetro de circuito de los balines de  $3/8$  in (0.953 cm), un paso de un  $1/8$  in (0.318 cm), y balines de  $1/6$  in (0.159 cm) de diámetro, a tornillos que tienen un diámetro del circuito de balines de 3 in (7.62 cm), un paso de 0.660 in (1.676 cm) y balines de  $1/2$  in (1.27 cm) de diámetro, con tres circuitos de recirculación.

La tuerca también se puede conseguir de cualquier tamaño y forma para adaptarlo a la mayoría de las aplicaciones.

Otros sistemas de transmisión de potencia incluyen sistemas de poleas, transmisión por cadena y transmisiones armónicas.

Los sistemas de poleas se pueden utilizar para transmitir potencia desde actuadores situados en la base del robot ya sea por medio de bandas. Las articulaciones rotacionales pueden conectarse poleas, que son impulsadas por un cable unido a un actuador giratorio. Análogamente puede utilizarse cable para activar articulaciones lineales.

Las transmisiones de cadena operan con una relación constante. Debido a la interacción positiva entre la cadena y las ruedas dentadas, no se produce deslizamiento alguno pero requieren tensadores. El paso de una cadena es la distancia entre el centro de dos rodillos consecutivos. La rueda dentada impulsora y la rueda dentada conducida tienen cada una varios dientes diseñados para la adaptación del tamaño y del paso de la cadena. La relación de velocidad de rotación y de potencia entre las ruedas dentadas sigue relaciones similares a las desarrolladas para engranes. La lubricación es un factor importante en el mantenimiento de las transmisiones por cadena.

Las transmisiones armónicas pueden utilizarse como elevadores o reductores de velocidad. Los ejes de entrada y salida están dispuestos a lo largo del mismo eje geométrico, de modo que una transmisión armónica podrá montarse en la parte frontal de un

motor con el eje de salida saliendo por el mismo extremo. Las ~~trasmisiones armónicas~~ pueden proporcionar cualquier relación de reducción, aunque se suelen emplear en el rango de 100 : 1. Las trasmisiones armónicas exigen poco mantenimiento y pueden funcionar sin ningún desgaste notable en toda su vida útil. Sin embargo, son menos eficientes que los trenes de engranajes bien diseñados.

## 2.12- Organó terminal o mano.

La mano u órgano terminal es un dispositivo que se une a la muñeca del brazo, con este dispositivo el robot de propósito general puede realizar una tarea específica. La mano u órgano terminal es una herramienta de uso especial para un robot, por norma general, las manos u órganos terminales se deben diseñar técnicamente, para la tarea particular que se va a realizar.

### Tipos de órganos terminales.

Existe una amplia gama de manos necesarios para realizar una variedad de funciones de trabajo diferentes. Estos tipos se pueden dividir en dos categorías:

- a) Pinzas.
- b) Herramientas.

Las pinzas son manos que se utilizan para agarrar y sostener objetos. Los objetos son piezas que tienen que ser movidas por el manipulador. En las aplicaciones de manejo de objetos, se incluye la carga y descarga de las máquinas, la toma de objetos depositados en un transportador, entre los objetos manejados por las pinzas del robot se incluyen objetos de cartón, botellas, material con superficies rugosas y con acabados finos.

En general las pinzas se pueden clasificar en simples y dobles. EL factor que distingue a la pinza simple, es que solo se monta un dispositivo de agarre en la muñeca del robot este dispositivo puede ser de rotación o de traslación.. Una pinza doble posee dos dispositivos de agarre unidos a la muñeca y se utiliza para sostener dos objetos distintos. Los dispositivos de

dos pinzas pueden actuar de forma independiente, son de especial utilidad en máquinas con aplicaciones de carga y descarga.

Las pinzas de terminal múltiple se aplican en los casos en donde dos o más mecanismos de agarre se fijan a la muñeca. Las ocasiones en las que se requieren más de dos pinzas son muy raras. También existe un aumento en el costo y una disminución en la fiabilidad cuando se aumenta el número de dispositivos de agarre en un brazo del manipulador.

### Pinzas mecánicas.

Una pinza mecánica es un órgano terminal que utiliza dedos mecánicos, estos dedos son impulsados por un mecanismo para agarrar una pieza. Los dedos, son los accesorios de la pinza que están en contacto con la pieza. Además, los dedos están unidos al órgano terminal o son parte integral del mismo. Si los dedos son del tipo desmontable, se pueden separar y sustituir. Se pueden diseñar conjuntos diferentes de dedos para utilizar con el mismo mecanismo de pinzas con el objeto de acoplarlos a modelos de objetos diferentes. La figura ( 2.12.1 ), ilustra un ejemplo de estas características.

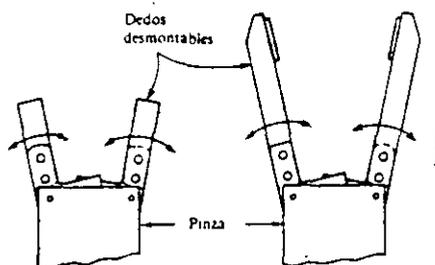


Figura (2.12.1)- Pinza mecánica.

Existen dos formas de sostener el objeto dentro de las pinzas. La primera es comprimiendo la pieza con los dedos. En este método los dedos de la pinza encierran a la pieza hasta alguna posición, limitando su movimiento. La figura ( 2.12.2 ), ilustra este método de construcción de la pieza.

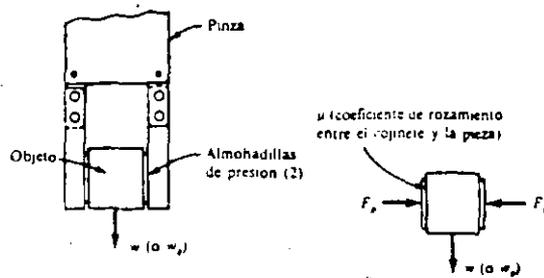


Figura (2.12.2)- Métodos de sujeción

La segunda forma de sujeción de la pieza es mediante el rozamiento entre los dedos y la pieza. Con este método los dedos deben de aplicar una fuerza que proporcione un rozamiento suficiente para retener la pieza en contra de la gravedad, la aceleración y otras fuerzas que pueden surgir durante el tiempo de sujeción del ciclo de trabajo, ver figura (2.12.3).

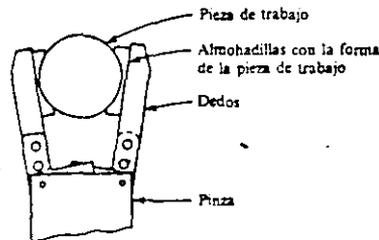


Figura (2.12.3)- Sujeción del ciclo de trabajo.

Las pinzas mecánicas también se pueden clasificar de acuerdo al tipo de dispositivo cinemático utilizado para efectuar el movimiento de los dedos, se tienen los siguientes :

- Con actuación de articulación.
- Con actuación de engranaje y bastidor.
- Con actuación de leva.
- Con actuación de tornillo.
- Con actuación de cable y polea.

La categoría de articulaciones cubre un rango amplio de posibilidades de diseño para efectuar la apertura y cierre de la

pinza, la figura ( 2.12.4 ), ilustra varios ejemplos de este tipo.

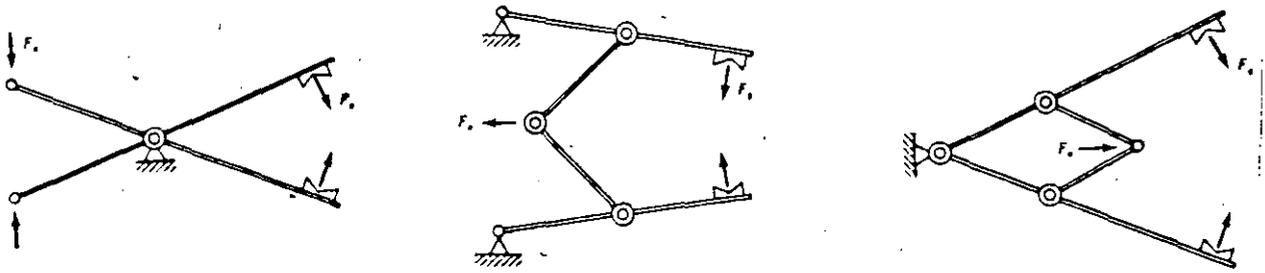


Figura (2.12.4)- Pinza de actuación de articulación.

.El diseño de la articulación determina cómo la fuerza de entrada  $F_e$  a la pinza se convierte en una fuerza de agarre  $F_g$  aplicada para los dedos.

La figura ( 2.12.5 ), ilustra el método de actuación de los dedos de la pinza utilizando el sistema de engranaje bastidor.

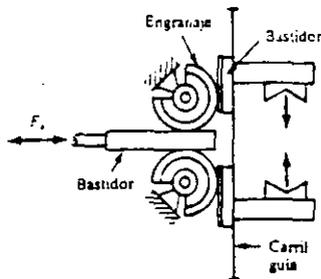


Figura (2.12.5)- Pinza engrane y bastidor.

El engranaje y bastidor se debería unir a un pistón o algún otro mecanismo que proporcione un movimiento lineal así como también es posible a un elemento rotatorio.. El movimiento del bastidor podrá impulsar a dos engranajes de piñon parciales y estos abrir y cerrar los dedos.

La pinza actuada por leva incluye una gran variedad de diseños posibles, uno de los cuales se ilustra en la figura ( 2.12.6 ), los dispositivos de leva y seguidor, incluso si se utiliza un seguidor cargado por muelle, puede proporcionar las acciones

de apertura y cierre de la pinza.

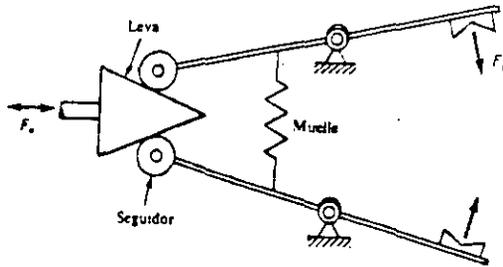


Figura ( 2.12.6 )- Pinza por leva.

En el método de actuación del tipo de tornillo, el tornillo suele girar mediante un motor acompañado por un mecanismo de reducción de velocidad. Cuando el tornillo gira en un sentido se mueve un bloque roscado para ser transferido en sentido de movimiento. El bloque a su vez se conecta a los dedos de la pinza para producir la acción correspondiente de abrir y cerrar.

Se pueden diseñar mecanismos de cable y polea para abrir y cerrar una pinza mecánica. A causa de la naturaleza de estos dispositivos, algunos actúan a tensión debiéndose oponerse al movimiento del cable del sistema de poleas.

#### Otros tipos de pinzas.

Además de las pinzas mecánicas, hay una gran diversidad de otros dispositivos que pueden diseñarse para elevar y sujetar objetos. Entre estos tipos de pinzas están incluidas las siguientes.

- Ventosas
- Pinzas magnéticas
- Pinzas adhesivas
- Ganchos, Cucharas
- Otros dispositivos diversos.

Las ventosas pueden utilizarse como dispositivos de pinza para manipular algunas clases de objetos. Los requisitos habituales exigidos a lo objetos a manipular son que sean planos, suaves y limpios, que son las condiciones necesarias para formar un vacío satisfactorio entre el objeto y la ventosa, un ejemplo de ventosa se ilustra en la figura (2.12.7).



Figura ( 2.12.7 )- Pinza empleando ventosas.

Las ventosas utilizadas en este tipo de pinzas de robot suelen ser de material elástico, tal como el caucho o plástico blando. Una excepción es que el objeto a manipular esté constituido por un material blando, en este caso, la ventosa sería de una sustancia dura.

#### Pinzas magnéticas.

Las pinzas magnéticas pueden ser un medio muy factible de manipular materiales ferrosos. Por lo general, las pinzas magnéticas ofrecen las siguientes ventajas en aplicaciones :

- Los tiempos de captación son muy pequeños.
- Pueden tolerarse variaciones en el tamaño de la pieza.
- Tiene la capacidad para manejar piezas mecánicas con agujeros.
- Solo requiere una superficie para agarre.

Los inconvenientes de las pinzas magnéticas incluye el magnetismo residual remanente en las piezas de trabajo que pueden producir anomalías en la posterior manipulación y el posible deslizamiento lateral y otros errores que limitan la

precisión de este método de manipulación.

### Pinzas adhesivas.

Son diseños en los que una sustancia adhesiva realiza la acción de agarre, puede utilizarse para manipular tejidos y otros materiales livianos. Es requisito para los elementos a manipular, que deben de sostenerse por un lado solamente y no son adecuados a otras formas de agarre, tal como vacío o con imanes.

Una de las limitaciones potenciales de una pinza adhesiva es que la sustancia adhesiva pierde su adherencia con el empleo repetido.

### Ganchos, cucharas y otros dispositivos.

Los ganchos pueden utilizarse como órgano terminal para manipular contenedores para carga y descarga de piezas que cuelgan de transportadores aéreos.

Las cucharas y los calderos pueden utilizarse para manipular algún material en forma de polvo o líquido, como los productos químicos en forma de polvo, materiales alimenticios, sustancias granulares y materiales fundidos. Una de las limitaciones es que la cantidad de material recogida por el robot es, a veces difícil de controlar. El derrame durante el ciclo de manipulación es también un problema.

Otros dispositivos incluyen elementos expandibles o inflables, en los que el diafragma se infla para llenar algún hueco y poder manipularlo, las pinzas aplican una presión uniforme contra la superficie del objeto en lugar de una fuerza concentrada, figura(2.12.8).

Se está realizando investigación y desarrollo con el objeto de diseñar una pinza universal capaz de agarrar y manipular una amplia gama de objetos con geometrías diferentes. La mayoría de los modelos de pinzas están modeladas para poseer una versatilidad considerable en semejanza a la mano humana. Debido a su complejidad estos órganos terminales de investigación

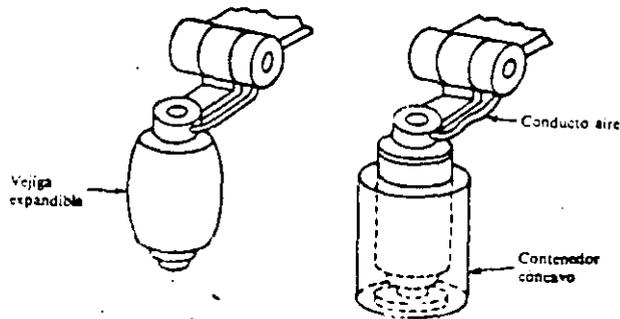


Figura (2.12.8) - Pinza expandible.

suelen tener solamente tres dedos en vez de cinco. Un posible diseño de la mano universal se ilustra en la figura ( 2.12.9 ).

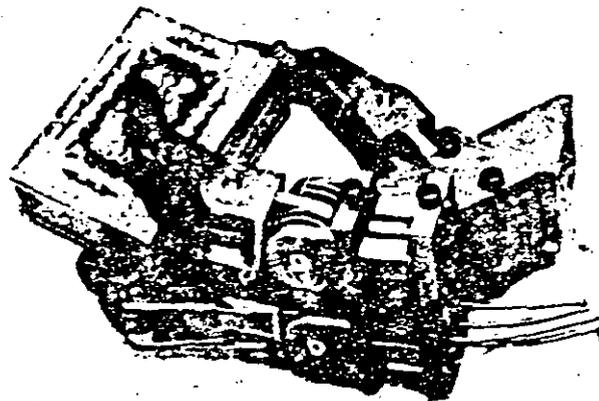


Figura (2.12.9)- Pinza universal.

Herramienta como efector final.

En muchas aplicaciones se exige al robot que manipule una herramienta en vez de una pinza de trabajo. En un número limitado de aplicaciones del órgano terminal es una pinza diseñada para agarrar y manipular la herramienta o la herramienta misma. El motivo para utilizar una pinza en estas aplicaciones es que puede existir más de una herramienta a utilizar por el robot en el ciclo de trabajo. El empleo de una

pinza especial permite que la herramienta se intercambie dentro del ciclo y así se facilita esta función de manipulación multiherramienta.

En la mayoría de las aplicaciones de robots en las que se manipula una herramienta, esta última está unida directamente a la muñeca del robot; en este caso la herramienta utilizada es el órgano terminal o mano . Algunos ejemplos de herramientas utilizadas como manos en aplicaciones de manipuladores incluyen:

- Herramienta de soldadura por punto.
- Soplete de soldadura por arco.
- Tobera de pintura por pulverización.
- Husillo giratorio para operaciones tales como.
  - a) taladrado.
  - b) ranurado.
  - c) cepillado.
  - d) rectificado.
- Aplicadores de cemento líquido para montaje.
- Sopletes de calentamiento.
- Herramientas de corte por chorro de agua, etc.

En cada caso el robot debe controlar el movimiento de la herramienta, esta se controla de forma muy similar a la apertura y cierre de una pinza mecánica.

Para finalizar se resumen en la tabla (2.12) algunas de las consideraciones a tomar en la selección y diseño de pinzas, para ello, se proporciona una lista de control de factores que deben tomarse presentes en la selección y diseño de pinzas.

#### 2.14 Sensores de posición y percepción.

Un transductor es un dispositivo que transforma un tipo de variable física( fuerza, presión, temperatura, velocidad, aceleración, caudal, etc), en otro tipo. La transformación más común es la que produce un voltaje eléctrico, la razón por la que se realiza esta conversión es la facilidad de trabajar con la señal convertida.

Un sensor es un transductor que mide una variable física de interés. Los trnsductores se pueden clasificar en dos tipos

Factor	Consideración
Pieza a manipular	Peso y tamaño Forma Cambios en la forma durante el procesamiento Tolerancias en el tamaño de la pieza Condición superficial, protección de superficies delicadas
Método de actuación	Agarre mecánico Ventosa de vacío Imán Otros métodos (adhesivos, cucharas, etc.)
Transmisión de potencia y señales	Neumática Eléctrica Hidráulica Mecánica
Fuerza de la pinza (pinza mecánica)	Peso del objeto Método de sujeción (construcción o fricción física) Coeficiente de rozamiento entre dedos y objeto Velocidad y aceleración durante el ciclo de movimiento
Problemas de posicionamiento	Longitud de los dedos Exactitud inherente y repetibilidad del robot Tolerancias en el tamaño de la pinza
Condiciones de servicio	Número de actuaciones durante la vida útil de la pinza Posibilidad de sustitución de componentes desgastados (dedo) Mantenimiento y posibilidad de servicio
Entorno operativo	Calor y temperatura Humedad, condensación, suciedad, productos químicos
Protección contra la temperatura	Protectores térmicos Dedos largos Enfriamiento forzado (aire comprimido, enfriamiento por agua, etc.) Empleo de materiales termorresistentes
Materiales de fabricación	Resistencia mecánica, rigidez, durabilidad Resistencia a la fatiga Coste y facilidad de fabricación Propiedades de fricción para superficies de los dedos Compatibilidad con el entorno operativo
Otras consideraciones	Empleo de dedos intercambiables Normas de diseño Conexiones de montaje e interconexión con robot Riesgo de cambios en el diseño del producto y su efecto sobre el diseño de la pinza Tiempo muerto para diseño y fabricación Piezas de repuesto, mantenimiento y servicio Prueba de la pinza en producción

Tabla (2.12) - Lista de control de factores en la selección y diseño de pinzas

básicos, los cuales dependen de la forma final de la señal, estos son:

- Transductores análogos.
- Transductores digitales.

Los transductores análogos proporcionan una señal continua, esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.

Los transductores digitales producen una señal de salida digital, en forma de un conjunto de bits en paralelo o formando una serie de pulsaciones que pueden ser contados, las señales digitales representan el valor de la variable medida. Los transductores digitales se han popularizado por la facilidad con que se pueden emplear como instrumentos de medición independientes. Además, suelen ofrecer la ventaja de ser más compatibles con las computadoras digitales, en la automatización y en el control del proceso.

Con el objeto de ser útiles como dispositivos de medición, los sensores deben de poseer ciertas características, como son:

**Exactitud.** La exactitud de medición debe ser tan alta como fuese posible. La exactitud es que el valor verdadero de la variable que se puede detectar sin errores sistemáticos positivos o negativos en la medición realizada.

**Precisión.** La precisión significa que existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de la variable, si existe la dispersión en los valores en una serie de mediciones será mínima.

**Rango de funcionamiento.** El sensor debe de tener un amplio rango de funcionamiento y debe ser exacto y preciso en todo el rango.

**Velocidad de respuesta.** Debe ser capaz de responder a los cambios de las variables detectadas en un tiempo mínimo.

**Calibración.** El sensor debe ser fácil de calibrar, con un mínimo de tiempo en el calibrado. Además el sensor no debe necesitar una recalibración frecuente.

**Fiabilidad.** No debe estar sujeto a fallos frecuentes durante el funcionamiento, por lo cual se requiere una alta fiabilidad.

**Costo, facilidad de funcionamiento.** El costo de comprar,

instalar y manejar el sensor debe ser tan bajo como sea posible. Además, lo ideal sería que la instalación y manejo del dispositivo no necesite de ningún operador altamente calificado.

### Sensores en robótica.

Los sensores utilizados en robótica incluyen una amplia gama de dispositivos, estos se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Sensores táctiles.
- Sensores de proximidad y alcance.
- Sensores diversos y sistemas basados en sensores.
- Sistemas de visión de máquina.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de ellos.

### Sensores táctiles.

Los sensores táctiles son dispositivos que indican el contacto entre ellos mismos y algún otro objeto sólido. Se dividen en :

- a)- Sensores de contacto.
- b)- Sensores de fuerza.

Los sensores de contacto se utilizan para indicar que se ha producido el contacto entre los dos objetos, sin considerar la magnitud de la fuerza de contacto. En esta categoría se incluyen dispositivos sencillos, como interruptores de límite, microinterruptores y dispositivos similares. Por ejemplo, pueden utilizarse para formar parte de una sonda de inspección, manipulada por el robot para medir las dimensiones de una pieza de trabajo.

La detección de la fuerza en robótica se puede realizar de varias formas. Una técnica utilizada con frecuencia es la << muñeca detectora de fuerza >>. Consta de una célula de carga constituida por strain ganges montada entre la pieza y la muñeca. Otra técnica empleada para medir el par de torsión ejercido por cada una de las articulaciones realiza mediante la detección de la corriente del motor por cada uno de los motores

de la articulaciones.

Finalmente, una tercera técnica es empleada para formar una matriz de elementos detectores de fuerza, de manera que se pueda determinar información sobre la superficie de contacto de cualquier forma.

### Sensores de proximidad y alcance.

Los sensores de proximidad son dispositivos que indican cuando un objeto está próximo a otro. Que tan próximo debe estar el objeto para poder activar el sensor, dependerá del dispositivo particular. Las distancias pueden ser cualquiera entre varios milímetros y varios pies. Algunos de estos sensores pueden utilizarse también para medir la distancia entre el objeto y el sensor, y estos dispositivos se denominan sensores de alcance. Los sensores de proximidad y alcance se localizarían normalmente en la muñeca u órgano terminal; puesto que son éstas las partes móviles del robot, ver figura ( 2.14.1 ).

Una diversidad de tecnologías están disponibles para diseñar sensores de proximidad y alcance. Estas tecnologías incluyen dispositivos ópticos, elementos acústicos, y técnicas de campo eléctrico.

Los sensores de proximidad óptica pueden diseñarse utilizando fuentes de luz visible o invisible ( infraroja ). Los sensores de infrarojos pueden ser activos o pasivos, los sensores activos envían un haz de rayos infrarojos y responden a la reflexión del haz contra un blanco. El sensor de infrarojos activo puede emplearse para indicar no solamente si está o no una pieza, sino también para señalar la posición de la misma. Temporizando el intervalo a partir de cuando se envía la señal y se recibe el eco puede realizarse una medida de la distancia entre objetos y el sensor. Los sensores de infrarojos pasivos son simplemente dispositivos que detectan la presencia de la radiación infraroja en el entorno. Se suele utilizar en un sistema de seguridad para detectar la presencia de cuerpos que emiten calor dentro del alcance del sensor. Estos sistemas sensores son eficientes en la cobertura de grandes zonas, principalmente en la zona de trabajo

del manipulador y en interiores de edificios.

Otro método óptico para la detección de proximidad implica el empleo de un haz de luz colimado y un arreglo lineal de sensores de luz. Con la reflexión del haz de luz desde la superficie del objeto, la localización de este último puede determinarse a partir de la posición de su haz reflejado en el arreglo de sensores.

Dispositivos acústicos pueden emplearse como sensores de proximidad. Las frecuencias ultrasónicas ( por encima de 20,000 Hz ) se suelen utilizar en estos dispositivos, porque el sonido está más allá del alcance del oído humano. Esta formado por un sensor de proximidad acústico que emplea una cámara cilíndrica de extremo abierto y un emisor acústico en el extremo cerrado de la cámara. El emisor establece un patrón de ondas estacionarias en la cavidad que se modifica por la presencia de un objeto cerca del extremo abierto. Un microfono situado en la pared de la cámara se emplea para detectar el cambio en el patrón de sonido. Esta clase de dispositivo puede utilizarse también como un sensor de alcance.

Dos de los tipos de sensores de proximidad y alcance basados en el uso de campos eléctricos, son los sensores de corrientes parásitas y los de campo magnético. Los dispositivos de corrientes parásitas crean un campo magnético primario alterno. Este campo induce corrientes parásitas en un objeto situado en la zona, en tanto que el objeto esté constituido por un material conductor. Estas corrientes parásitas producen su propio campo magnético que interacciona con el campo primario para modificar su densidad de flujo, la cual indica la presencia del objeto.

Los sensores de proximidad de campo magnético son relativamente simples y pueden obtenerse utilizando un conmutador de lámina y un imán permanente. El imán puede formar parte del objeto que se detecta o puede ser parte integral del dispositivo sensor. En uno u otro caso el dispositivo puede diseñarse de modo que la presencia del objeto en la zona del sensor complete el circuito magnético y active el conmutador de lámina.

## Sistemas de visión.

La visión en el manipulador ( también denominada visión de computadora o visión artificial ), es una tecnología importante de sensores con potentes aplicaciones en muchas industrias. Algunas de las aplicaciones más usadas del sistema visión están en la inspección; sin embargo, se puede preveer que la tecnología de visión jugará un papel cada vea más importante en el futuro de la robótica.

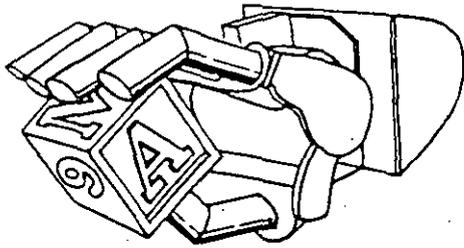
Los sistemas de visión diseñados para ser utilizados en robots o sistemas de fabricación deben de tener un tiempo de respuesta relativamente corto por las aplicaciones de fabricación que suelen ser en una fracción de segundos.

Los sistemas de visión se emplean para realizar diferentes tareas, entre las que se incluye la selección de objetos orientado aleatoriamente en un recipiente o en un trasportador, la identificación de objetos y la inspección limitada.

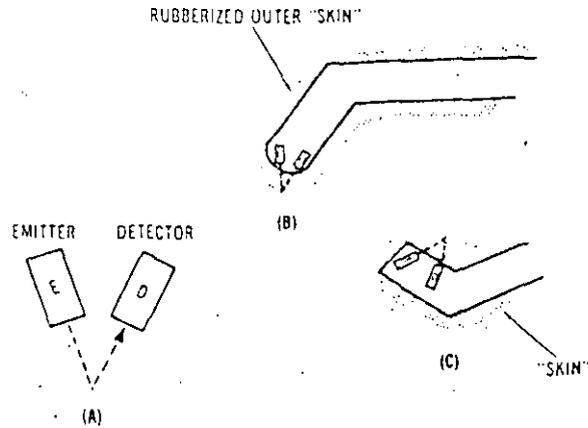
Con los avances en la tecnología de visión aplicada en robótica, se espera que aumente la capacidad de los sistemas con el objeto de permitir la conducción del brazo del robot para realizar una inspección completa incluyendo tolerancias dimensionales muy estrictas, así como una mejora de la capacidad de localizar objetos y de su reconocimiento.

El empleo de los sensores de visión en la robótica, industria y otros sistemas de fabricación automatizados se encuentran en cuatro categorías básicas.

- 1.- Vigilancia y seguridad.
- 2.- Control en células de trabajo
- 3.- Inspección de piezas y control de calidad.
- 4.- Determinación de posiciones e información sobre los objetos en el área de trabajo del manipulador.



First two fingers and thumb.



Use of optical reflectance for tactile sensing.

Basic construction diagram of an inexpensive pressure-sensitive switch.

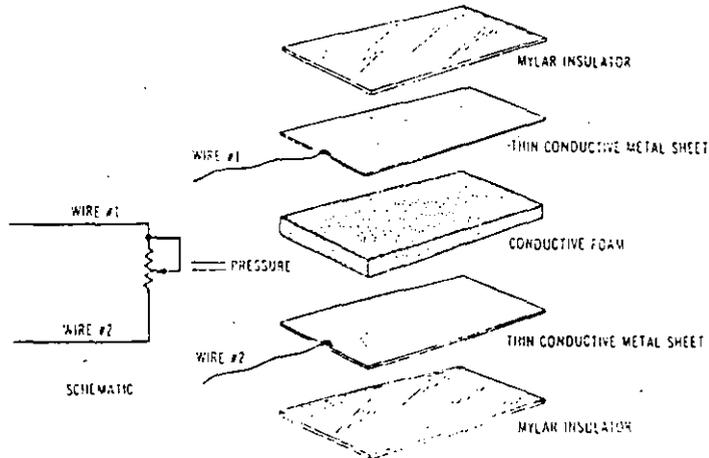


Figura (12.14.1). Sensores de proximidad por medio de reflexión óptica.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

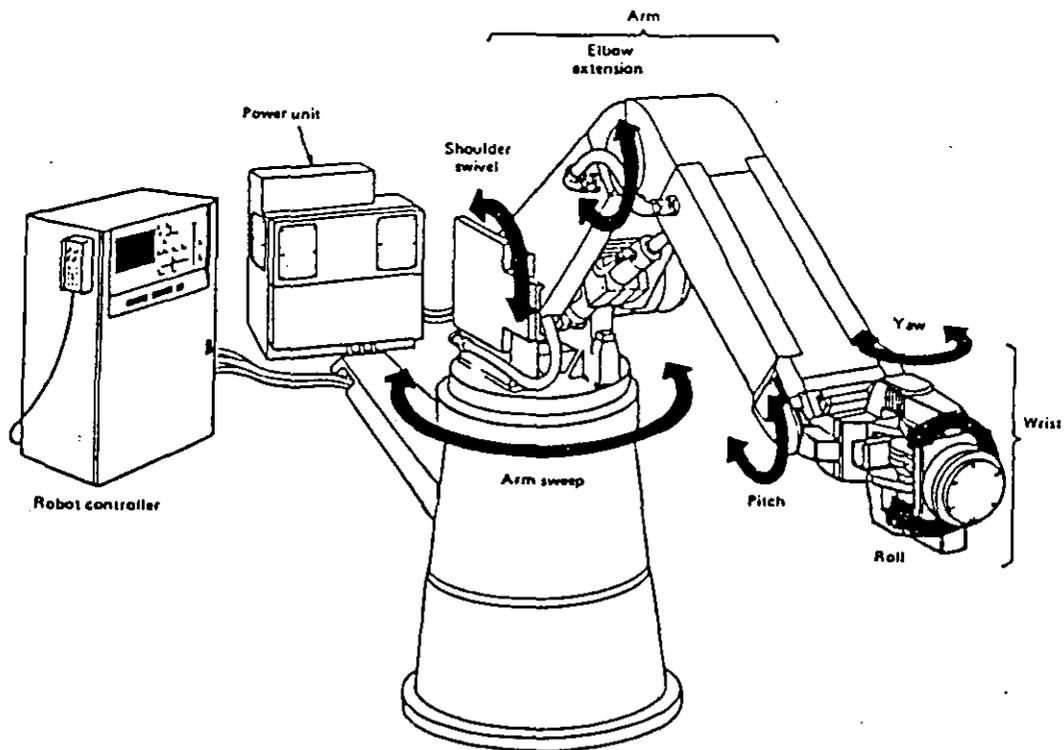
ROBOTICA INDUSTRIAL

EJEMPLOS DE ROBOTICA.

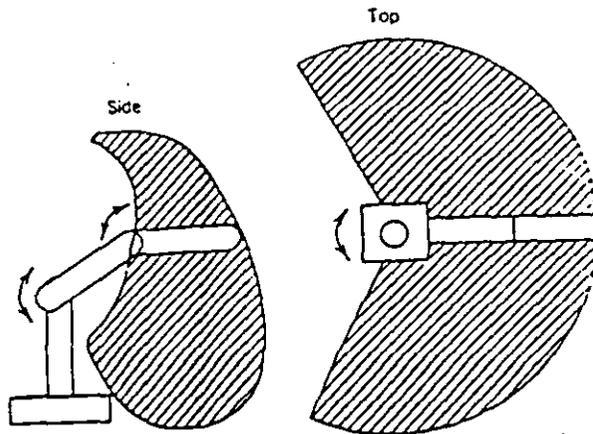
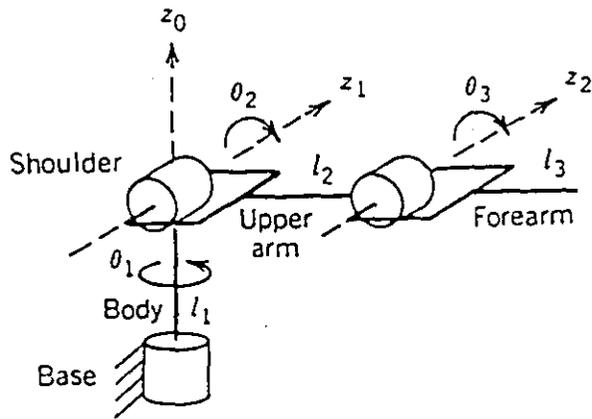
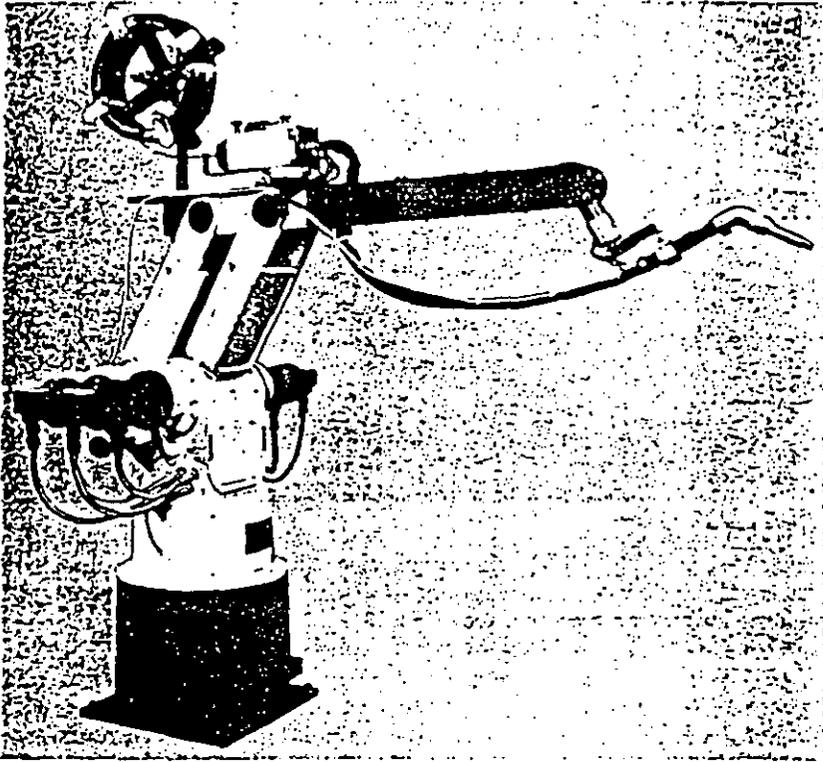
1 9 9 4.

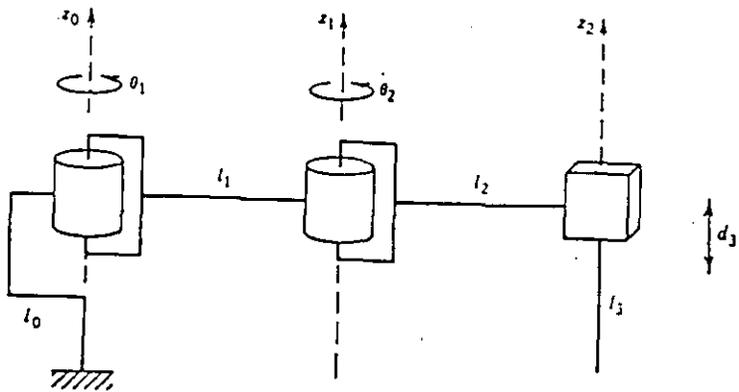
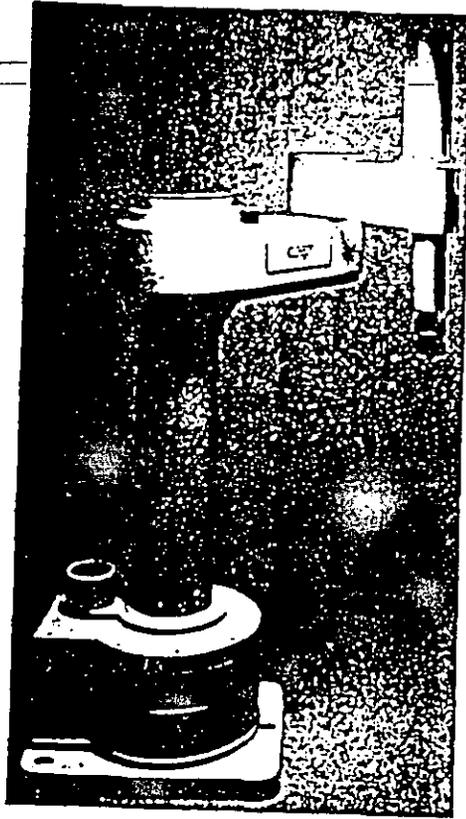
## ¿Que es Robot?

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable, diseñado para realizar una variedad de trabajos mediante reprogramación.

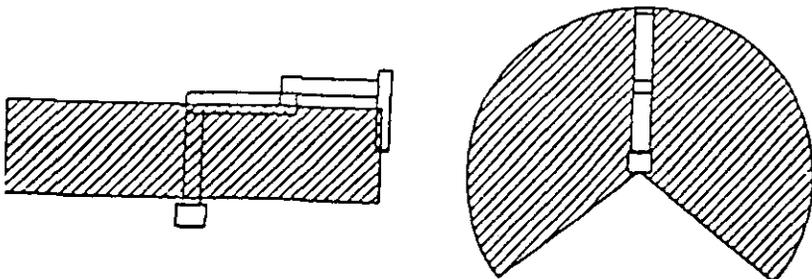


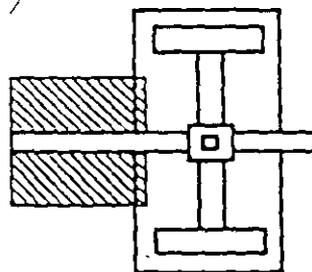
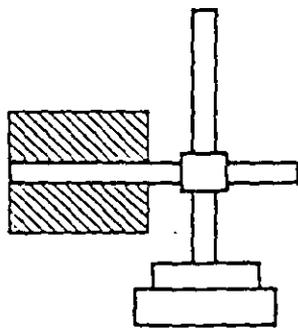
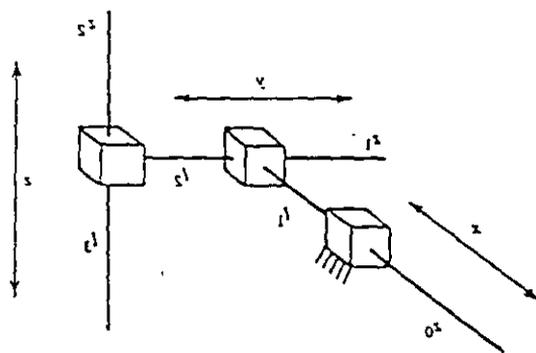
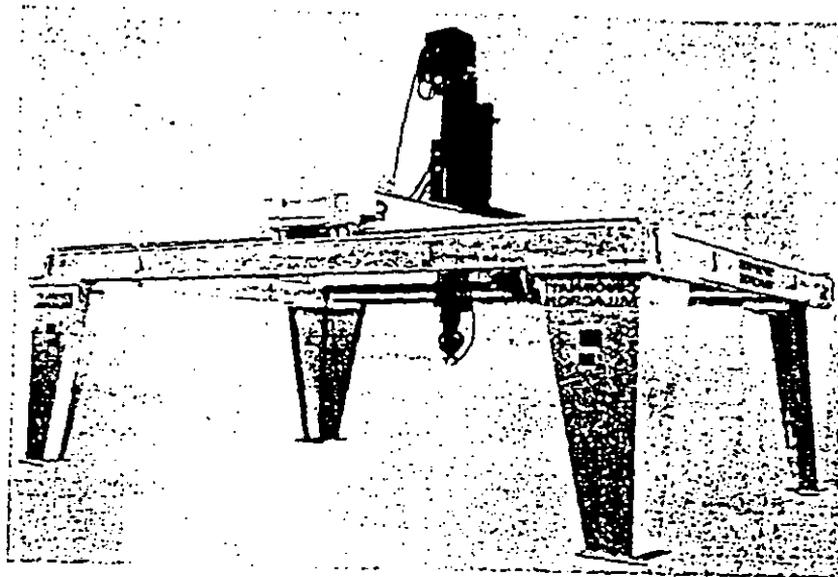
Industrial robot system. (Cincinnati Milacron.)

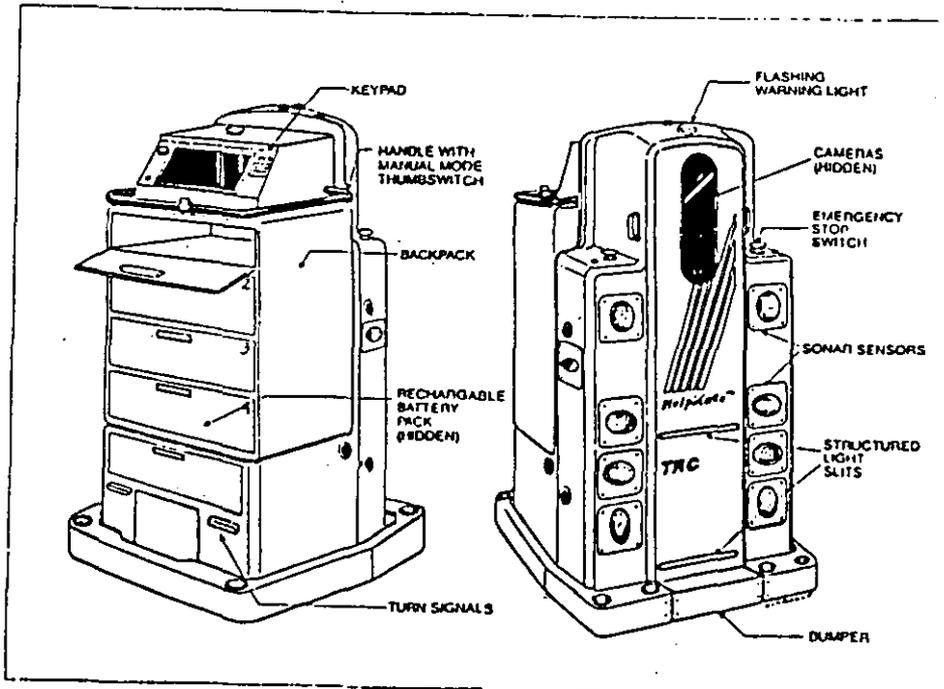
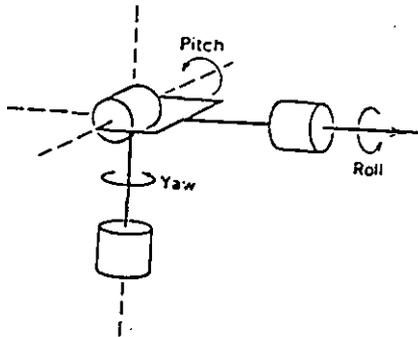
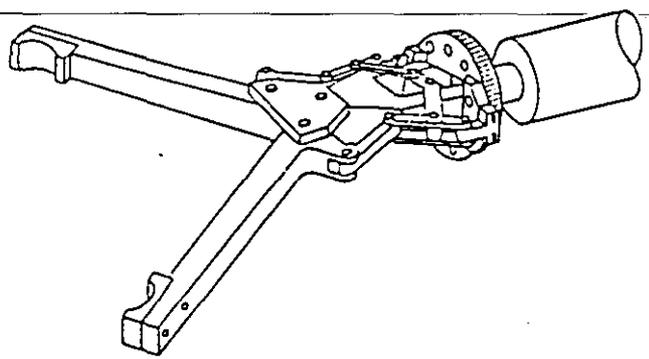
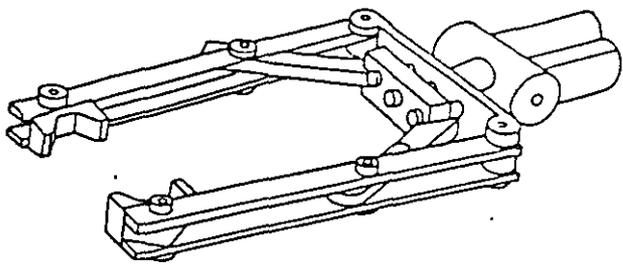




The SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly)







## Historia

- 1947: se desarrolló el primer teleoperador con servomecanismo
- 1948: se desarrolló el primer teleoperador con retroalimentación de fuerzas
- 1949: se inició la investigación en máquinas con control numerico
- 1954: se diseñó el primer robot reprogramable
- 1956: se fundó la primera compañía en robot (Unimation)
- 1961: se instaló el primer robot de Unimation en una planta de GM
- 1963: se desarrolló el primer sistema de visión
- 1973: se desarrolló la primera lenguaje de programación (WAVE)
- 1974: se introdujo el primer robot con control por computador
- 1979: se diseñó el primer robot SCARA
- 1981: se desarrolló el primer robot sin transmisión (direct-drive)

## Aplicaciones

### Automación industrial

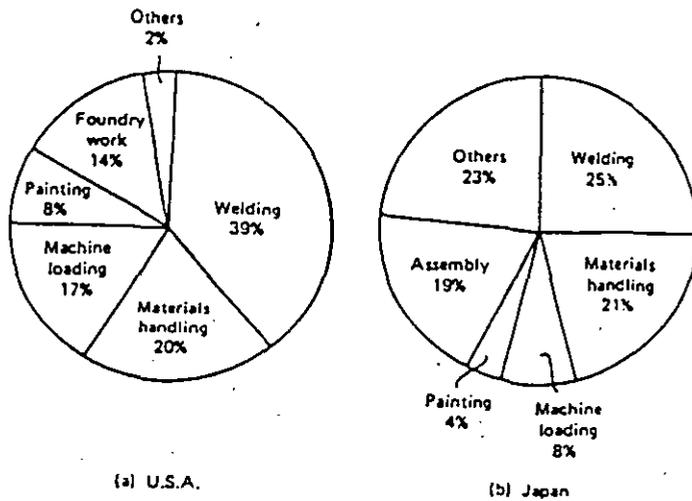
- .automatización fija
- .automatización flexible

### Trabajos especiales

- .manejo de materias tóxicas
- .trabajos submarinos
- .industria espacial

### Servicio

- .lavado de coches
- .ayuda a minusválidos
- .cuidado intensivo de enfermos
- .etc.



(a) U.S.A.

(b) Japan

Breakdown of robot usage by applications. (a) United States; (b) Japan. (Data from P. Aron, "The Robot Scene in Japan," Report No. 26, Daiwa Securities America Inc., September 1983.)

¿Dónde se encuentra?

.Procesos de manufacturación

-Robots

.Procesos químicos

-Presión

-Temperatura

-Nivel

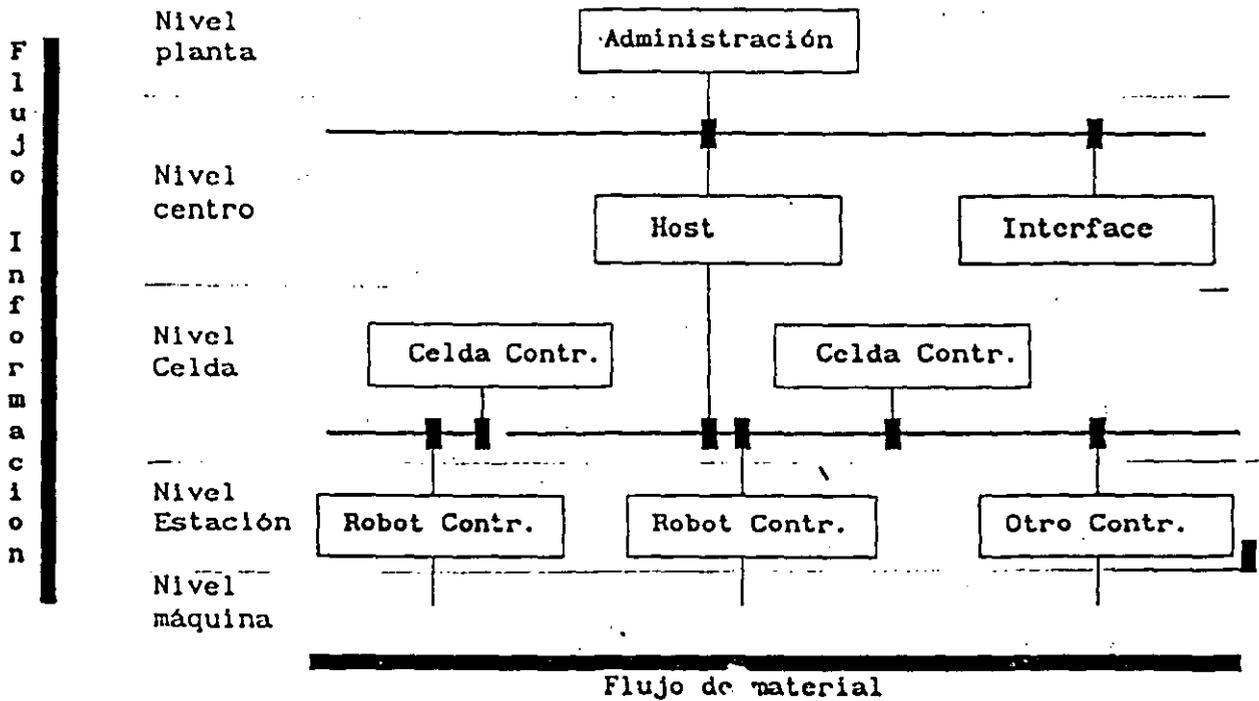
-Volumen

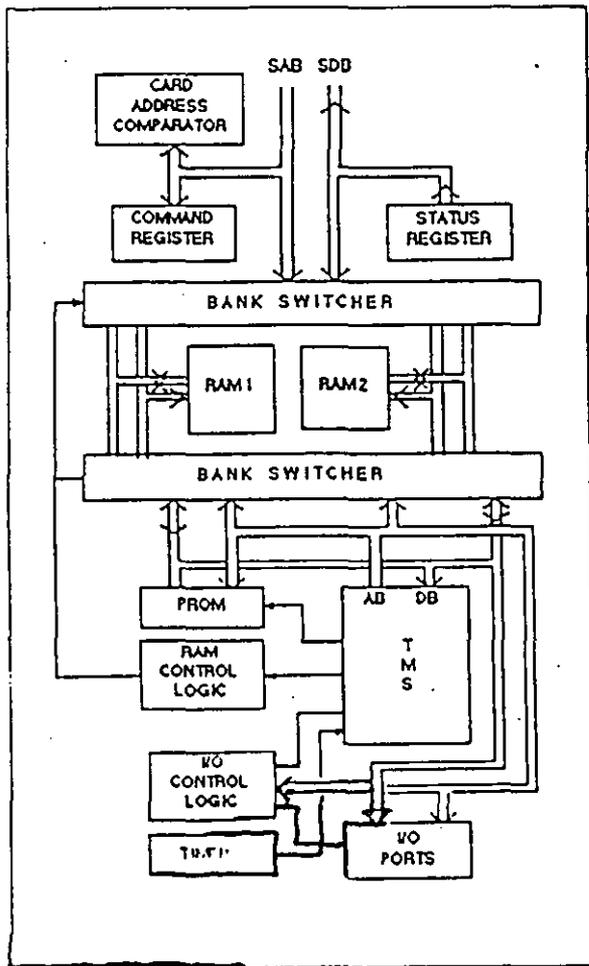
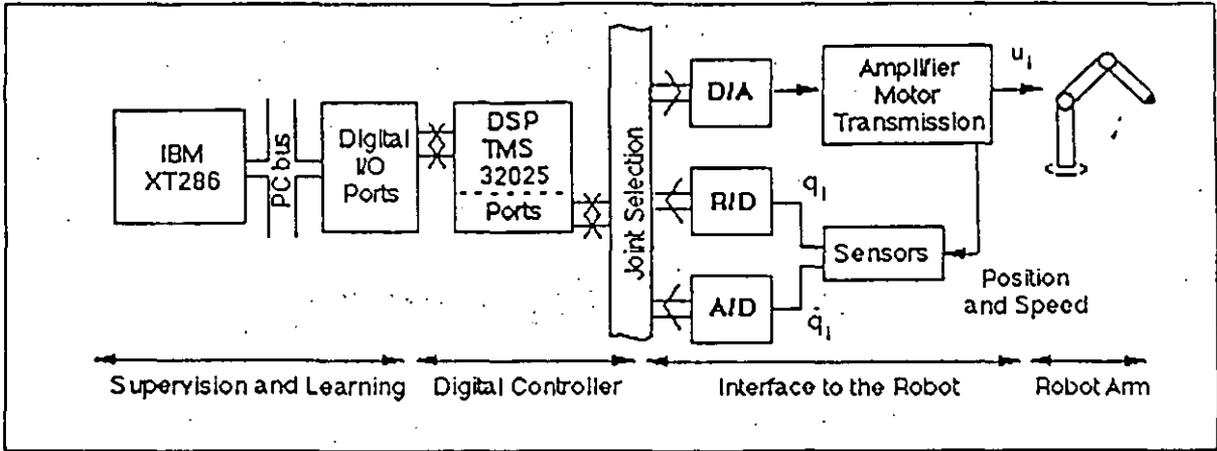
.Servomecanismos

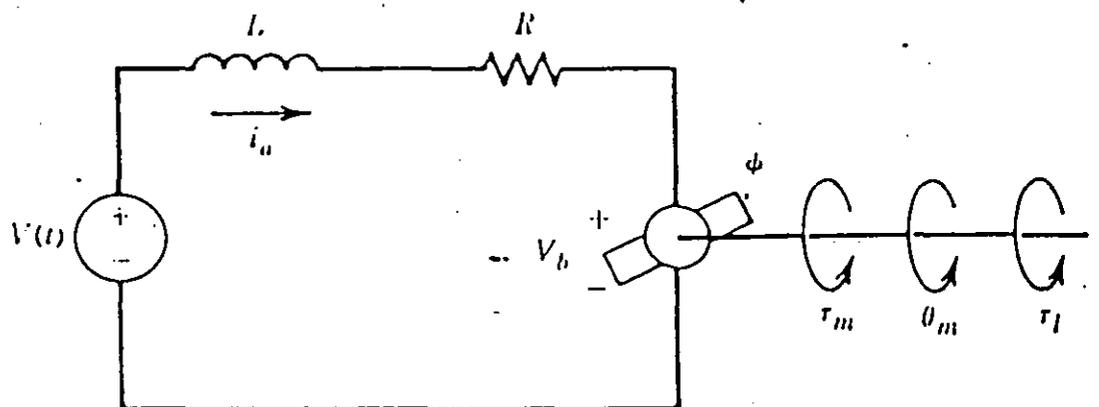
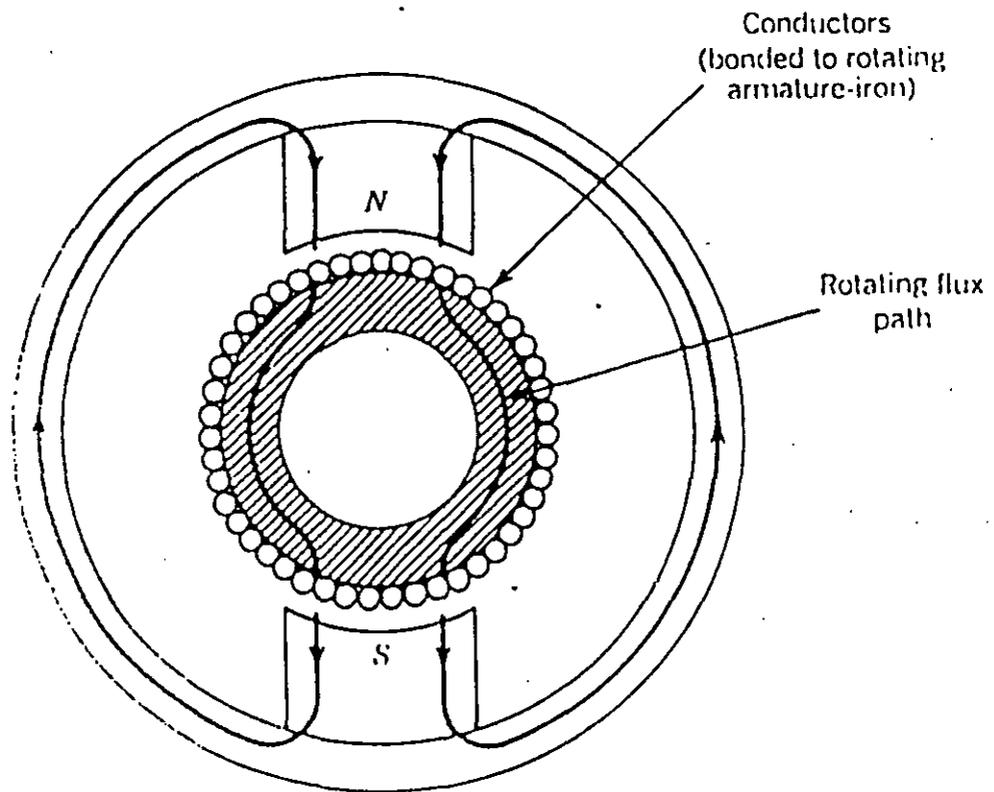
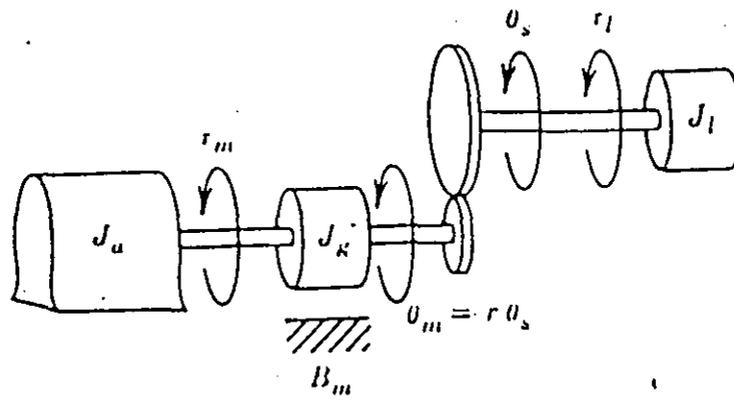
-Posición

-Velocidad

### Manufacturación Integrada por Computadora







## Control Convencional

- .Control Clásico (Bode, Nyquist, función de transferencia)
- .Control Moderno (variable de estado, control óptimo, filtro Kalman)

## Procedimiento de Diseño de un Sistema de Control Convencional

- .Modelado del sistema físico
- .Análisis del modelo
- .Diseño del controlador
- .Simulación
- .Implementación

## Control Difuso

.Metodología de control que asimila la forma de pensar del ser humano incorporando las impresiones en los sistemas físicos

.Lógica difusa (Fundador L. A. Zadeh, U. California, Berkeley, 1965)

.Probabilidad

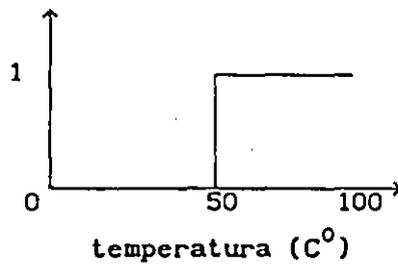
.Inteligencia artificial

.Red neuronal

## Aplicaciones:

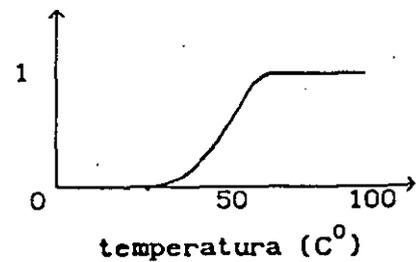
.Sistemas no-lineales

Grado de pertenencia

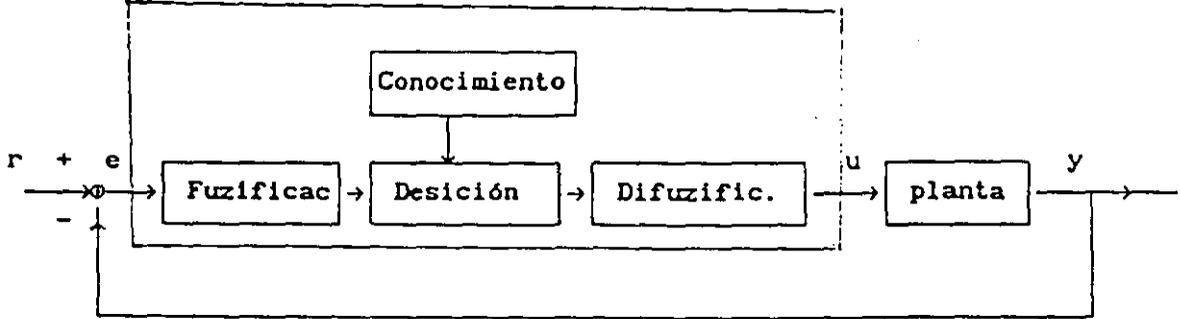


Lógica Clásica

Grado de pertenencia



Lógica Difusa

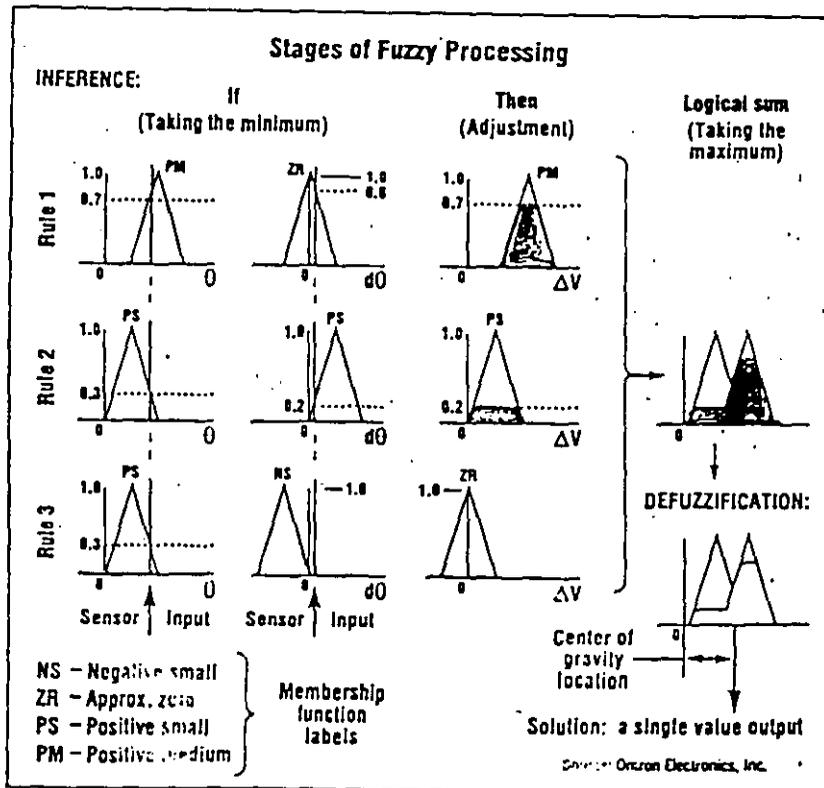


Sistema de Control Difuso

Fuzificación: convertir una variable numérica en una variable lingüística

Difuzificación: convertir una variable lingüística en una variable numérica

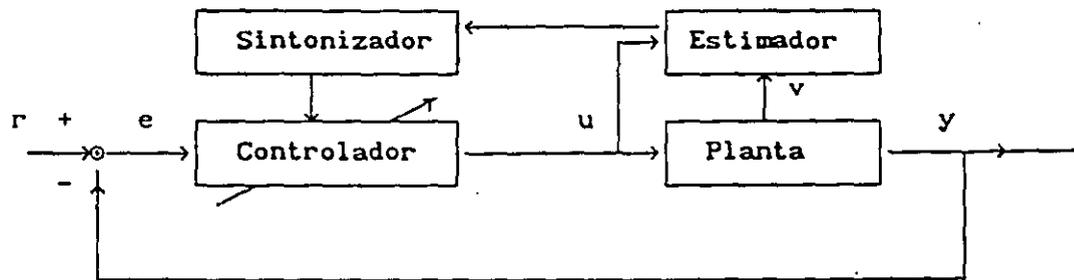
Desición: en términos lingüísticos, se toma una desición a base en los conocimientos



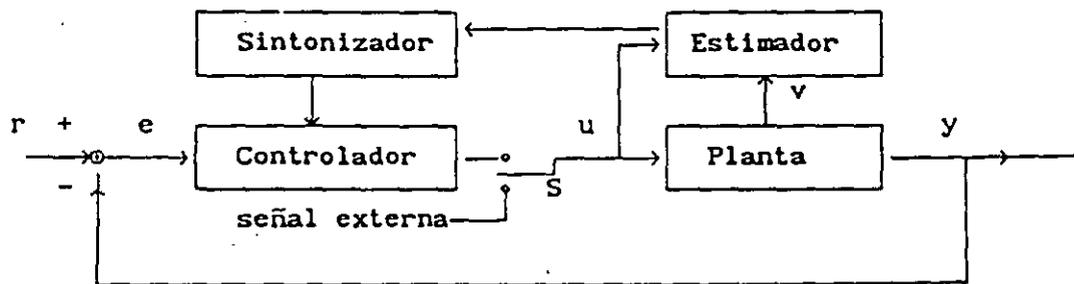
### Controlador Adaptable y Auto-sintonizable

Controlador adaptable: se ajusta el controlador continuamente

Controlador auto-sintonizable: se ajusta el controlador al inicio de la operación, y es fijo durante la operación



Sistema de Control Adaptable



Sistema de Control Auto-sintonizable

# Ejemplos de Aplicación

## 1. Control auto-sintonizable de un motor CD

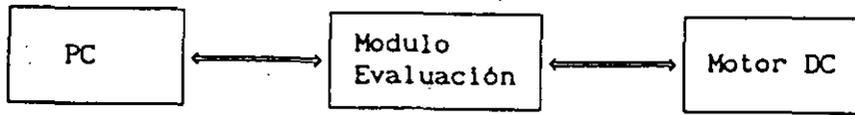
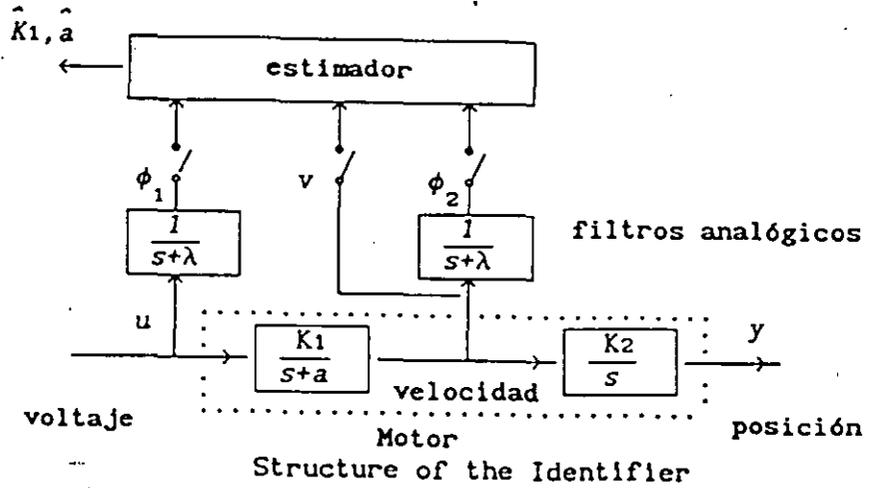


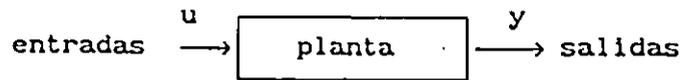
Diagrama de Bloques Funcionales

parámetros del motor



## I. Sistemas de Control Automático

¿Qué es?



Representación de un Sistema Físico

**Planta:** un conjunto de dispositivos físicos y sensores

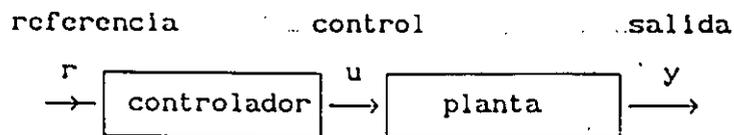
**Entradas:** variables de control

**Salidas:** variables a controlar

**El Problema de Control:** Manipular las entradas para que las salidas tengan cierto comportamiento deseado.

**Control en lazo-abierto:** Se genera el control independientemente de las salidas

**Control en lazo-cerrado:** Se genera el control de acuerdo con las salidas



Un Sistema de Control en Lazo-abierto

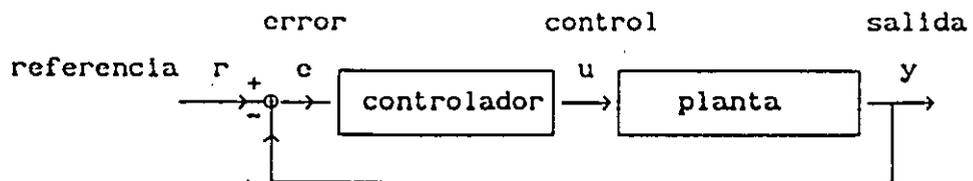
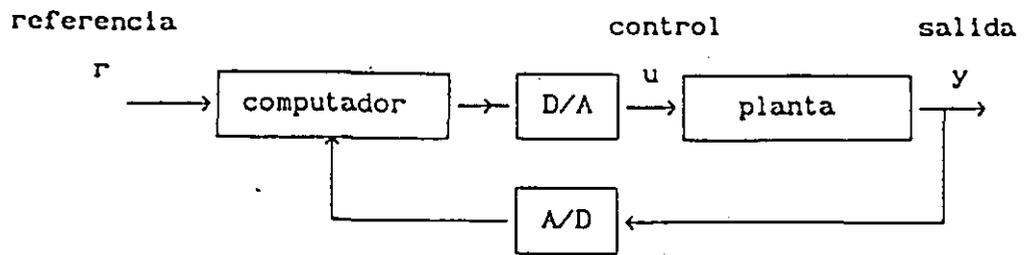


Fig. 1.2. Un Sistema de Control en Lazo-cerrado

**Control Analógico:** Se implementa el controlador con elementos analógicos.

**Control Digital:** Se implementa el controlador usando elementos digitales (convertidores A/D y D/A, microprocesadores, etc.)

# Control Digital

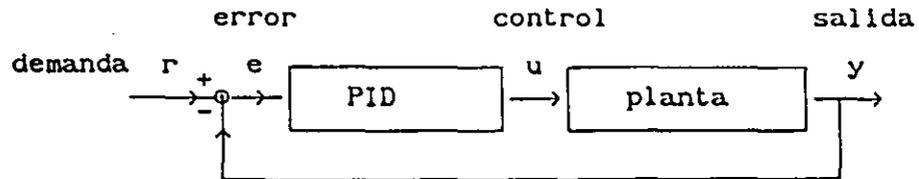


- Ventajas:
- flexibilidad
  - confiabilidad
  - costo
  - fácil en el manejo de datos (almacenamiento, calculo, monitoreo)
  - mejor funcionamiento por medio de aplicar el control avanzado

## Control PID (Proporcional Integral y Derivativo)

El control PID es uno de los más usados en la actualidad por

- sencillez de operación
- buen funcionamiento para una amplia clase de plantas



error:  $e(t) = r(t) - y(t)$

control  $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{de}{dt}$

$\uparrow$  término proporcional       $\uparrow$  término integral       $\uparrow$  término derivativo

$K_p$  = constante proporcional

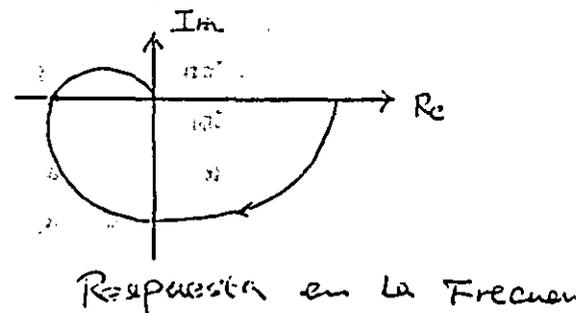
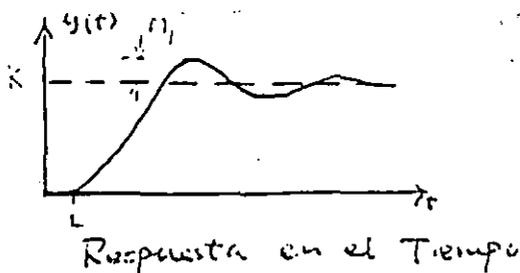
$K_i$  = constante integral

$K_d$  = constante derivativo

Diseño de un controlador PI: encontrar los valores de  $K_p$  y  $K_i$  que dan un buen funcionamiento.

Dos métodos básicos para el diseño de un controlador PI:

- el método temporal
- el método frecuencial



---

## Control-Inteligente

### ¿Cómo surgió?

#### Necesidad de un sistema de control

- .adaptarse al ambiente de operación
- .capacidad de aprendizaje
- .abilidad de tomar decisiones

Teoría de Control  
(dinámicas, electrónicas)

Inteligencia Artificial  
(biología, psicología, computación)

Control Inteligente

```
graph LR; A[Teoría de Control (dinámicas, electrónicas)] --> C[Control Inteligente]; B[Inteligencia Artificial (biología, psicología, computación)] --> C;
```

#### Base

- .Avance teórica
  - teoría de control
  - teoría de identificación
  - técnicas de procesamiento digital de señales
- .Avance tecnológico
  - electrónica digital
  - microprocesadores (microcontroladores, DSP's)
  - sensores

### ¿Qué es?

- .que tenga capacidad de aprendizaje
- .que tenga habilidad de tomar decisiones

### ¿Cómo se hace?

- .Control adaptable y control auto-sintonizable
- .Control difuso
- .Red neuronal
- .Sistemas expertos

## História

1891: Leeds & Northrup, PID (Electromax V)

1982: Asea Boveri Suecia, MV, (Novatunc)

1884: SattControl Suecia, PID

1984: Foxboro, EEUU, PID (Exact)

1987: Yokokawa, Japón, PID

1987: Fisher Control, EEUU, PID

## Electromax V

.Planta: modelo discreto de segundo orden

.Diseño del PID: asignación de polos

.Aplicación: control de temperatura

.Modos de operación: fijo, adaptable auto-sintonizable

.Método de estimación: gradiente (lazo-cerrado)

.Información apriori: -PID nominal

-tiempo de respuesta de la planta

-set points admisible

.Pre-sintonización: sí

## Exact

.Planta: no se necesita modelo

.Diseño del PID: Ziegler-Nichols (Temporal)

.Aplicación: en general

.Modos de operación: fijo, auto-sintonizable

.Método de estimación: respuesta transitoria (lazo-cerrado)

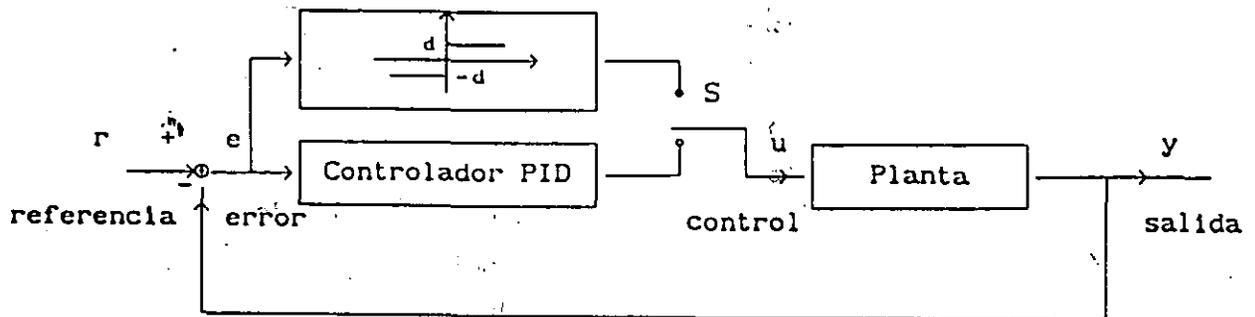
.Información apriori: -PID nominal

-set points admisible

.Pre-sintonización: sí

## SattControl ECA 90/Fisher Control DPR 900

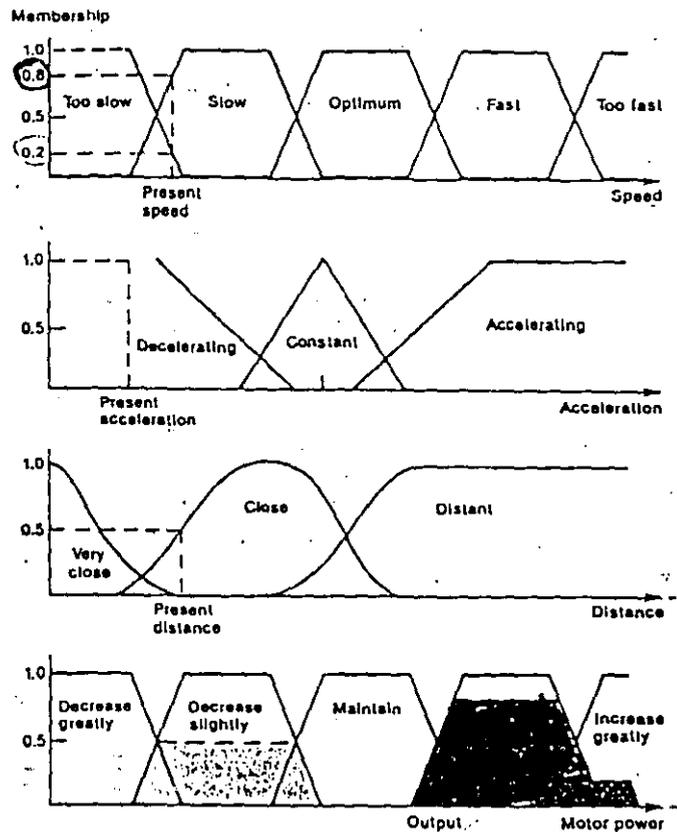
- .Planta: no se necesita modelo
- .Diseño del PID: Ziegler-Nichols (Frecuencial)
- .Aplicación: en general
- .Modos de operación: fijo, auto-sintonizable
- .Método de estimación: respuesta estacionaria (lazo-cerrado)
- .Información apriori: -set points admisible
- .Pre-sintonización: sí



Controlador Auto-sintonizable

## Novatune

- .Planta: función de transferencia discreta
- .Diseño del Controlador MV: adaptable directo
- .Aplicación: en general
- .Modos de operación: fijo, adaptable
- .Método de estimación: mínimos cuadrados recursivos (lazo-cerrado)
- .Información apriori: -el orden de la planta  
-set points admisible
- .Pre-sintonización: sí



[2] An automatic controller for a vehicle provides a simple application of fuzzy set theory. Such a controller is designed to optimize travel time by monitoring speed and distance from a destination and reacting accordingly. Its three inputs are present speed, acceleration, and distance from the destination; its one output is motor power.

The vehicle is currently laboring ever more slowly up a steep hill. The membership functions assign linguistic variables to the inputs: acceleration, "decelerating"; distance, "close"—both with a weight of 1. The present speed is a member of the linguistic variable "slow" and "too slow," with weights of 0.8 and 0.2, respectively.

The rule set consists of several rules, but only three are shown executing here:

IF speed is TOO SLOW and acceleration is DECELERATING,  
THEN INCREASE POWER GREATLY

IF speed is SLOW and acceleration is DECELERATING,  
THEN INCREASE POWER SLIGHTLY

IF distance is CLOSE,  
THEN DECREASE POWER SLIGHTLY

The confidence level of the result of any rule will be the minimum of the confidence levels of any of the input variables to that rule, causing the output to be "clipped." The centroid of the three areas is calculated to find the appropriate output of the system, in this case a moderate increase in power, because, although the vehicle is slowing on the hill, the destination is near.

Reglas:

## Red Neuronal

.Arquitectura paralelo similar a un sistema nervioso para procesar informaciones

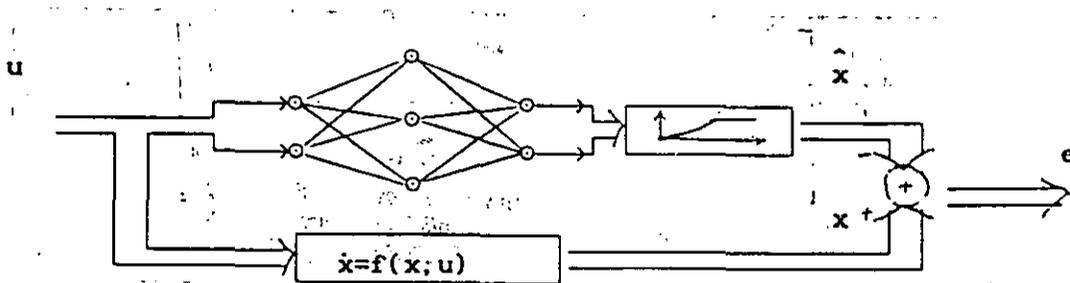
.Con una red de dos niveles se puede aproximar cualquier función no-lineal continua

Tres tipos de redes neuronales más comunes en sistemas de control

.Perceptron de multi-nivel

.Map de Kohonens

.Red Hopfield



Aprendizaje: entrenar la red ajustando los pesos de cada nodo

### Aplicaciones

.Control de plantas no-lineales

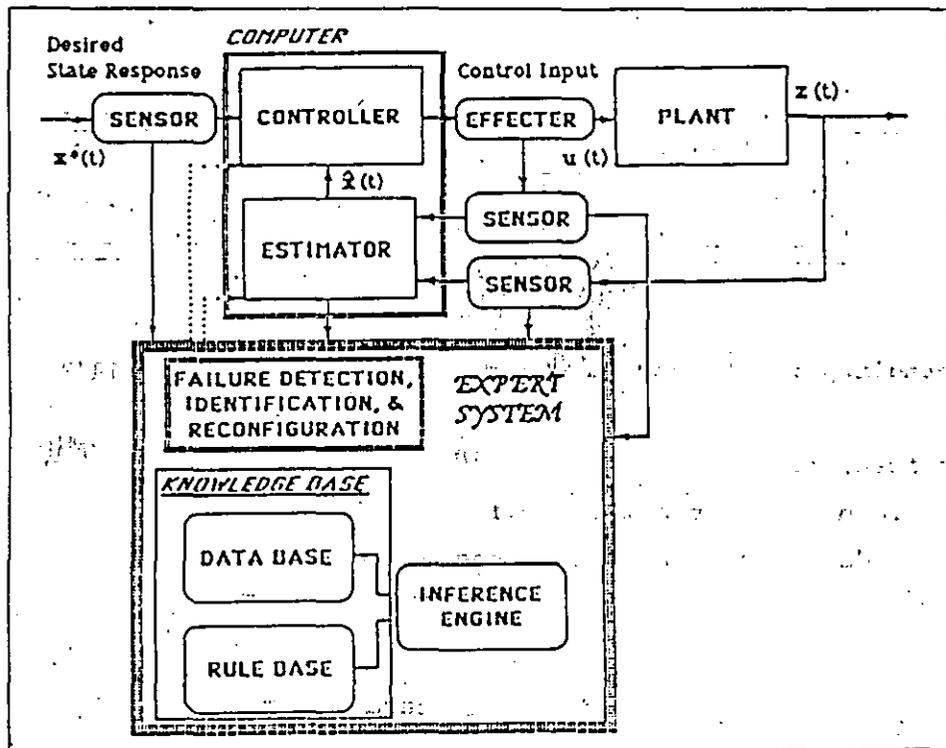
.Identificación de sistemas no-lineales

## Sistemas Expertos

Programas de computadora que usan las relaciones heurísticas y hechos como lo hace un experto

### Aplicaciones

- .Control tolerante a fallas: -detección de fallas
- identificación
- reconfiguración



$$\hat{k}_1 = \hat{\theta}_2$$

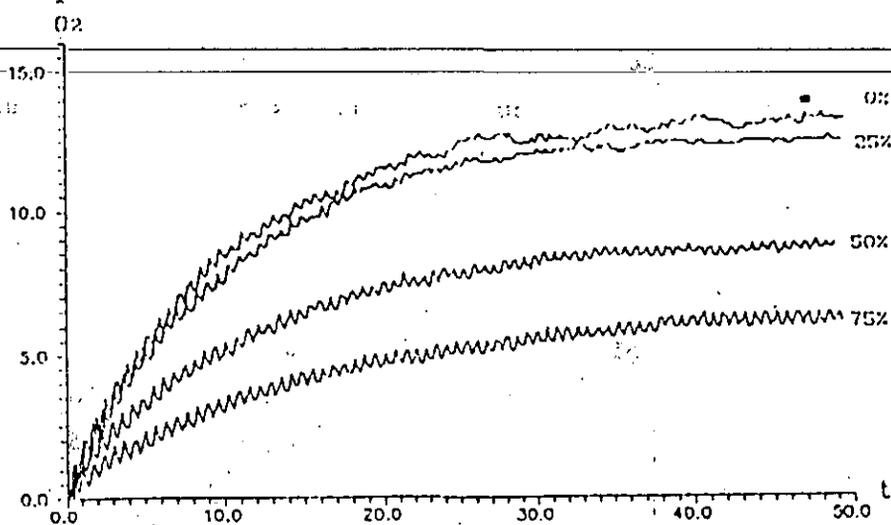
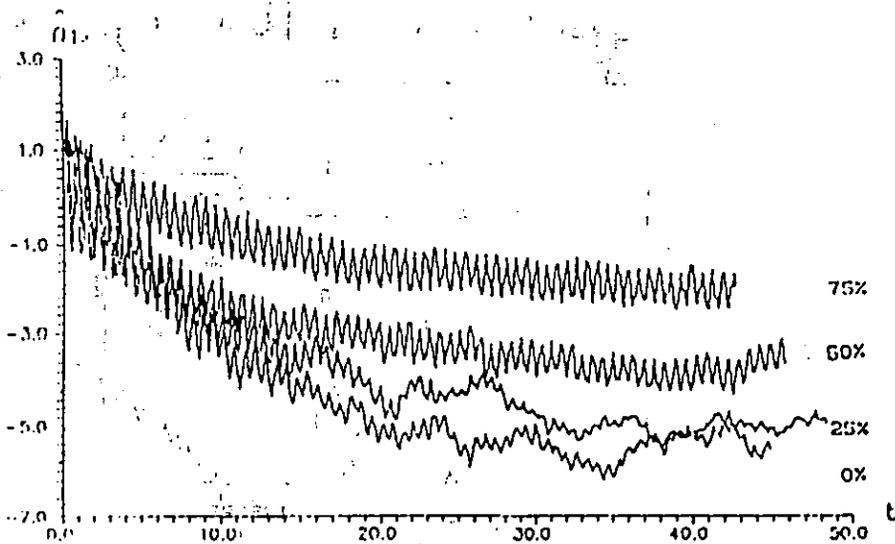


Fig 4.8  $\hat{\theta}_2(t)$  para diversas posiciones del freno.



$$\hat{a} = 1 - \hat{\theta}_1$$

Fig 4.9  $\hat{\theta}_1(t)$  para diversas posiciones del freno.

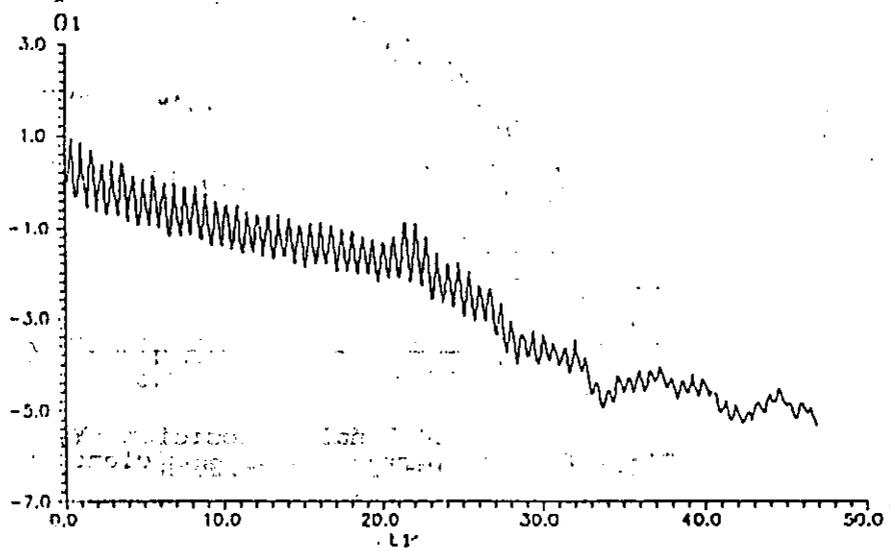


Fig. 4.11  $\hat{\theta}_1(t)$  con perturbación en  $t_1=21$  seg.

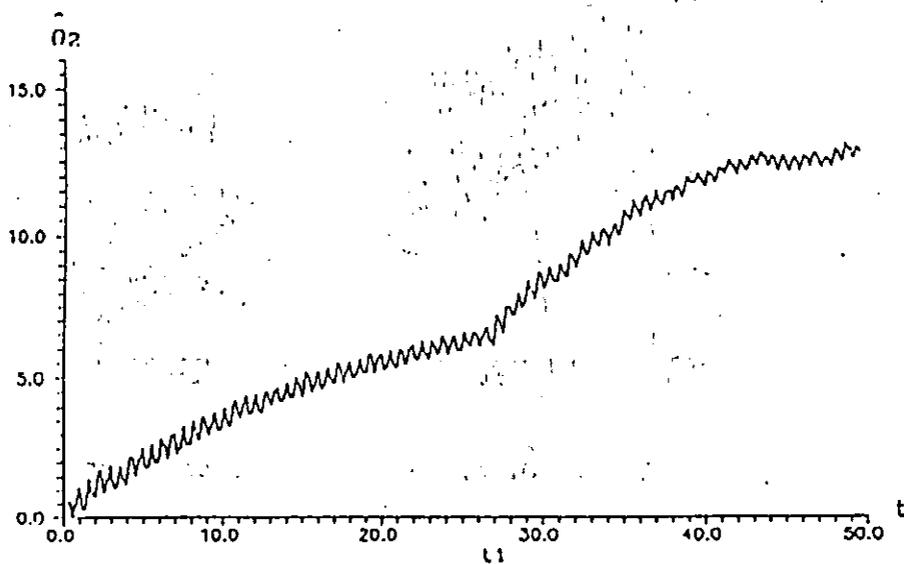


Fig. 4.12  $\hat{\theta}_2(t)$  con perturbación en  $t_1=27$  seg.

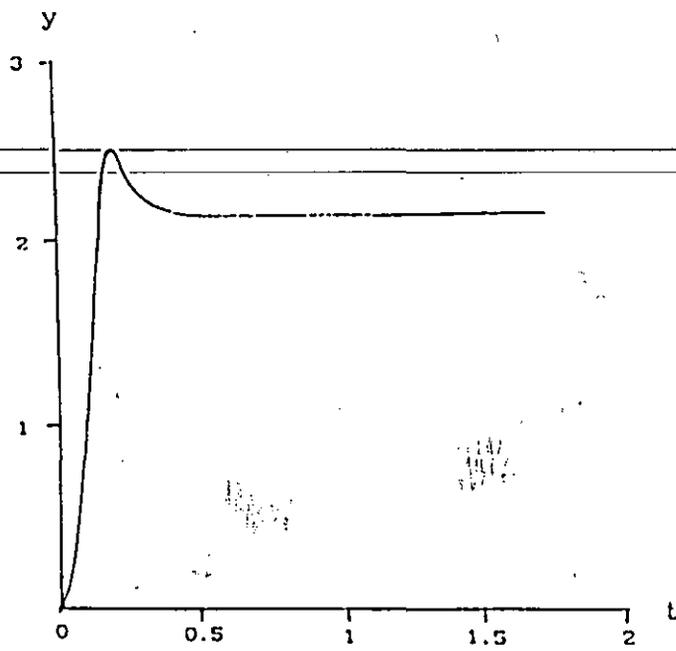


Fig. 4.14 Señal de posición (Y)  
 $M_p = 16\%$  ,  $t_s = 0.36$  s

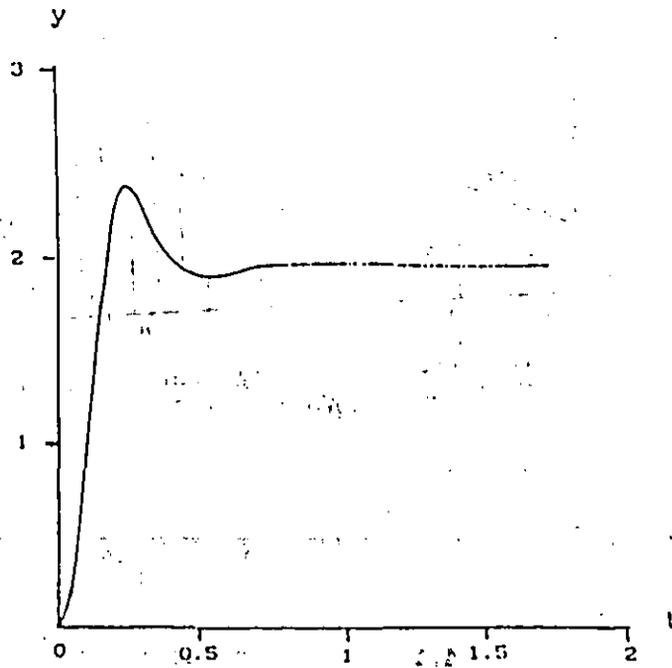
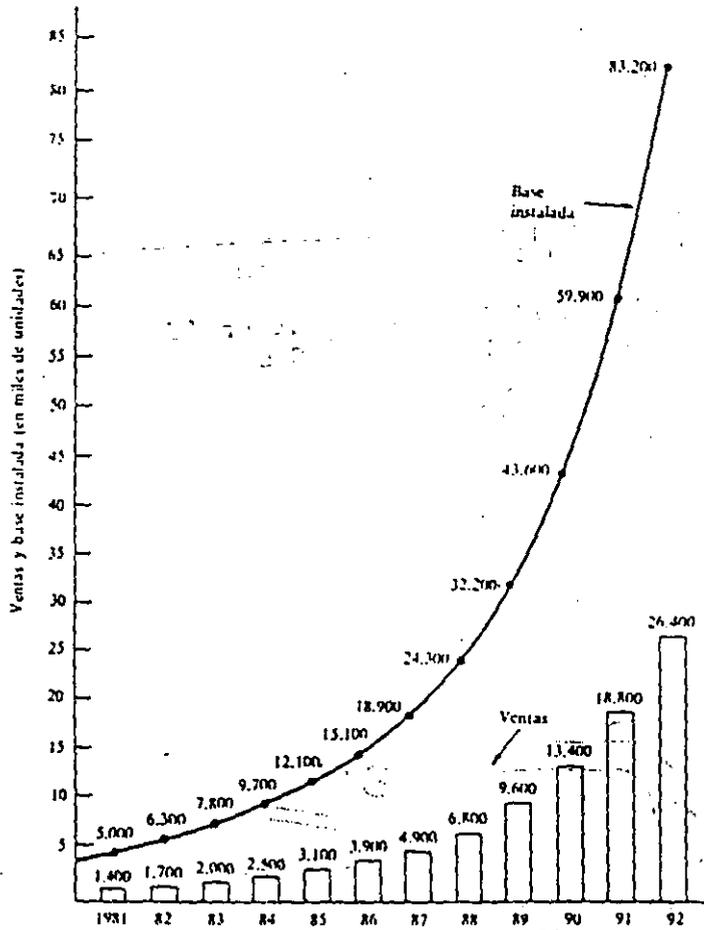


Fig. 4.15 Señal de posición (Y)  
 $M_p = 23.42\%$  ,  $t_s = 0.508$  s

# Perspectivas



Ventas anuales reales y previstas y el número resultante de instalaciones de robots industriales en Estados Unidos en los primeros años 90.

## Problemas Relacionados

-Mecánica

-Planeación de trayectorias

-Visión

-Lenguaje de programación

-Instrumentación

• -Control

