

# ACTUADORES

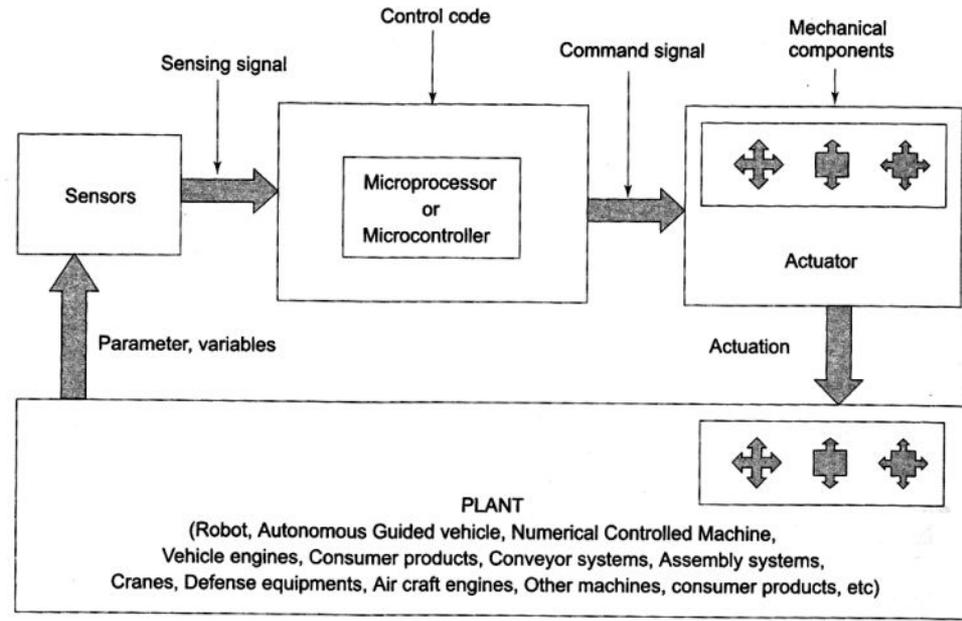
Fundamentos de Robótica Industrial

Versión 2025



## Introducción

Actuación (en este contexto) es el proceso de convertir energía (hidráulica, eléctrica, etc.) en energía mecánica



Simple sensor actuator connection [ Mahalik, 2003]

## Introducción

Si consideramos a las articulaciones y los eslabones como el esqueleto del robot, ***los actuadores podrían considerarse como los músculos.***

El objetivo de los actuadores es provocar el movimiento de los elementos del robot, según las órdenes dadas por la unidad de control.

Los primeros robots industriales utilizaban actuadores ***hidráulicos***.

El avance de la tecnología permitió que los actuadores ***eléctricos***, desarrollaran prestaciones similares en temas de potencia, con bajo peso, volumen e inercia, motivando a que actualmente, casi la totalidad de los robots industriales existentes utilicen esta opción.

Existen 3 grandes grupos (y otros menores) en los que pueden ser primeramente ***clasificados*** los actuadores:

- Actuadores Neumáticos
- Actuadores Hidráulicos
- Motores Eléctricos
- Actuadores de aleación de memoria de forma (Shape Memory Alloy SMA), actuadores piezoeléctricos, Actuadores magnetostrictivos

## Introducción - características

Cada uno de estos sistemas presenta **características** diferentes, que deben de ser consideradas a la hora de seleccionar el actuador correspondiente para la tarea que deberán desarrollar. En general se busca que todos ellos posean las siguientes características:

- Baja inercia y relación potencia/peso alta
- Posibilidad de soportar sobrecargas y capacidad de entregar impulsos de torque
- Capacidad de desarrollar altas aceleraciones
- Amplio rango de velocidad
- Alta precisión en posición
- Estabilidad en entrega de torque, para garantizar rotaciones continuas aún a bajas velocidades

## Introducción - características

Para la selección de actuadores, se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Potencia.
- Controlabilidad.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Costo.

## Introducción - características

### ***Rigidez - Deformabilidad***

La ***Rigidez*** de un sistema es la resistencia a la deformación.

- En un sólido → resistencia a la deformación elástica
- En un fluido → resistencia a la compresión

La rigidez de un sistema es una característica importante, ya que está relacionado a la ***rapidez de respuesta***, la ***precisión*** y la capacidad del mismo de ***fijar una posición***.

Sin embargo, en ocasiones, un sistema más ***Deformable*** es preferible. Por ejemplo en los casos en que los robot deben:

- Posicionar una pieza dentro de otra,
- trabajar con piezas sensibles a la fuerza externa,
- ejercer cargas sobre otras superficies, etc.

## Introducción - características

### Engranajes reductores

En muchos casos, la velocidad a la que el actuador gira es muy elevada para la tarea que se debe desempeñar, y además, a menores velocidades de giro se obtienen mayores torques. Es por esto que habitualmente se encuentran **reductores de velocidades de engranajes**.

Considere el siguiente sistema:

- Balance de fuerzas:

$$T_l = N T_m$$

- Ecuación del reductor

$$\dot{\theta}_l = \frac{1}{N} \dot{\theta}_m$$

- Derivada de la Ec. Red.

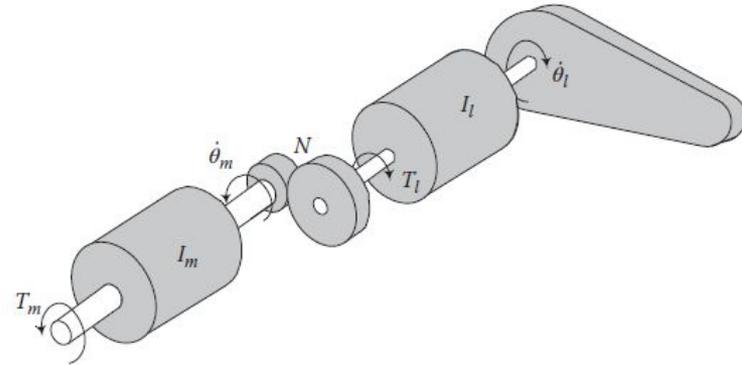
$$\ddot{\theta}_l = \frac{1}{N} \ddot{\theta}_m$$

- 2<sup>da</sup> ley de Newton

$$T_m - \frac{1}{N} T_l = I_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m \quad T_l = I_l \ddot{\theta}_l + b_l \dot{\theta}_l$$

$$T_m = I_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{N} (I_l \ddot{\theta}_l + b_l \dot{\theta}_l)$$

$$T_m = I_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{N^2} (I_l \ddot{\theta}_m + b_l \dot{\theta}_m)$$

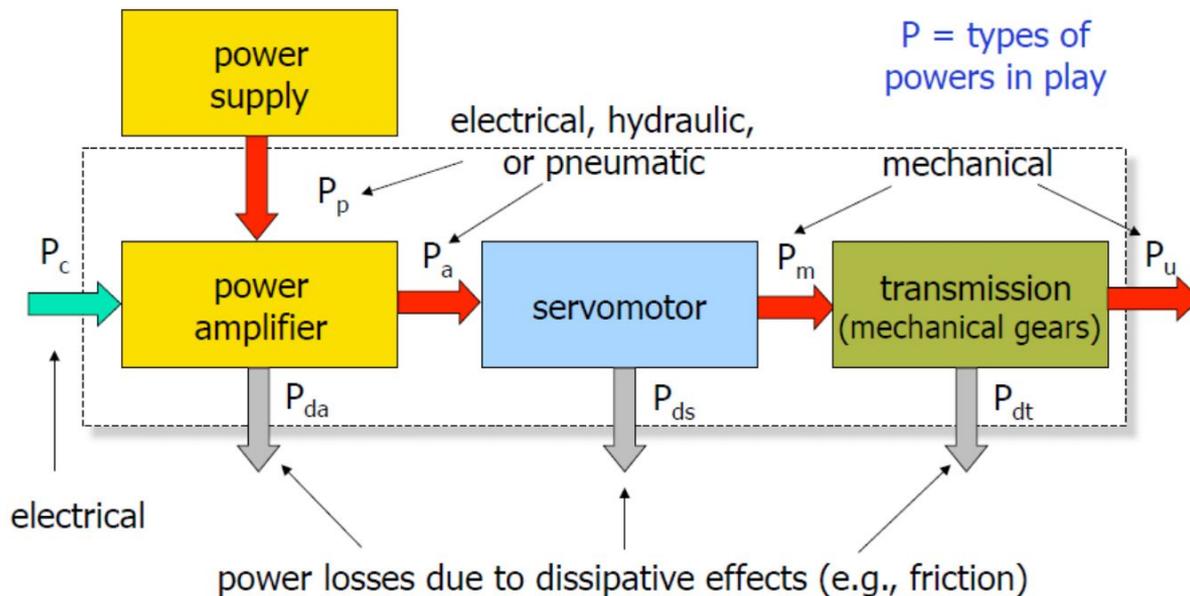


$$I_{Efectivo} = \frac{1}{N^2} I_l \quad I_{Tot} = \frac{1}{N^2} I_l + I_m$$

Si  $N = [20-100] \rightarrow I_{Efectivo} = [1/400 : 1/10.000]$ .  $I_l$  (en gral:  $I_l > 5 I_m$   $\rightarrow$  es una reducción importante!!)

# Introducción - características

## Engranajes reductores



## Introducción - características

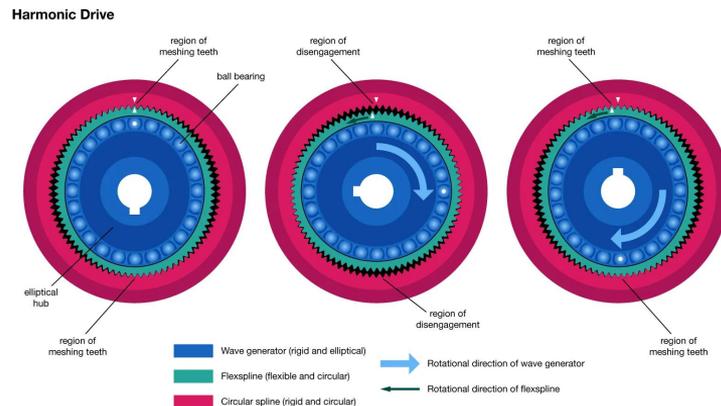
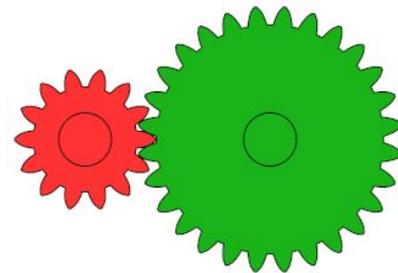
### ***Engranajes transmisión***

- Optimizan la transferencia de energía mecánica de los actuadores a los eslabones
- Transforman alta velocidad/bajo torque - baja velocidad/alto torque
- Transforman de movimiento rotacional a movimiento lineal
- Permiten mejoras en el desempeño estático y dinámico, por ejemplo trasladando elementos de peso donde las inercias no perjudiquen los movimientos del robot

## Introducción - características

### Engranajes transmisión - TIPOS

- Engranajes rectos, permiten modificar la dirección y/o trasladar el eje (rotacional o lineal) de potencia del motor
- Tornillos de potencia/tornillos sinfín, convierten movimiento rotacional en movimiento lineal
- Cadenas y correas: permiten separar la posición del motor con el punto de aplicación
- Ejes de transmisión
- Engranajes armónicos (muy utilizados en robótica e industria aeroespacial)
- Engranajes cíclicos



## Introducción - características



## Introducción - características



High shock overload capacity  
50% of the disc profile in contact  
to the stationary ring gear housing



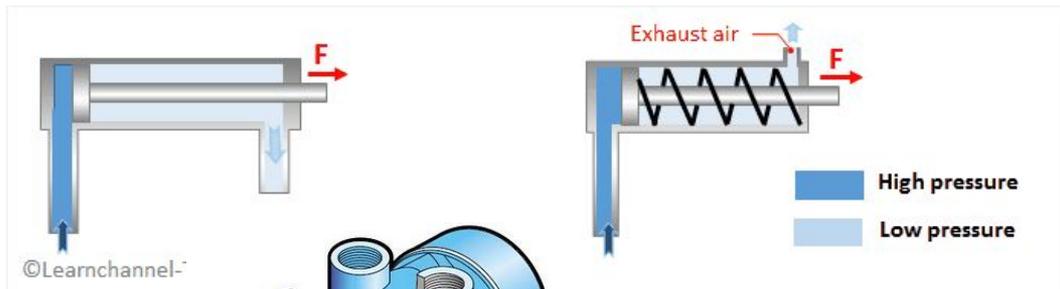
Conventional: Only 2-3 teeth in contact  
danger of fault breakage at overloads

# Actuadores neumáticos

Este tipo de actuadores utilizan como fuente de poder **aire comprimido entre 3-10 bar** usualmente.

Existen diferentes tipos:

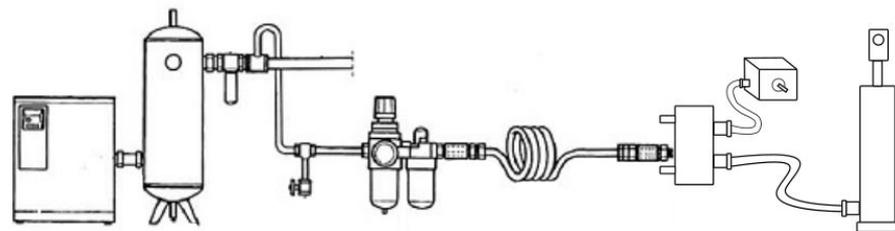
- Cilindros simple efecto:
  - Normal abierto
  - Normal cerrado
- Cilindros doble efecto
- Motor neumático
  - Radial
  - Axial



# Actuadores neumáticos

## Características

- **Necesita un sistema de acondicionamiento del aire.**
  - Compresor
  - Filtros
  - Reguladores de presión
  - Separador de gotas
  - Refrigeración
  - Lubricantes
  - Tanque de almacenamiento
  - Electroválvulas
  - Actuadores
- **Razón potencia/peso baja** por las bajas presiones de trabajo
- Cambio de volumen de aire bajo carga → **Controlar la posición exacta es muy complejo** → **se usan on-off**
- **Carga inercial baja**, dado que el sistema de presurización y almacenamiento se encuentran alejado de los actuadores
- **Actuadores simples, robustos y seguros (ante fugas solo se escuchará ruido)**

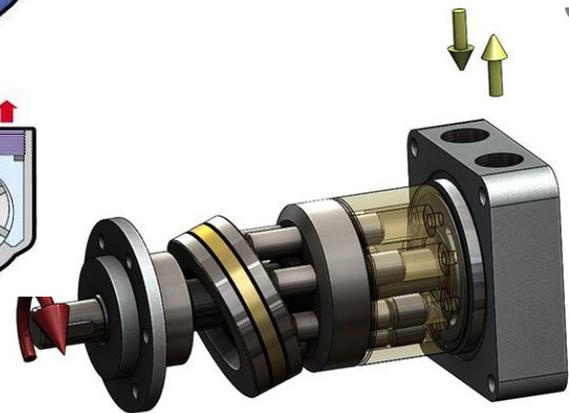
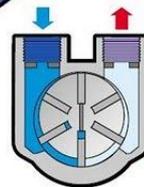
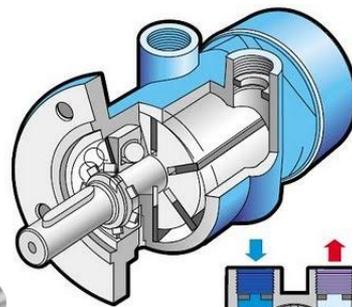
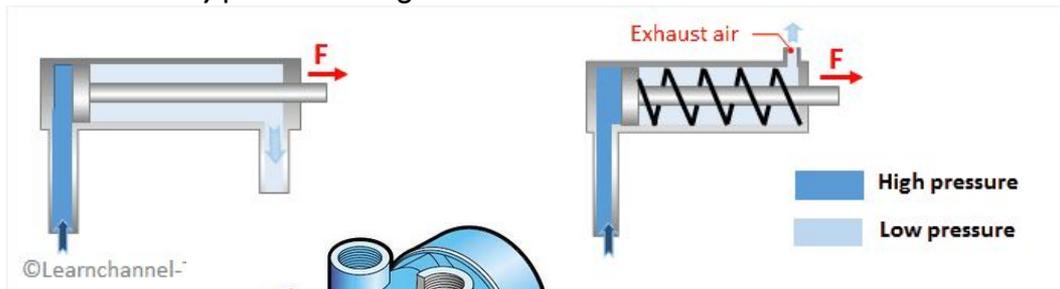


## Actuadores hidráulicos

Este tipo de actuadores son muy similares a los neumáticos, pero utilizan como fuente de poder **aceite comprimido entre 30-100 bar** (10 veces la presión del aire) pudiendo llegar incluso hasta 300 bar.

Existen diferentes tipos:

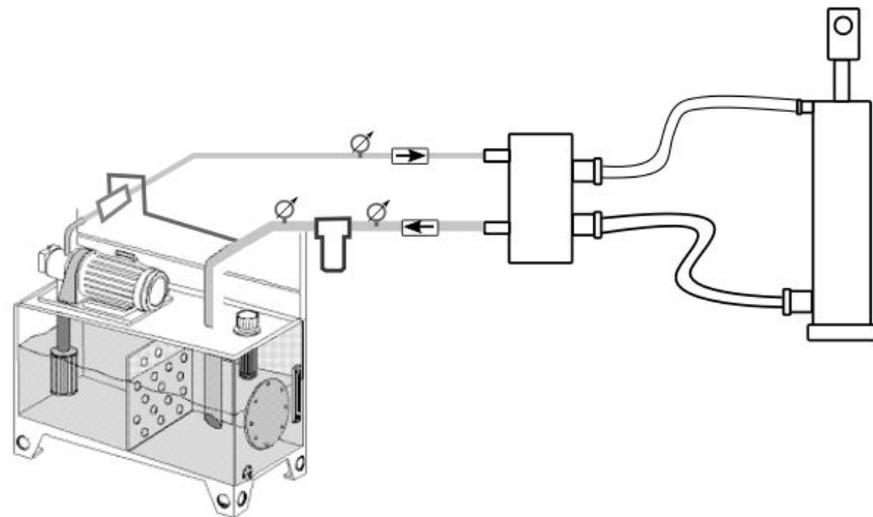
- Cilindros simple efecto:
  - Normal abierto
  - Normal cerrado
- Cilindros doble efecto
- Motor neumático
  - Radial
  - Axial



# Actuadores hidráulicos

## Características

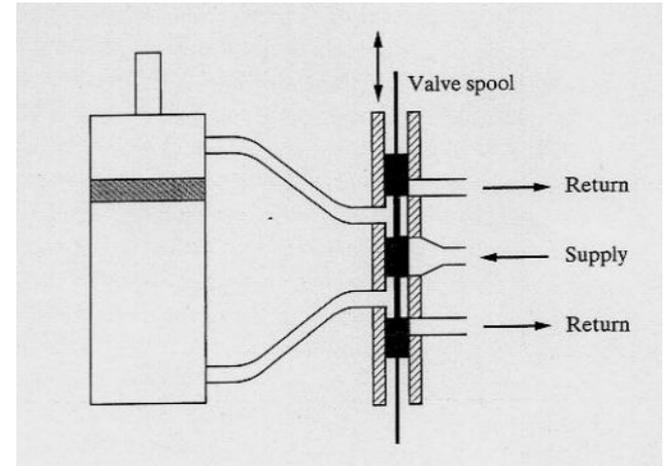
- **Necesita un sistema de suministro de aceite.**
  - Reservorio
  - Filtros
  - Bomba de desplazamiento positivo
  - Refrigeración
  - Acumulador
  - Válvulas: Control / Antiretorno / Alivio
  - Actuadores
- **Instalación compleja** por cantidad de componentes.
- **Altas presión favorecen fugas.**
- **Fluido de trabajo puede ser contaminante e inflamable.**
- **Razón potencia/peso alta** por las altas presiones de trabajo
- Compresibilidad casi nula bajo carga → **Posibilidad de controlar la posición exactamente en todo el rango mediante servocontrol.**
- Estabilidad frente a cargas estáticas → **Mantiene la posición sin aporte de energía.**
- **Carga inercial baja, (pero mayor que la neumática)** dado que el sistema de presurización y almacenamiento se encuentran alejado de los actuadores.



## Actuadores hidráulicos

### *Funcionamiento y control*

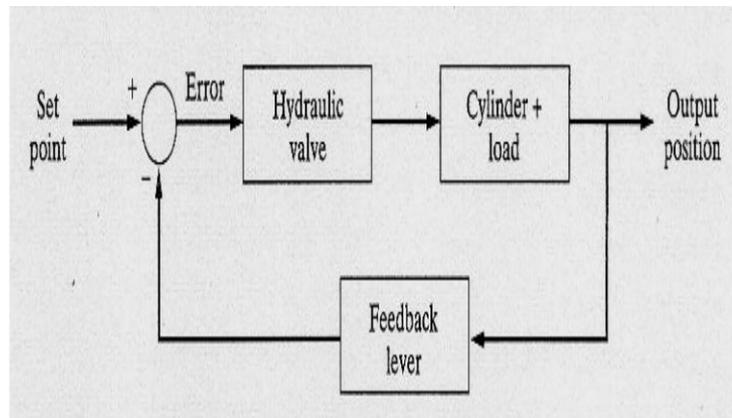
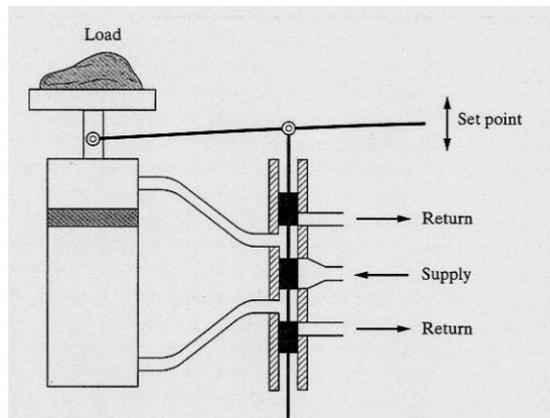
- La válvula direccional es una válvula balanceada, es decir, la presión a ambos lados del vástago es igual por lo que se requieren pequeñas fuerzas para moverla independiente de la presión del sistema
- Cuando se conecta un servomotor eléctrico al vástago se crea una servoválvula, la cual junto con el cilindro hidráulico forman un servomotor hidráulico.
- La velocidad del cilindro se controla de acuerdo al tamaño de apertura
- La distancia se calcula con el tiempo de apertura



# Actuadores hidráulicos

## *Funcionamiento y control*

- Para su funcionamiento un controlador determina la corriente a aplicar en el servomotor así como el tiempo que dicha corriente es aplicada para controlar el vástago
- El proceso de control se forma así:
  - Posición y velocidad del servomotor se calculan en el controlador
  - Determina Intensidad y duración
  - El cilindro hidráulico realiza el movimiento
  - Los sensores proveen feedback para mayor precisión y control continuo



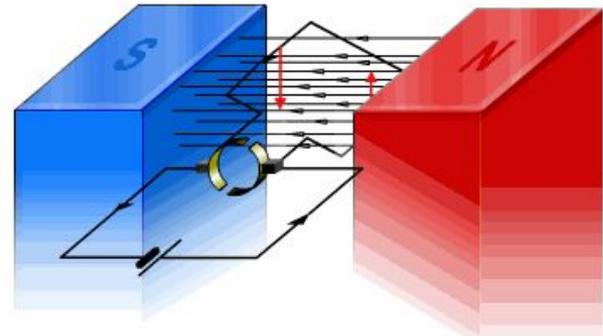
## Actuadores eléctricos

Este es actualmente el tipo de actuadores más ampliamente utilizados en robótica, debido a sus ventajas frente a los hidráulicos y a los neumáticos.

El avance de la tecnología permitió que estos actuadores sean competitivos en costo, permitiendo además que sean capaces de trabajar con cargas equiparables, a una velocidad variable en general y con instalaciones simples.

### ***Principio de funcionamiento:***

Cuando una corriente eléctrica pasa por un conductor que está ubicado dentro de un campo magnético orientado de forma no paralela al conductor, éste último experimenta una fuerza electromotriz normal al plano formado por las direcciones del campo y de la corriente.



## Actuadores eléctricos

Existe una gran variedad de motores eléctricos en el mercado, pero entre los más populares se pueden destacar los siguientes tipos:

- Motores de corriente continua (DC)

- Controlados por inducido
- Controlados por excitación

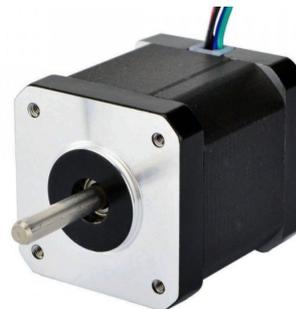


- Motores de corriente alterna (AC)

- Síncronos
- Asíncronos



- Motores paso a paso



## Actuadores eléctricos

### **Motores de corriente continua (DC)**

Motores muy usados en la industria:

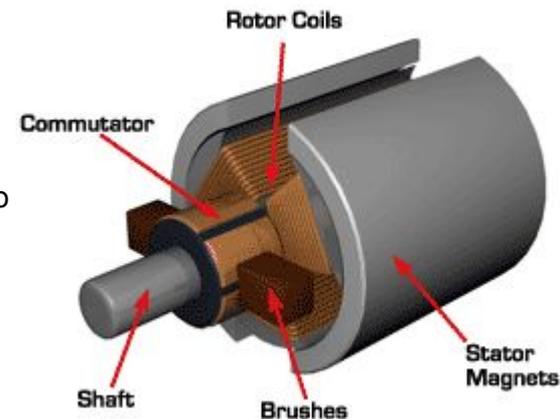
- Robustos
- Confiables (velocidad de rotación de 1.000 a 3.000 rpm con un comportamiento muy lineal)
- Relativamente altas potencias (hasta 10 kW)

Consisten en:

- Un estator, con un campo magnético, producido por:
  - **imanes** (más estable) o
  - por un devanado que transporta corriente.
- Un rotor con otro devanado que transporta una corriente fija, pero que debe ser conmutada de forma sincronizada al giro del rotor.
- Controlan velocidad cambiando el voltaje y el sentido de giro con la polaridad

Los más usados son los controlados por inducido (variando la tensión del devanado del rotor) porque se logran velocidades más estables.

Para lograr esta conmutación se utilizan escobillas, que pueden provocar chispas y requieren mantenimiento habitual.



## Actuadores eléctricos

### ***Motores de corriente continua (DC)***

Motores sin escobillas (brushless)

- Más comunes en la actualidad
- Mayores eficiencias
- No hay desgaste en rotor ni escobillas por no haber contacto mecánico
- Control más preciso, ya que un sistema de control retroalimentado decide qué bobinas energizar
- Menores inercias

Consisten en:

- Un estator, con un campo magnético, producido por:
  - varios devanados cuya corriente es controlada para lograr la rotación
- Un rotor con imanes permanentes



## Actuadores eléctricos

### **Motores de corriente alterna (AC)**

Motores muy usados en la industria y cuya velocidad viene dada por los pares de polos y la frecuencia de la red. Esto provocaba que en robótica no se utilizaran hasta hace algunos años, cuando los motores **síncronos** aparecieron con:

- Posibilidad de variar su velocidad
- Microelectrónica con gran capacidad de control.

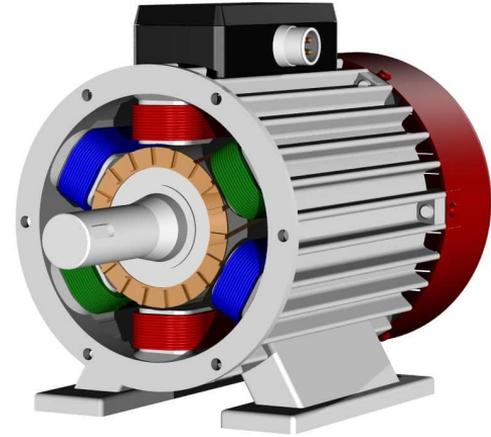
Consisten en:

- Un estator, con 3 (o 6) devanados iguales por el cual circula la corriente alterna y que son inducidos por el campo magnético.
- Un rotor construido con imanes permanentes.

No hace falta el uso de escobillas, pues la conmutación viene dada por el tipo de corriente. Esto provoca que el mantenimiento necesario del equipo sea mínimo.

El control de la velocidad se realiza a través de un variador de frecuencia.

Los equipos poseen un bucle de retroalimentación para saber la posición del rotor en cada instante para no perder sincronismo.



## Actuadores eléctricos

### **Motores paso a paso**

Motores cuya principal característica es que en cada paso giran un ángulo dado fijo (mínimo de  $1.8^\circ$ ) y conocido, pero su potencia es baja. Esto los hace:

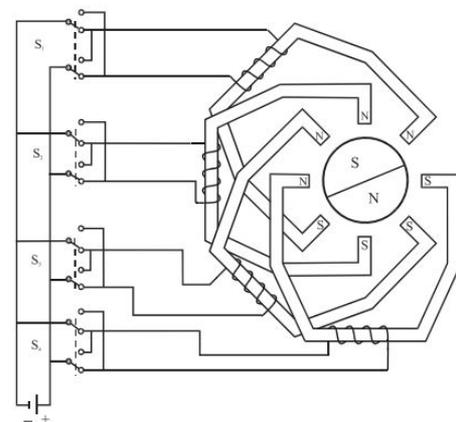
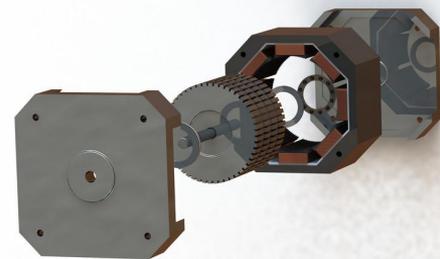
- Robustos (fiables)
- Simples (y fáciles de controlar)
- Versátiles (ligeros)

Consisten en:

- Un estator, con juegos de conductores magnéticos que son imantados a necesidad para provocar la orientación deseada del campo magnético alrededor del rotor.
- Un rotor construido con imanes permanentes, que se orienta según el campo producido por el estator.

Suelen bloquearse en la posición final cuando son desenergizados por el *par residual* y funcionamiento a saltos en velocidades bajas.

Necesitan de un microprocesador (shield) para controlarlo.



# Actuadores eléctricos

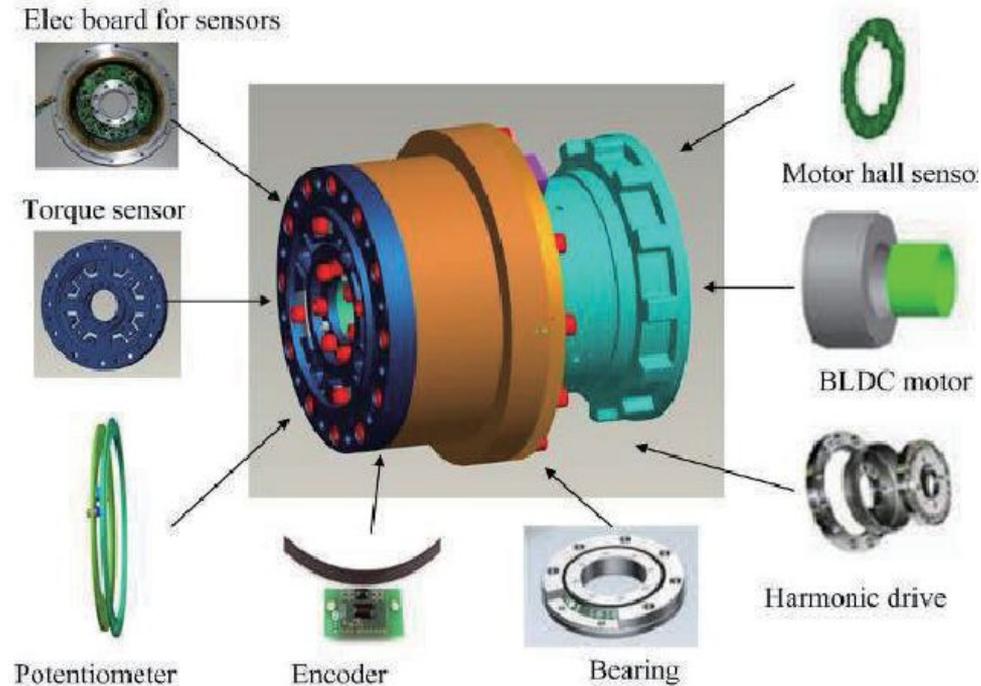
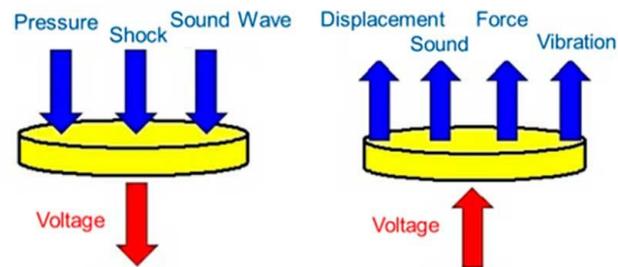


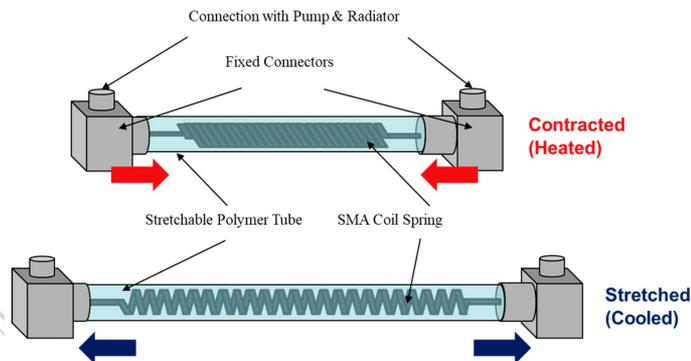
Fig. 2. Components of the modular shoulder and elbow joint

## Actuadores eléctricos

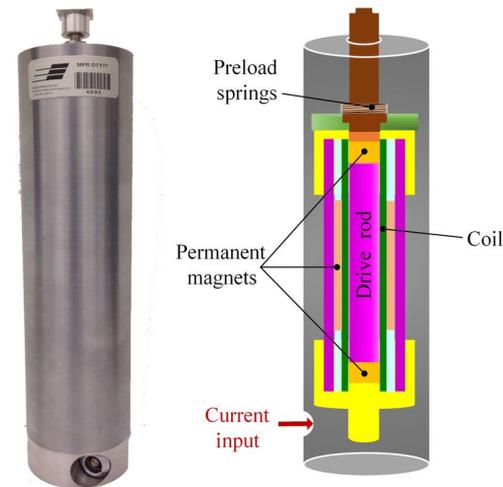
**Actuadores Piezoeléctricos, por ejemplo para posicionar lentes de precisión, o dosificar pequeñas cantidades.**



### Aleación de memoria de forma (Shape Memory Alloy SMA)



### Actuadores magnetostrictivos

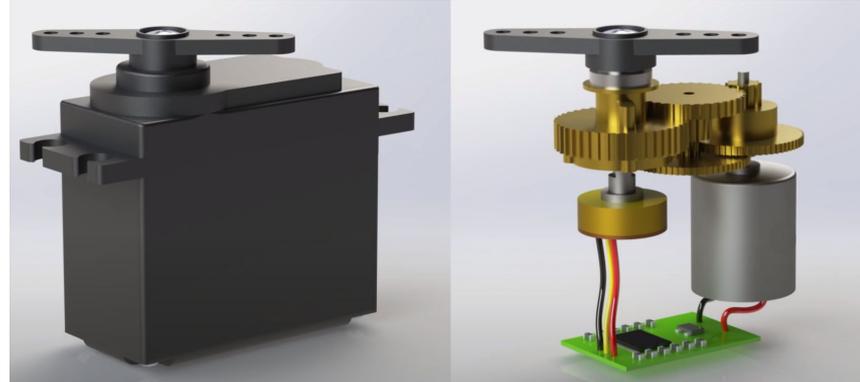


## Tabla comparativa

	<b>Neumático</b>	<b>Hidráulico</b>	<b>Eléctrico</b>
<b>Energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aire a presión (5-10 bar)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceite mineral (50-100 bar )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente eléctrica</li> </ul>
<b>Opciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cilindros</li> <li>• Motor de paletas</li> <li>• Motor de pistón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cilindros</li> <li>• Motor de paletas</li> <li>• Motor de pistones axiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente continua</li> <li>• Corriente alterna</li> <li>• Motor paso a paso</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baratos</li> <li>• Rápidos</li> <li>• Sencillos</li> <li>• Robustos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rápidos</li> <li>• Alta relación potencia-peso</li> <li>• Autolubrificantes</li> <li>• Alta capacidad de carga</li> <li>• Estabilidad frente a cargas estáticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisos</li> <li>• Fiables</li> <li>• Fácil control</li> <li>• Sencilla instalación</li> <li>• Silenciosos</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad de control continuo</li> <li>• Instalación especial (compresor, filtros )</li> <li>• Ruidoso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil mantenimiento</li> <li>• Instalación especial</li> <li>• Instalación especial (filtros, eliminación aire)</li> <li>• Frecuentes fugas</li> <li>• Caros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia limitada</li> </ul>

# Servos

- se diferencian de los motores DC por poseer 3 cables (Power, ground and control)
- Se componen de 4 partes, motor DC, reductor, control y sensor de posición
- Rotación limitada, por ejemplo, a 300° en los AX12



**FIN!**

