

Capítulo II:

Estructura y diseño de

mecanismos

Introducción a la Robótica

Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

2.4

Sistema de sensado

2.5

Sistema de control

Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

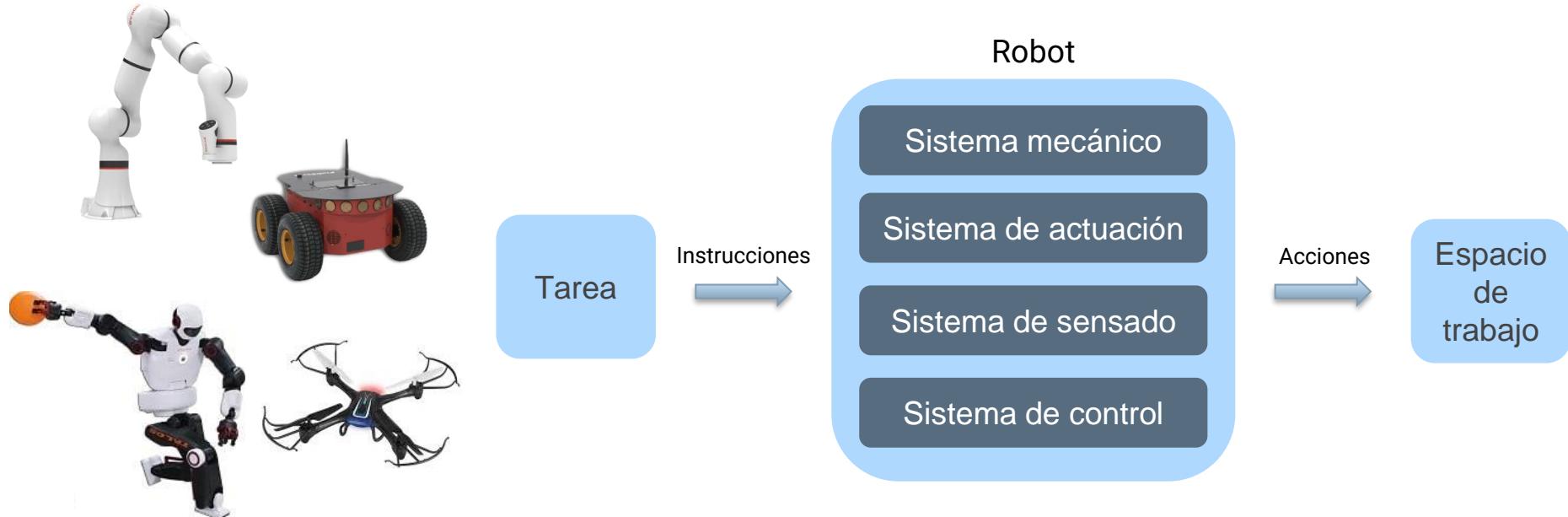
2.4

Sistema de sensado

2.5

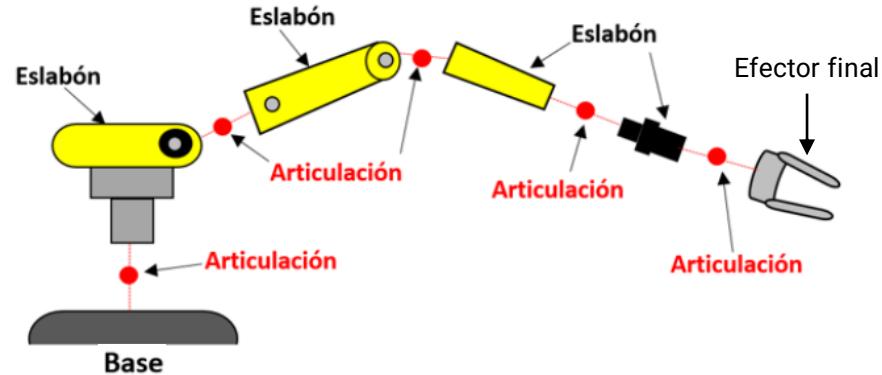
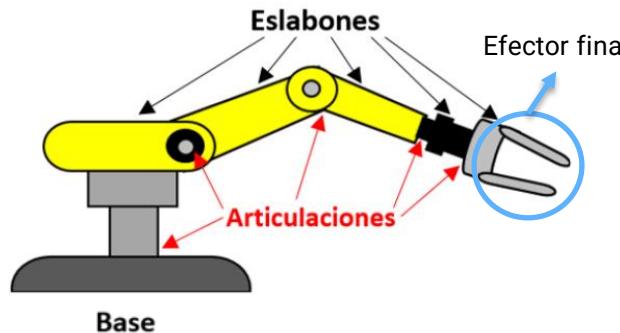
Sistema de control

Sistema de Componentes de un Robot



Sistema mecánico (estructura mecánica)

- Cuerpos rígidos (*Eslabones*) enlazados entre sí por *articulaciones* que definen los grados de libertad y los ejes de movimiento.
- Las partes principales de un robot comprenden: base, estructura de soporte, efector final, chasis y sistemas de movilidad como ruedas.



Sistema de actuación

Los robots utilizan *motores eléctricos*, *hidráulicos* o *neumáticos* como fuentes de *movimiento*. Su funcionamiento se gestiona mediante *algoritmos de control*, y la fuerza generada se transmite a través de *mecanismos de transmisión*.



Sistema de sensado

- Sensores propioceptivos:** indican cómo está el robot (posición, velocidad, torque, orientación).
- Sensores exteroceptivos:** muestran lo que pasa afuera (fuerza, proximidad, cámaras).

Sistema de control

Los sistemas de control constituyen el verdadero “*cerebro*” del robot y operan en diferentes niveles.

- **Bajo nivel:** regula directamente los motores y la actuación de los mismos.
- **Alto nivel:** gestiona el planeamiento, la ejecución de tareas y el aprendizaje (piensa, planifica y aprende).



Robot Controller



Electrical Cabinet



Componentes de un Robot

- **Manipulador:** estructura principal formada por eslabones y juntas.
- **Herramienta (End Effector):** elemento final para ejecutar tareas. Generalmente debe ser diseñada e integrada por el ingeniero según la aplicación.
- **Actuadores:** generan el movimiento (servomotores, motores paso a paso, hidráulicos, neumáticos).
- **Sensores:** obtienen información interna (propioceptivos) y del entorno (exteroceptivos).
- **Controlador:** regula los movimientos del actuador a partir de órdenes y datos de los sensores.
- **Procesador:** calcula y coordina los movimientos programados; en algunos casos lo debe aportar el usuario.
- **Software:** incluye sistema operativo, programas de control robótico y bibliotecas de rutinas específicas.



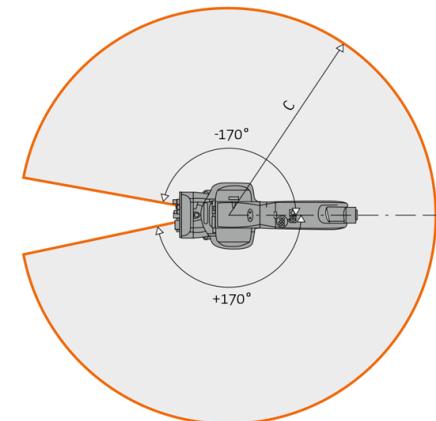
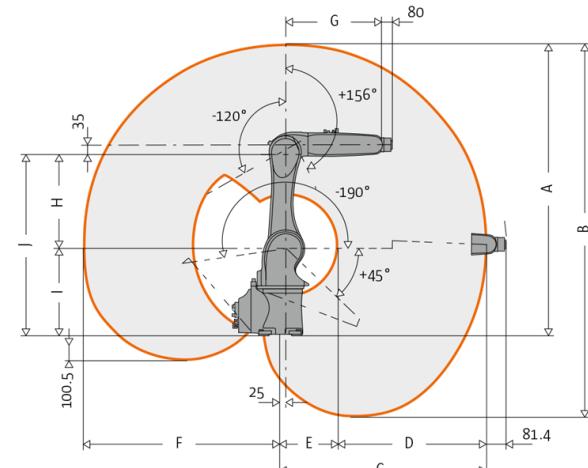
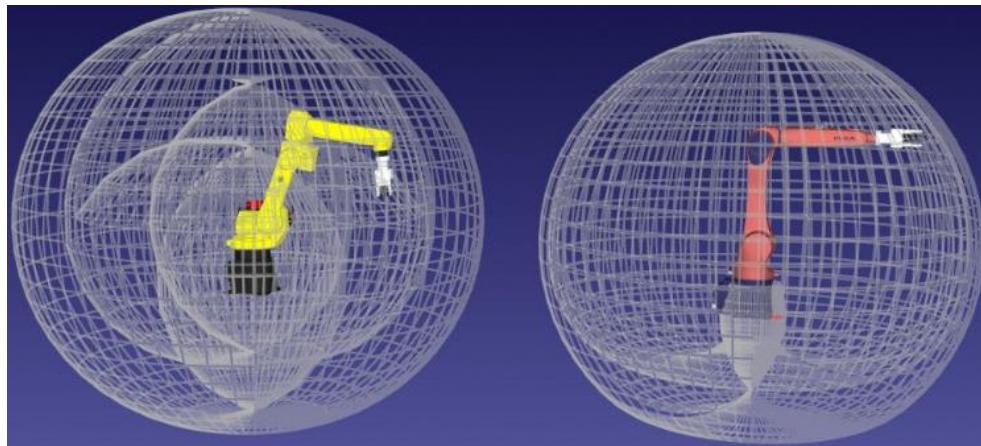
Características de un robot

- **Carga útil:** peso máximo que el robot puede manipular con precisión. Generalmente es mucho menor que su peso propio.
- **Alcance:** distancia máxima que puede cubrir dentro de su espacio de trabajo.
- **Precisión:** capacidad de llegar a un punto específico, influida por la resolución de los actuadores, la carga y la velocidad.
- **Repetibilidad:** capacidad de volver a la misma posición en múltiples intentos, considerando condiciones de ensayo (velocidad, carga, etc.).

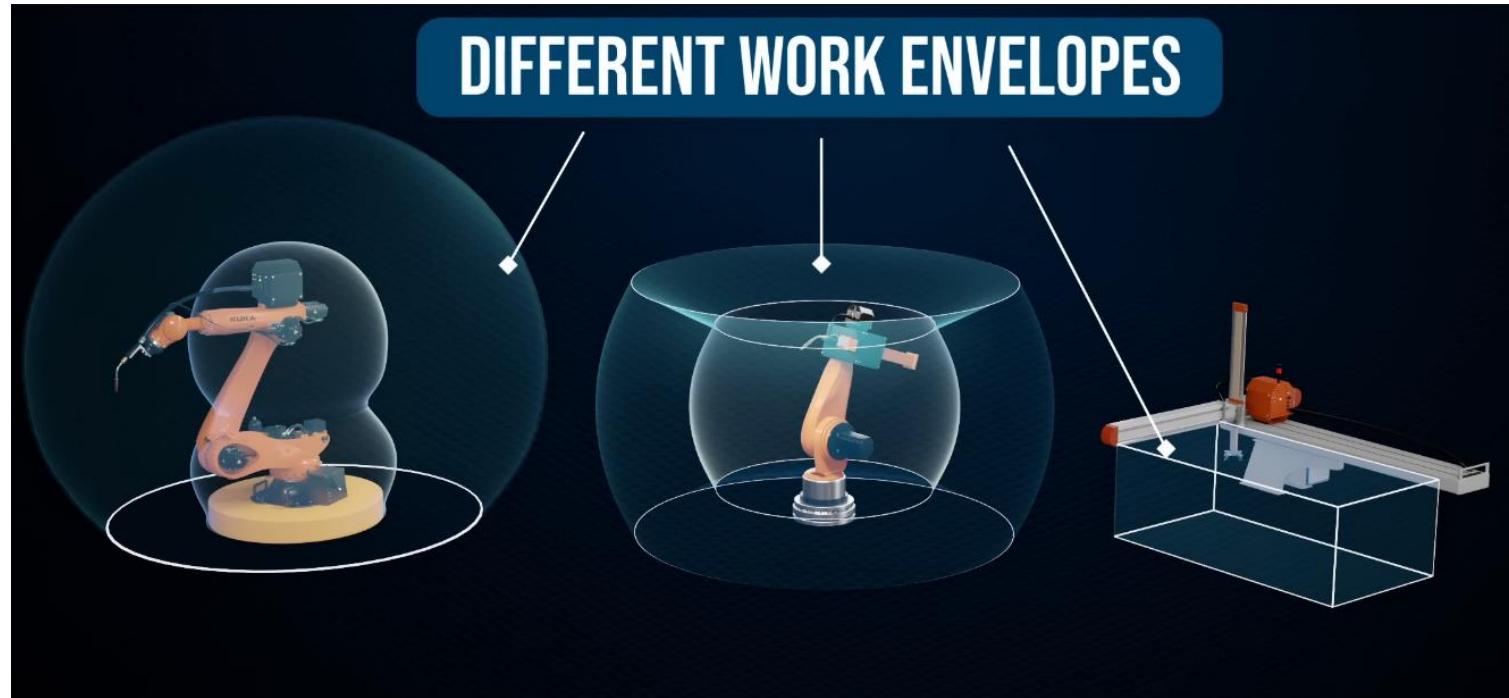


Características de un robot

- **Espacio de trabajo:**
 - **Espacio alcanzable:** conjunto de puntos que la herramienta o terminal puede llegar a tocar, sin importar orientación.
 - **Espacio útil:** conjunto de puntos alcanzables manteniendo la orientación necesaria para la tarea específica.



Características de un robot – Espacio de Trabajo - [Video](#)



Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

2.4

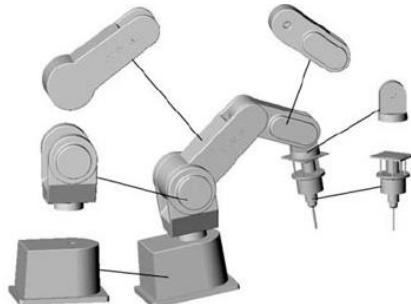
Sistema de sensado

2.5

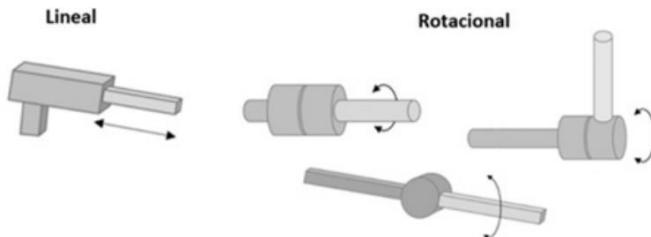
Sistema de control

Estructura mecánica

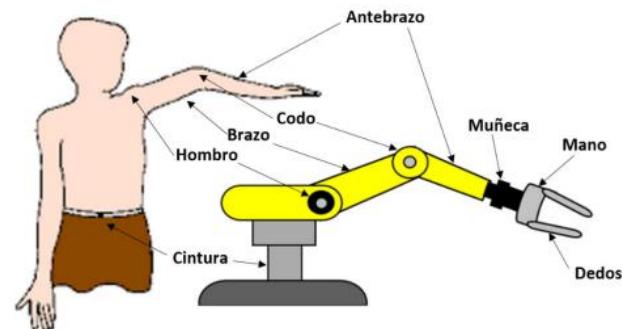
Los robots pueden clasificarse en **fijos (manipuladores)** y móviles.



Su **estructura básica** incluye un **brazo** para movimiento, una **muñeca** para precisión y una **herramienta** que realiza la tarea.



Un **manipulador** está formado por **eslabones rígidos** conectados por **articulaciones** (juntas).



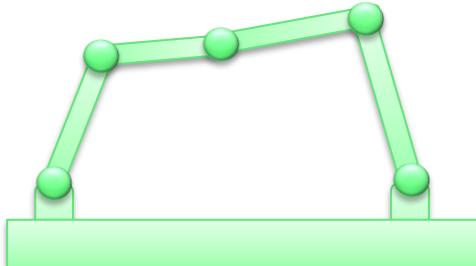
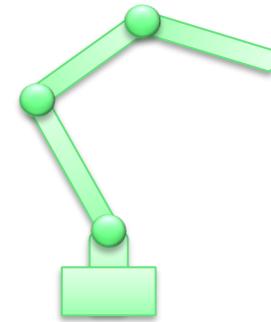
Las **articulaciones** pueden ser **prismáticas (lineales)** o de **revolución (rotacionales)**.

Cadena cinemática

Conjunto de *eslabones* y *articulaciones* que forman la estructura mecánica de un robot.

Tipos principales:

- *Abierta*: cada eslabón se conecta solo con el anterior y el siguiente.
 - El primero suele estar fijo y el último libre (para conectar el efecto final).
 - Común en la mayoría de los robots manipuladores.

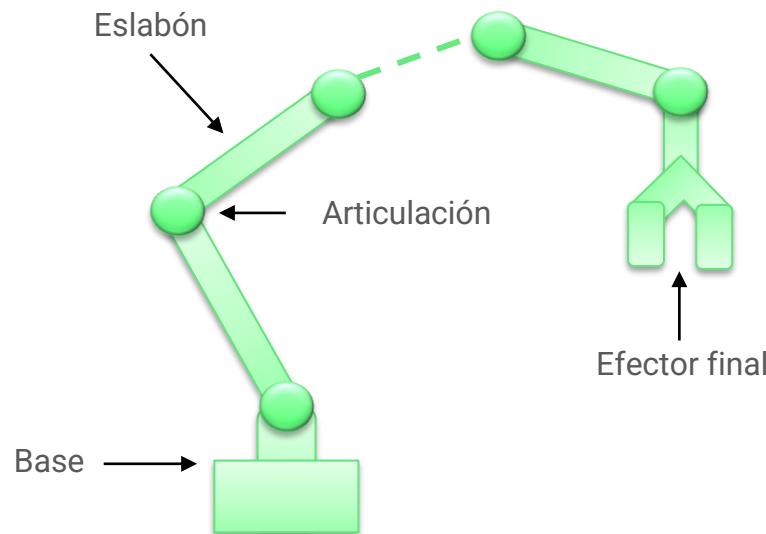


- *Cerrada*: se puede llegar de un eslabón a otro por al menos dos caminos.
 - Ejemplo: robots de estructura paralela.

Estructura mecánica

Un robot puede representarse como una *cadena cinemática* formada por *eslabones rígidos* conectados mediante *articulaciones*.

- **Eslabones:** elementos estructurales rígidos que transmiten movimiento. Unidos por articulaciones.
- **Articulaciones (grados de libertad):** permiten el desplazamiento relativo entre dos eslabones, definiendo la movilidad del sistema.



Articulaciones en Robótica

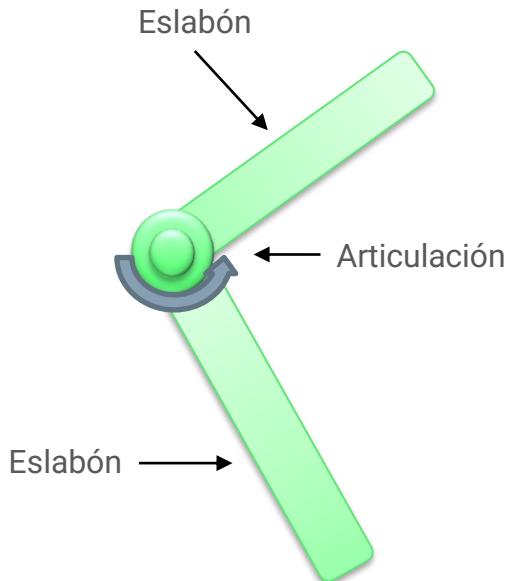
Conectan **dos eslabones rígidos** dentro de la cadena cinemática.

Funciones principales:

- Restringen ciertos movimientos entre eslabones.
- Proveen libertad de movimiento relativa.

Grado de Libertad (GDL):

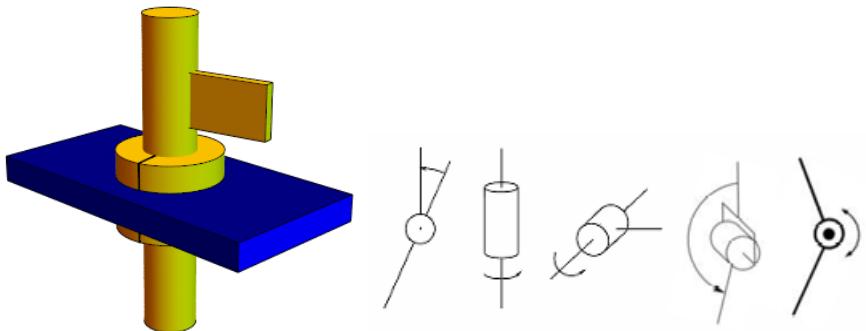
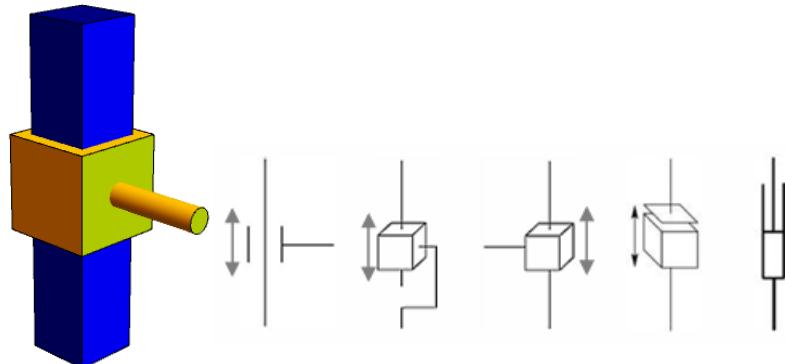
- Número de movimientos independientes que una articulación permite entre dos eslabones..



Articulaciones más Usadas en Robótica

a) Prismática (P)

- Permite la *traslación lineal* de un eslabón a lo largo de un eje fijo.
- Aporta *1 Grado de Libertad* (GDL).
- Impone *5 restricciones* al movimiento espacial.



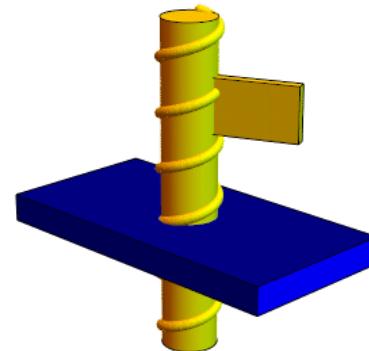
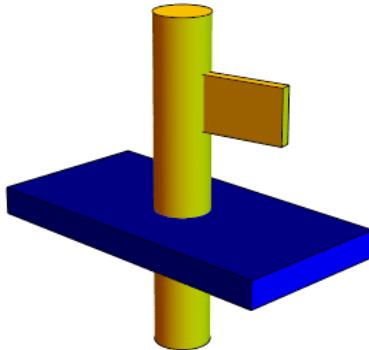
b) Revolución (R)

- Permite la *rotación* de un eslabón alrededor de un eje fijo.
- Aporta *1 Grado de Libertad* (GDL).
- Impone *5 restricciones* al movimiento espacial.

Otras Articulaciones en Robótica

c) Helicoidal (H)

- También llamada “*screw*” (tornillo).
- Movimiento *simultáneo* (dependiente) de *rotación + traslación* sobre un eje fijo.
- Aporta *2 Grado de Libertad* (GDL).
- Impone *4 restricciones* al movimiento espacial.



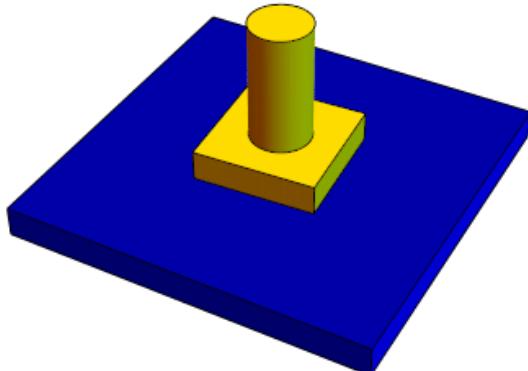
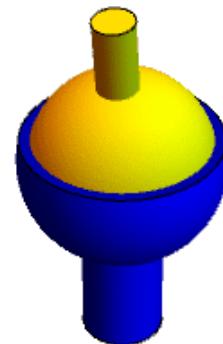
d) Cilíndrica (C)

- Movimiento *independiente* de *rotación + traslación* sobre un eje fijo.
- Aporta *2 Grados de Libertad* (GDL).
- Impone *4 restricciones* al movimiento espacial.

Otras Articulaciones en Robótica

e) Articulación Esférica (S)

- Similar a un sistema de *bola y rótula* (ball & socket).
- Aporta *3 Grados de Libertad* (GDL).
- Impone *3 restricciones* al movimiento espacial.



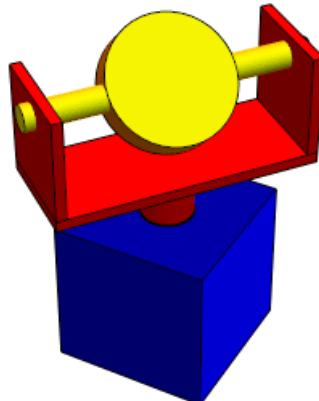
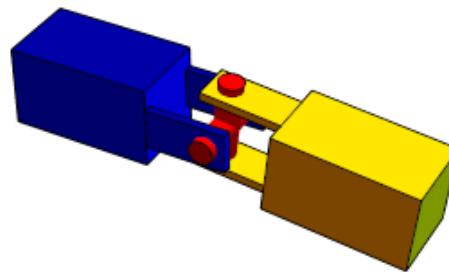
f) Articulación Planar (E)

- solo puede deslizar sobre la superficie del sólido.
- El sólido puede girar en torno al eje perpendicular a la superficie de contacto (en otros casos no).
- Aporta *3 Grados de Libertad* (GDL).
- Impone *3 restricciones* al movimiento espacial.

Combinaciones de Articulaciones en Robótica

g) Articulación Universal (U)

- Similar a un sistema de *bola y rótula* (ball & socket).
- Aporta *2 Grados de Libertad* (GDL).
- Impone *4 restricciones* al movimiento espacial.



h) suspensión cardán

- También llamado *gimbal* en inglés, término que también se usa en castellano.
- Aporta *2 Grados de Libertad* (GDL).
- Impone *4 restricciones* al movimiento espacial.

Grados de Libertad (GDL o ODF)

Representan el *número de movimientos independientes* que puede realizar un cuerpo rígido o un robot.

Un GDL puede ser:

- *Traslación lineal* → movimiento a lo largo de un eje.
- *Rotación angular* → giro alrededor de un eje.

En el *espacio tridimensional*, un cuerpo libre tiene **6 GDL** (3 traslaciones + 3 rotaciones).

La fórmula de Grübler se usa para calcular los GDL de una cadena cinemática.

$$NGDL = \lambda * (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i$$

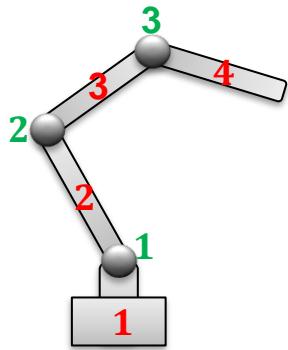
Donde:

- λ : número de GDL del espacio → (3 en el plano, 6 en el espacio).
- n : número de eslabones (incluyendo el fijo).
- j : número de articulaciones.
- f_i : GDL de la articulación i .

Grados de Libertad - ejemplos

Hallar los grados de libertad de las siguientes cadenas cinemáticas

$$NGDL = \lambda * (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i$$



$$\lambda = 3$$

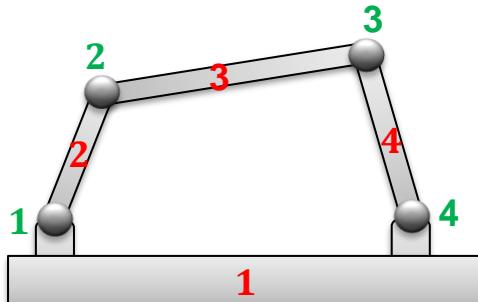
$$n = 4$$

$$j = 3$$

$$\sum_{i=1}^j f_i = 1 + 1 + 1 = 3$$

$$NGDL = 3 * (4 - 3 - 1) + 3$$

$$NGDL = 3$$



$$\lambda = 3$$

$$n = 4$$

$$j = 4$$

$$\sum_{i=1}^j f_i = 1 + 1 + 1 + 1 = 4$$

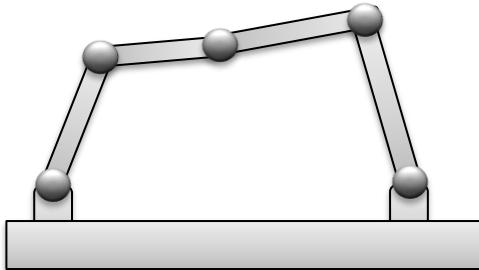
$$NGDL = 3 * (4 - 4 - 1) + 4$$

$$NGDL = 1$$

Grados de Libertad - ejemplos

Hallar los grados de libertad de las siguientes cadenas cinemáticas

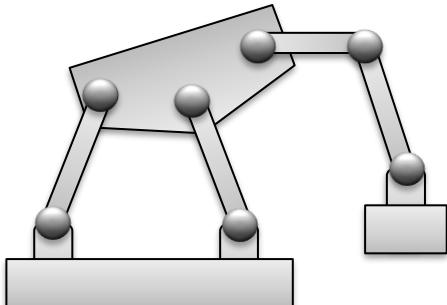
$$NGDL = \lambda * (n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i$$



$$\lambda = 3 \quad n = 5 \quad j = 5 \quad \sum_{i=1}^j f_i = 5$$

$$NGDL = 3 * (5 - 5 - 1) + 5$$

$$NGDL = 2$$



$$\lambda = 3 \quad n = 6 \quad j = 7 \quad \sum_{i=1}^j f_i = 7$$

$$NGDL = 3 * (6 - 7 - 1) + 7$$

$$NGDL = 1$$

Clasificaciones de los Robots Manipuladores según sus Articulaciones

De acuerdo al tipo y la secuencia de juntas de un brazo, podemos clasificarlos en 5 tipos principales:

- **Cartesiano:** movimientos lineales en ejes X, Y y Z.
- **Cilíndrico:** combina movimiento lineal y rotacional, generando un volumen cilíndrico de trabajo.
- **Esférico:** permite movimientos con rotación y extensión, generando un espacio esférico.
- **SCARA:** especializado en movimientos horizontales rápidos y precisos, común en ensamblaje electrónico.
- **Antropomorfo:** similar al brazo humano, con alta flexibilidad y amplitud de movimientos.

Robot Cartesiano

Características:

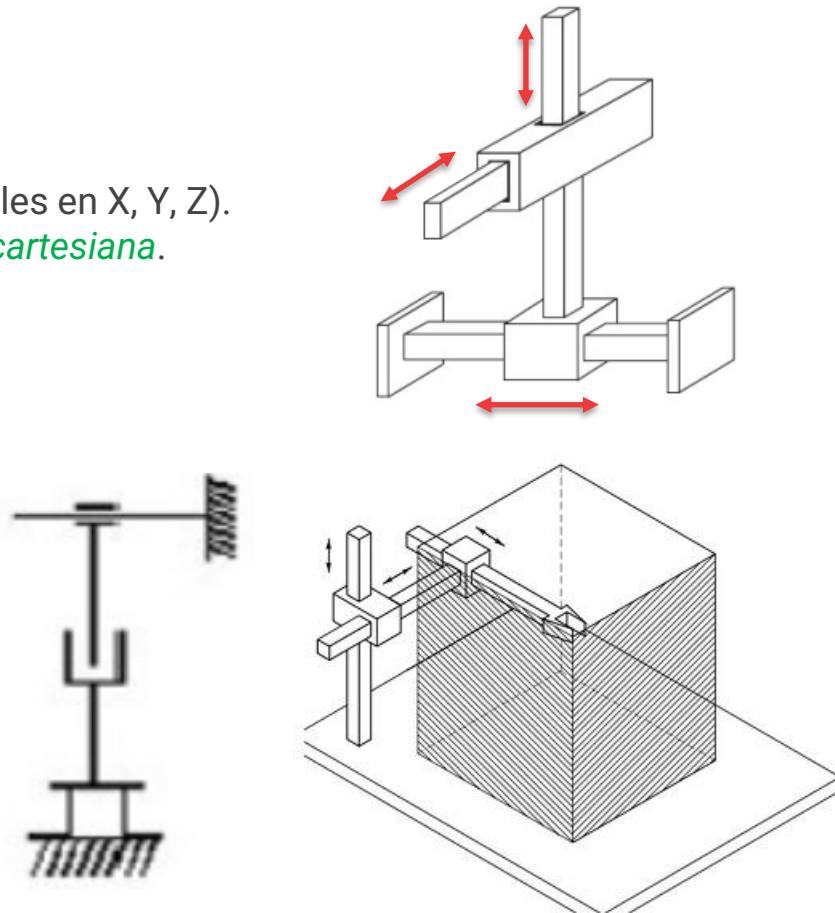
- Tres juntas *prismáticas* ortogonales (movimientos lineales en X, Y, Z).
- Cada grado de libertad corresponde a una *coordenada cartesiana*.

Propiedades:

- Alta rigidez mecánica.
- Precisión constante en todo el espacio de trabajo.
- Baja destreza (dexteridad).
- Aproximación lateral o superior (configuración tipo pórtico).
- Permite manipular piezas de gran tamaño y peso.
- Actuadores comunes: eléctricos o neumáticos.

Aplicaciones:

- Manipulación de materiales.
- Procesos de ensamblaje.



Robot Cilíndrico

Características:

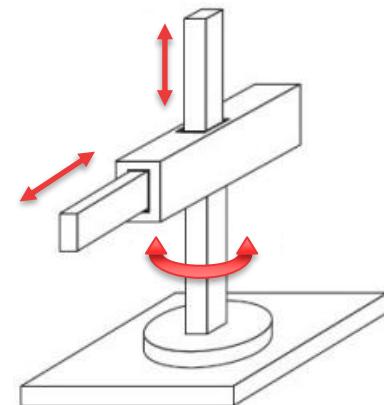
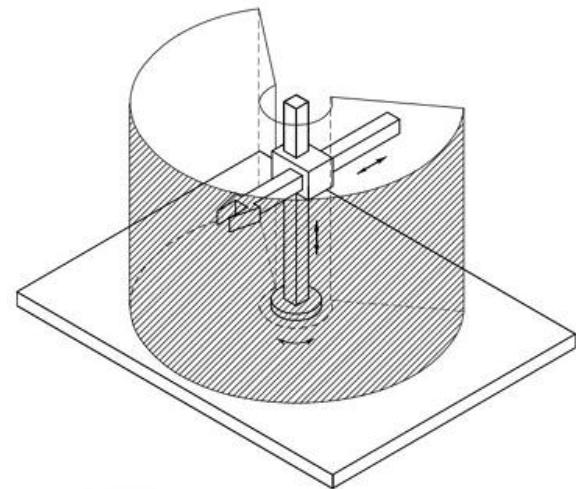
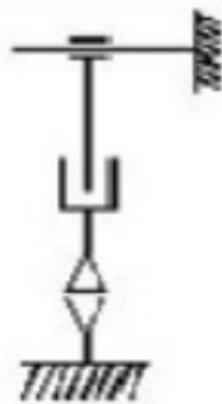
- A diferencia de los cartesianos, reemplazan la *primera articulación* por una de *rotación*.
- Operan en *coordenadas cilíndricas*, lo que facilita la correspondencia con las variables espaciales.

Propiedades:

- Alta rigidez mecánica.
- La precisión en la muñeca disminuye conforme aumenta el alcance horizontal.
- Funcionan con actuadores eléctricos o hidráulicos.

Aplicaciones:

- Ensamblaje, soldadura por puntos.
- Análisis clínicos, entre otros.



Robot Esférico

Características:

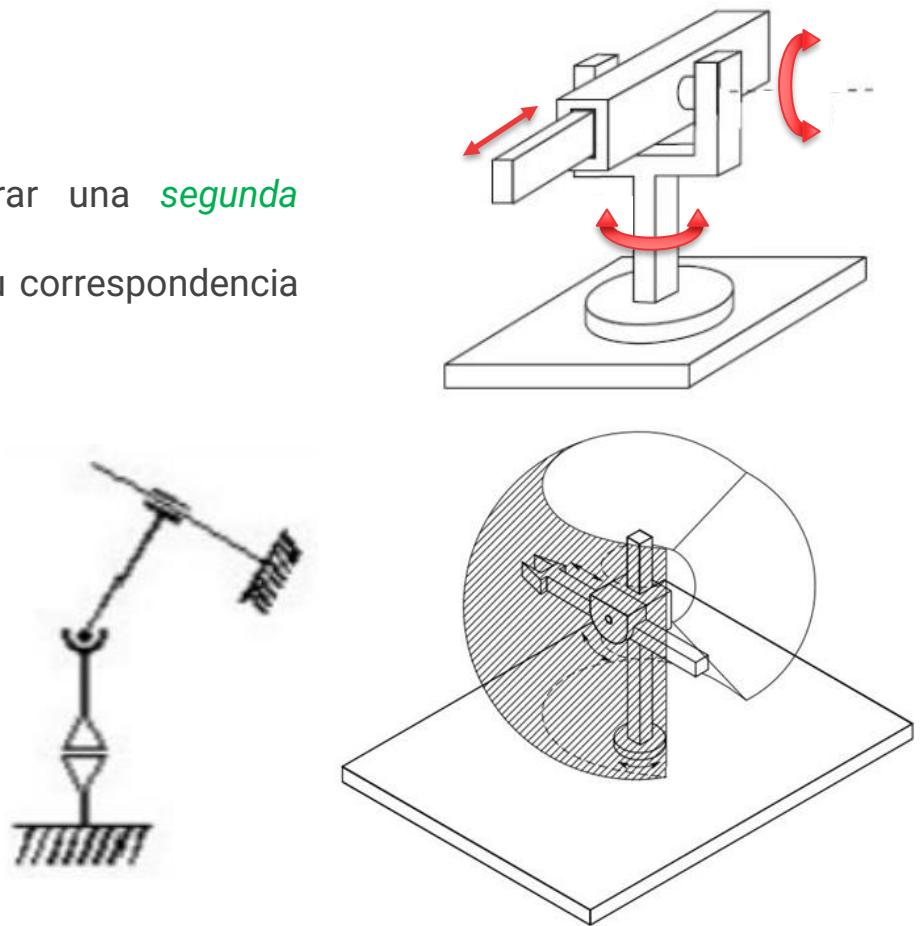
- Se diferencian de los cilíndricos por incorporar una *segunda articulación rotacional*.
- Operan en *coordenadas esféricas*, lo que facilita su correspondencia con las variables espaciales.

Propiedades:

- Menor rigidez estructural en comparación con otros tipos.
- La precisión de la muñeca disminuye a medida que crece la distancia radial.
- Su espacio de trabajo incluye la base, lo que permite recoger objetos desde el suelo.

Aplicaciones:

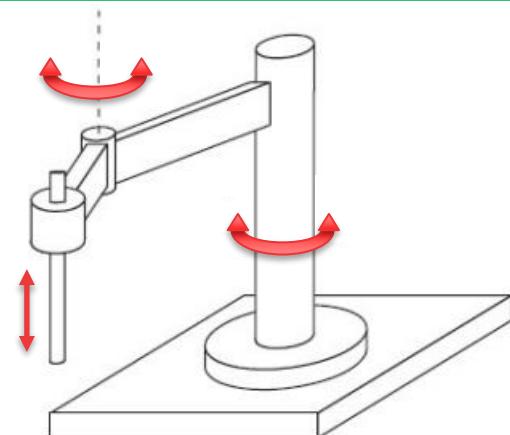
- Uso común en procesos de maquinado.
- Funcionan con actuadores eléctricos.



Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

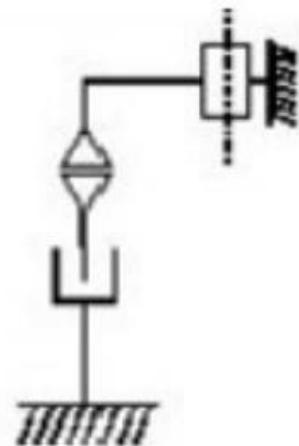
Características:

- Formados por *dos articulaciones rotacionales* (cilíndricas) y *una lineal* (prismática) con *ejes paralelos*.



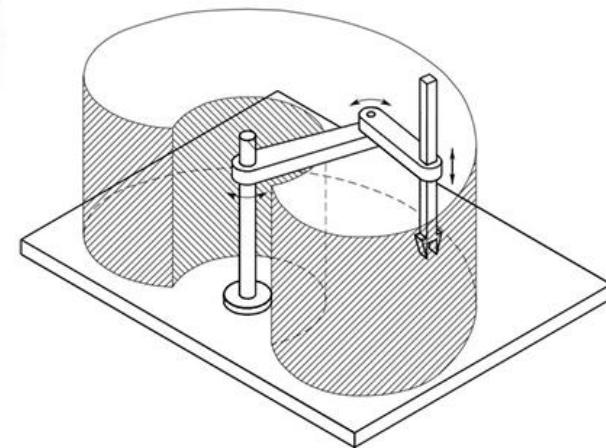
Propiedades:

- Ofrecen alta rigidez en cargas verticales.
- gran precisión/repetibilidad en movimientos horizontales.



Aplicaciones:

- Montaje y ensamblaje de piezas.



Robots Antropomórficos

Características:

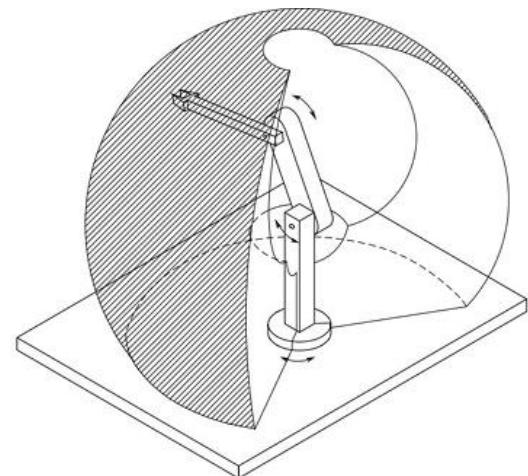
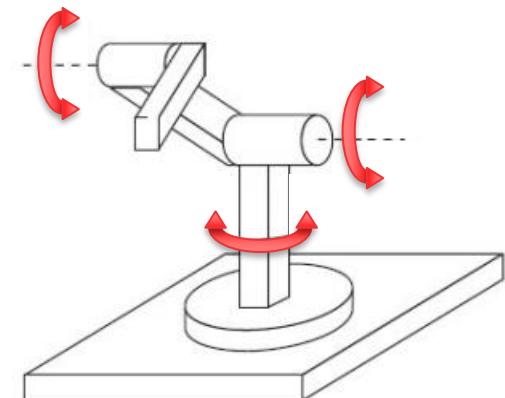
- Integran *tres articulaciones rotacionales*.
- El *primer eje es perpendicular* a los otros dos, que son paralelos.
- Su estructura imita al brazo humano: 1^a junta → cadera, 2^a junta → hombro 3^a junta → codo.

Propiedades:

- Es el robot más versátil y ágil, ampliamente usado en la industria.
- La precisión depende de la posición en el espacio.
- Utilizan actuadores eléctricos.

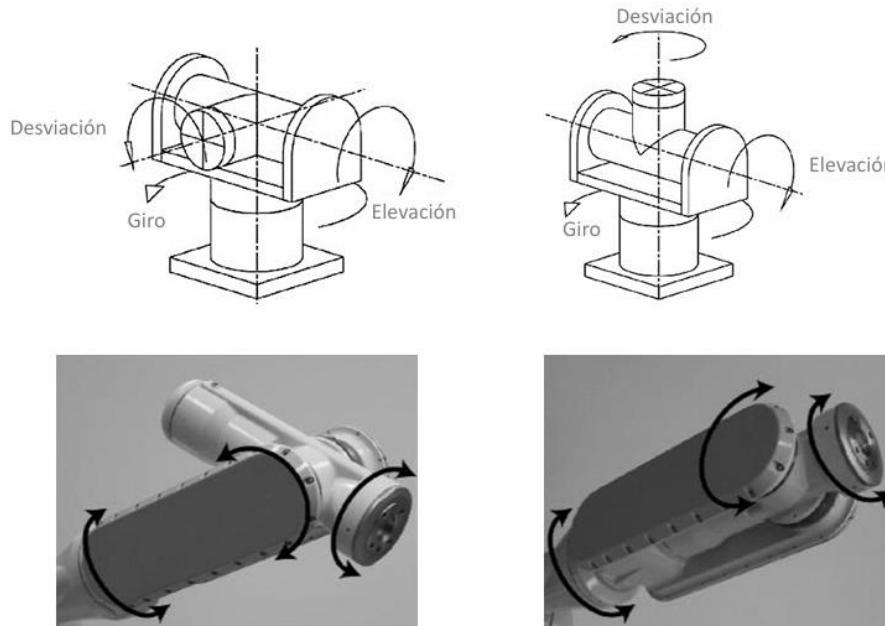
Aplicaciones:

- Manipulación de materiales.
- Inspección y control de calidad.
- Industria automotriz



Muñecas de Manipuladores (“Wrist”)

- En los manipuladores clásicos, la muñeca integra *tres ejes que se interceptan en un punto*.
- Su comportamiento es equivalente al de una *articulación esférica*, lo que otorga gran *movilidad* y *orientación* al efecto final.



Elementos Terminales

- Situados al final de la *cadena cinemática*, junto a la muñeca.
- También conocidos como *efectores finales* u *órganos terminales*.

Ventosas de vacío:

- Funcionamiento: sujetan objetos mediante succión, especialmente en materiales deformables.
- Materiales de fabricación: silicón, poliuretano, hule nitrilo, viton, cloropreno, entre otros.



Elementos Terminales

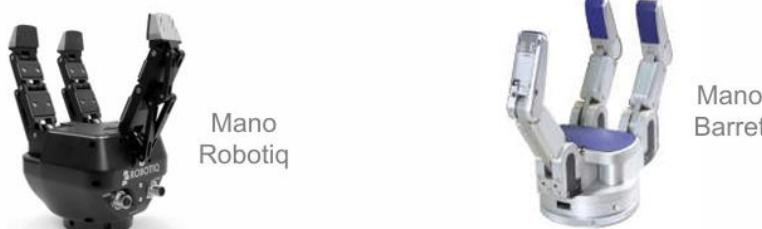
Garras Mecánicas de 2 Dedos:

- También denominadas pinzas (grippers).
- Se utilizan para sujetar y manipular piezas sólidas.



Garras Mecánicas de 3 Dedos:

- También conocidas como “manos robóticas”.
- Permiten una sujeción más estable y versátil que las de 2 dedos.



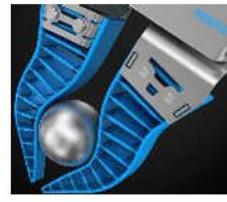
Elementos Terminales

Garras Blandas (Soft Grippers):

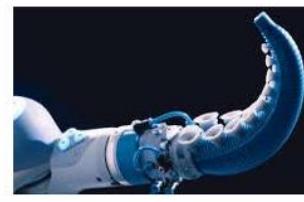
- Diseñadas con materiales flexibles que se adaptan a la forma del objeto.
- Ideales para manipular piezas delicadas o deformables (alimentos, envases, componentes frágiles).



Softrobotics



Festo MultiChoiceGripper



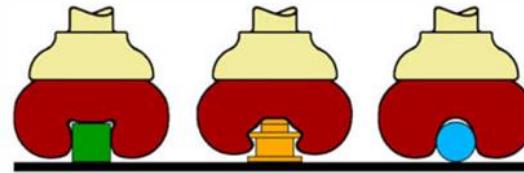
Festo Octopus Gripper



Grabit electroadhesion

Garra “Universal” (basada en presión):

- Utiliza un material granular flexible dentro de una membrana.
- Al aplicar vacío o presión, el material se adapta al objeto y se solidifica, generando el agarre.



Elementos Terminales

Elementos para Cirugías:

- Diseñados como instrumentos quirúrgicos robóticos de alta precisión.
- Permiten realizar procedimientos mínimamente invasivos.
- Se utilizan en:
- Pinzas microquirúrgicas.
- Tijeras robóticas.
- Porta-agujas para sutura.
- Dispositivos de cauterización o corte.



Elementos Terminales

Herramientas Específicas:

- Utilizadas principalmente en aplicaciones industriales.
- Incorporan herramientas diseñadas para procesos productivos directos.
- Se utilizan en:
- Pinzas y pistolas de soldadura.
- Herramientas de corte (láser o mecánicas).
- Atornilladores automáticos.
- Lijadoras y fresadoras.



Chasis de Robots Móviles

- Funcionan como **estructura base** que da **soporte a todos los componentes** del robot.
- Su diseño influye en la **estabilidad, movilidad y resistencia** del sistema.

Frames de robots aéreos (drones):

- ligeros y resistentes para soportar motores, baterías y sensores.



Chasis de Robots Móviles

Chasis de Robots Terrestres:

- Constituyen la base estructural que soporta sistemas de movimiento, control y sensado.
- Su diseño depende del entorno y la tarea a realizar.
- Tipos comunes:
- Ruedas → rápidos y eficientes en superficies planas.
- Orugas → mayor tracción y estabilidad en terrenos irregulares.
- Patas → movilidad en entornos complejos o de difícil acceso.



Chasis de Robots Móviles

Ruedas convencionales fijas → Movimiento simple hacia adelante/atrás.



Ruedas
convencionales
fijas

Movimiento simple
hacia adelante/atrás

Ruedas omnidireccionales (swedish) → Desplazamiento en múltiples direcciones sin necesidad de girar.



Ruedas esféricas → Actúan como ruedas auxiliares para soporte y maniobrabilidad.

Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

2.4

Sistema de sensado

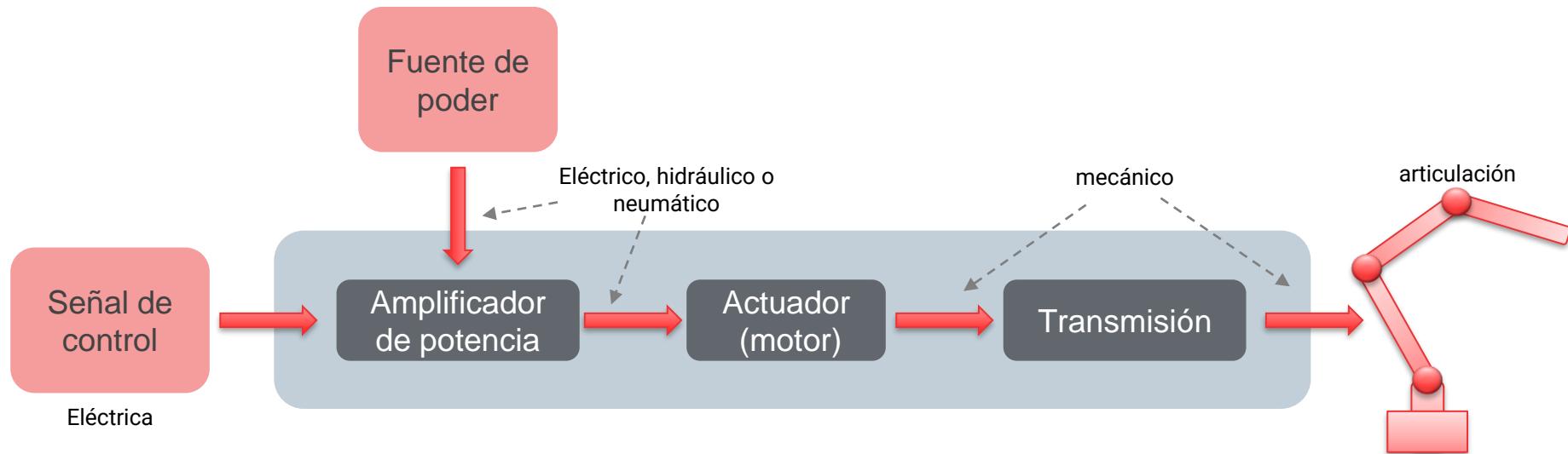
2.5

Sistema de control

Introducción

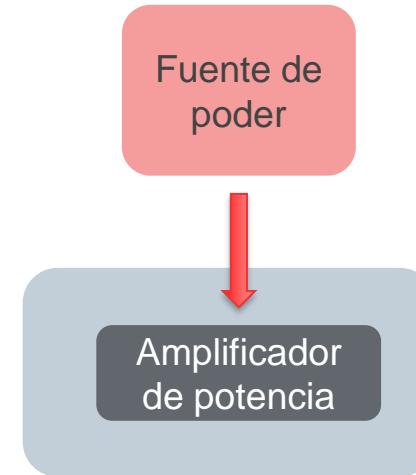
- Son los responsables de generar y transmitir movimiento a las diferentes partes del robot.
- Transforman energía en movimiento mecánico (rotacional o lineal).

Esquema general – Componentes principales:



Fuente de Poder

Suministra la energía necesaria al actuador (motor) mediante un amplificador.



Fuente de poder para actuador neumático o hidráulico:

- Hidráulicos → fuente: *compresor hidráulico*, que provee *aceite a presión*.
- Neumáticos → fuente: *compresor neumático*, que suministra *aire comprimido*.
- Ambos sistemas integran *bombas eléctricas internas* que impulsan el fluido hacia los actuadores.



Fuente de poder para actuador eléctrico:

Robots Manipuladores:

- Motores AC → alimentación desde corriente monofásica o trifásica, directa o vía transformador.
- Motores DC → requieren transformador, rectificador (puentes) y filtros para convertir la energía.

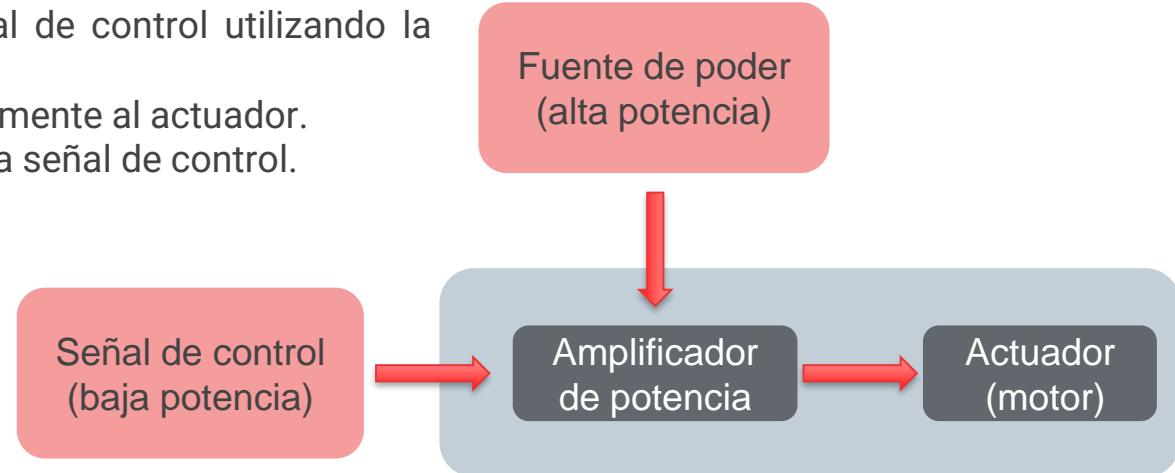
Robots Móviles:

- Baterías NiMH (Níquel-Metal Hidruro):
 - Tecnología más antigua.
 - Alta tasa de descarga.
- Baterías LiPo (Polímero de iones de litio):
 - Más ligeras que NiMH.
 - Alta densidad energética → pequeñas y potentes.
 - Voltaje estable durante la descarga.
 - Cada celda aporta 3.7 V.
- Otras baterías: NiCd (níquel-cadmio), alcalinas.



Amplificador de Potencia

- *Incrementa la potencia* de la señal de control utilizando la *fuente de poder*.
- *Adapta y entrega* la energía directamente al actuador.
- *Modula* la potencia en función de la señal de control.



Tipos según el actuador:

- Hidráulicos / Neumáticos → regulan el flujo del fluido proporcional a la señal de control.
- Motores eléctricos → ajustan voltaje o corriente proporcionalmente a la señal de control.
 - También adaptan el voltaje de la fuente al requerido por el motor.

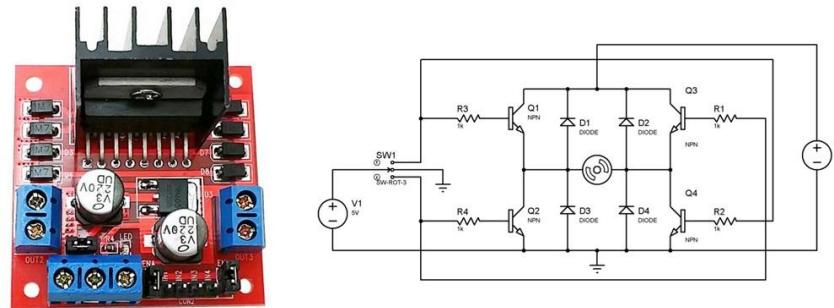
Ejemplos (Motores Eléctricos)

Conversores DC-DC:

- Usados en motores DC de imán permanente.

Puente H:

- Aplicado en *motores DC*.
 - Permite *controlar la dirección de giro*.
 - Señal de control: *PWM (Pulse Width Modulation)*.



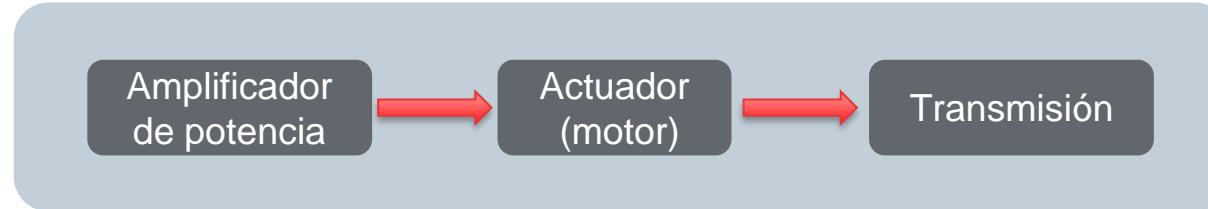
Inversores o Conversores DC-AC:

- Utilizados en motores *DC brushless*.
 - Generalmente implementados como *ESC (Electronic Speed Control)*.



Actuadores

- Responsables de *generar el movimiento* de las partes del robot (a través de la transmisión).



Tipos según principio de funcionamiento:

- Eléctricos (motores)*: usan energía eléctrica.
- Neumáticos*: operan con *aire comprimido*.
- Hidráulicos*: funcionan con *fluido a presión (aceite)*.
- Otros: térmicos, magnéticos (poco comunes en robótica).

Nota importante:

- El término “servo” implica un sistema controlado (retroalimentación + controlador).

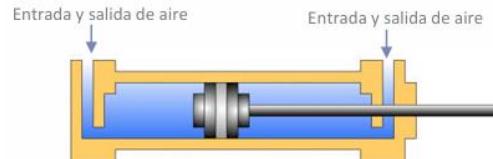
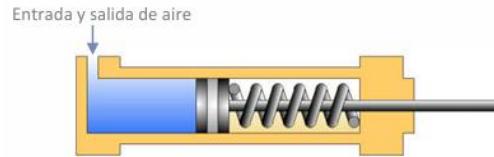
Actuadores Neumáticos

Conversión: presión de *aire comprimido* → *energía mecánica*

Tipos principales:

1. Lineales:

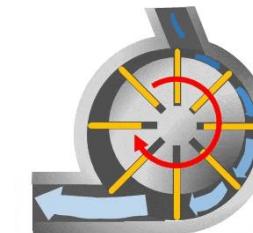
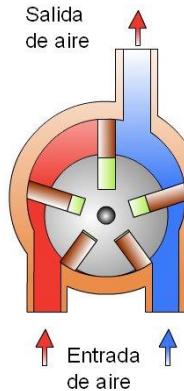
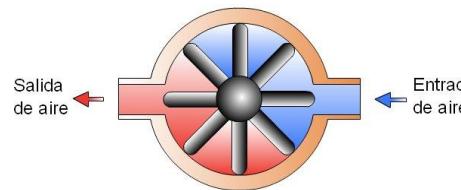
- Cilindros de *simple efecto*
→ una sola entrada de aire.
- Cilindros de *doble efecto*
→ dos entradas de aire.



Actuadores Neumáticos

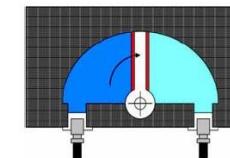
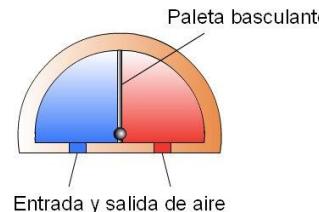
2. Neumáticos de Giro:

- Motores de paletas.

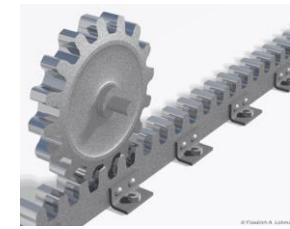
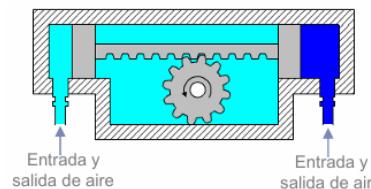


pressión baja
pressión alta

- Cilindros giratorios de paletas.



- Motores piñón-cremallera.



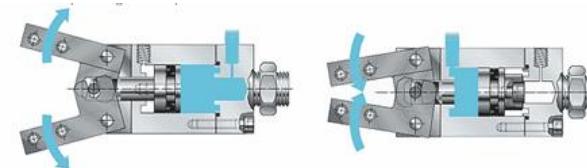
Actuadores Neumáticos

Características:

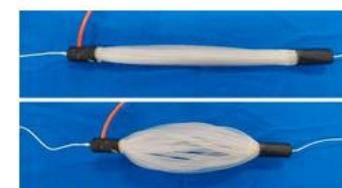
- Difícil lograr posicionamiento preciso (por compresibilidad del aire).
- No aptos para seguimiento de trayectorias complejas.

Aplicaciones en robótica:

- Movimiento de efectores finales (abrir/cerrar).



- Músculos artificiales (McKibben / PAM).



Actuadores Neumáticos - Ejemplos



Actuadores Neumáticos - Ejemplos



Actuadores Neumáticos - Ejemplos



Actuadores Hidráulicos

Conversión: presión de *fluido (aceite mineral)* → *energía mecánica*.

Ventajas:

- Alta *precisión* (fluido poco compresible).
- Generan *grandes fuerzas y torques*.
- Buena *estabilidad en cargas estáticas*.
- *Seguros* en entornos explosivos (sin chispas).
- Cuentan con *auto-lubricación*.

Desventajas:

- Requieren *estación de potencia hidráulica*.
- *Costosos* y difícil *miniaturización*.
- Riesgo de *contaminación ambiental* (fugas de aceite).



Actuadores Hidráulicos - Ejemplos



Actuadores Hidráulicos - Ejemplos



Actuadores Hidráulicos - Ejemplos



Actuadores Hidráulicos - Ejemplos

Actuadores Eléctricos

Conversión: energía **eléctrica** → **energía mecánica**.

Principales tipos en robótica:

- Motores AC → comunes en robots industriales.
- Motores DC de imán permanente.
- Motores DC brushless (sin escobillas) → usados en robots aéreos (drones) y submarinos (propulsores).
- Motores paso a paso (stepper) → frecuentes en robots pequeños.
- Servomotores → motor + controlador.

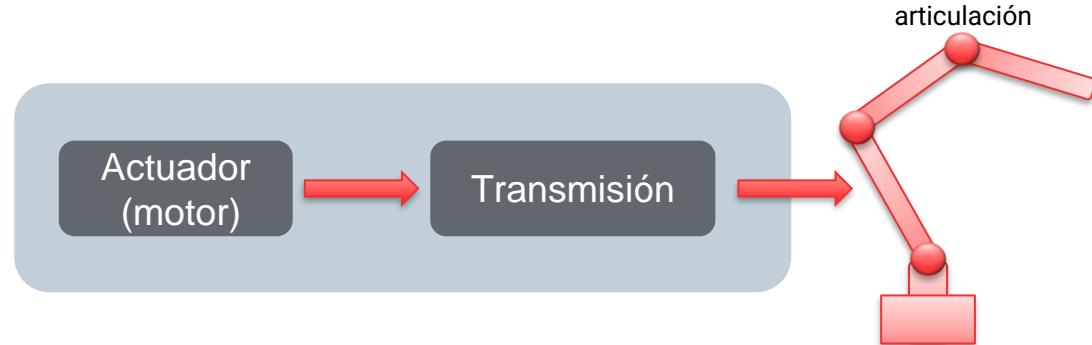
Ventajas:

- Fácil acceso a **fuentes de energía** (corriente o baterías).
- **Bajo costo** y **gran disponibilidad** en el mercado.
- **Alta eficiencia** en conversión de potencia.
- **No contaminan** el ambiente de trabajo.



Actuadores

- Encargada de *transferir la potencia del motor* hacia el *eje de la articulación*.



¿Por qué se utiliza?

Problema:

- Los *motores* generan *altas velocidades y bajo torque*.
- Las *articulaciones* necesitan *bajas velocidades y alto torque* (especialmente en manipuladores).

Solución:

- La *transmisión* reduce la velocidad y *aumenta el torque*, optimizando la transferencia de potencia desde el motor hasta los eslabones.

Tipos de Transmisión en Robótica

Engranajes Rectos (ruedas dentadas):

- Dientes *rectos*.
- Efectos:
 - Trasladan el *punto de aplicación* del eje.
 - Modifican la *dirección de giro*.
- Problemas: deformaciones, backlash (holgura).



Husillo y Engranajes Helicoidales:

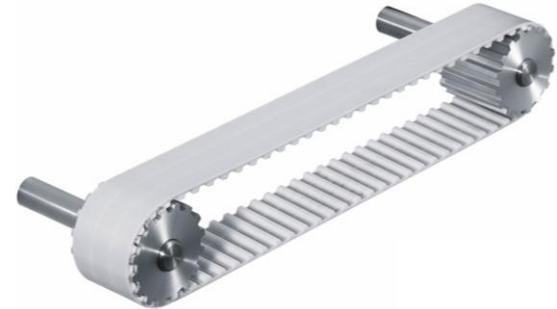
- Dientes en forma *helicoidal*.
- Efectos:
 - Cambio de *dirección del eje*.
 - Transforman *movimiento rotacional* → *traslacional*.
- Problemas: fricción, elasticidad, backlash.



Tipos de Transmisión en Robótica

Fajas dentadas y cadenas:

- Permiten *desplazar el motor* respecto al eje de la articulación.
- Problemas:
 - Elasticidad (en fajas).
 - Vibraciones en *grandes masas a altas velocidades* (en cadenas).



Accionamiento Directo (Direct Drive):

- El *motor se ubica dentro de los eslabones*.
- El *eje del motor coincide* con el eje de la articulación.

Harmonic Drives:

- Ventajas:
 - Alta eficiencia en potencia.
 - Cero backlash (sin holgura).
 - Diseño compacto (in-line).
 - Alta relación de reducción (150–200:1).



Tipos de Transmisión en Robótica - Ejemplos



Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

2.4

Sistema de sensado

2.5

Sistema de control

¿Qué es Sensar?

Proceso de obtención de información a partir de fenómenos físicos.

Sensor:

Dispositivo eléctrico, mecánico o químico que convierte un atributo del entorno en una *medida cuantitativa*.

Sensor permite:

- *Percepción interna* → del propio robot.
- *Percepción externa* → del entorno.

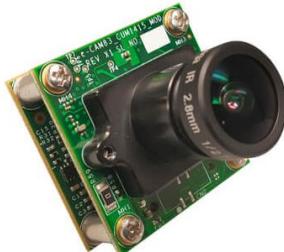
sistemas de sensado = sistemas de percepción

Principio fundamental: *transducción* (conversión de una magnitud física en señal medible).

Clasificación de Sensores en Robótica

Según lo que miden:

1. **Propioceptivos** → información del *estado interno* del robot.
 - Ejemplos: posición, velocidad, torque en articulaciones, aceleración de eslabones, orientación, temperatura.
2. **Exteroceptivos** → información del *entorno*, mejoran la autonomía.
 - Ejemplos: fuerza/torque externo, distancia a objetos, intensidad de luz.



Según cómo lo miden:

1. **Pasivos** → aprovechan la *energía del ambiente*.
 - Ejemplo: cámara.
2. **Activos** → *emiten energía* y miden la respuesta.
 - Ejemplo: sensor de ultrasonido.

Principales Sensores en Robótica

Posición:

- Eje lineal: potenciómetro lineal, LVDT, inductosyn.
- Eje angular: encoder, potenciómetro, resolver, sincro.
- Sistema: GPS, USBL, beacons RF, motion capture.

Velocidad:

- Eje: tacómetro.
- Angular (sistema): giroscopio.
- Lineal (sistema): sensor Doppler.

Aceleración Lineal:

- Acelerómetro.

Orientación e Inclinación:

- Inclinómetro, magnetómetro, brújula, IMU.

Fuerza:

- Galga extensiométrica.

Distancia / Rango:

- Triangulación: óptica, luz estructurada.
- Tiempo de vuelo (ToF): ultrasonido, LiDAR, cámaras ToF.
- Doppler: radar.
- Binarios: infrarrojo.

Imágenes:

- Cámaras RGB, RGB-D, catadióptricas.

Otros:

- Toque (bumpers), temperatura, luz, etc.

Propiedades de Sistemas de Medición

Exactitud:

- Grado de concordancia entre el valor medido y el valor real (referencia).

Precisión (Repetibilidad):

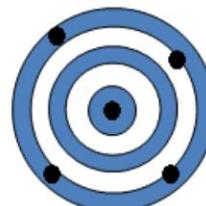
- Capacidad de obtener valores similares en mediciones repetidas de la misma magnitud.

Estabilidad:

- Habilidad de mantener las mismas mediciones en el tiempo, bajo condiciones constantes.



Baja precisión
Baja exactitud



Baja precisión
Alta exactitud



Alta precisión
Alta exactitud



Alta precisión
Baja exactitud

Exactitud y Precisión en Robótica

Exactitud:

- Medida de qué tan *cerca* llega el robot (móvil o manipulador) al *punto deseado*.
- Factores que afectan:
 - Imprecisiones del modelo (parámetros físicos, flexibilidad no modelada).
 - Variaciones en la carga.
 - Errores numéricos en el control (redondeos).

Precisión (Repetibilidad):

- Capacidad de retornar *consistentemente* a un mismo punto en varios intentos.
- Factores que afectan:
 - Ruido en sensores y actuadores.
 - Resolución de sensores y actuadores.
- Nota: los fabricantes de robots industriales suelen especificar este parámetro.

Tipos de Error en Sistemas de Medición

Error lineal:

- Desviación máxima respecto a la *Línea de mejor ajuste* de los datos.

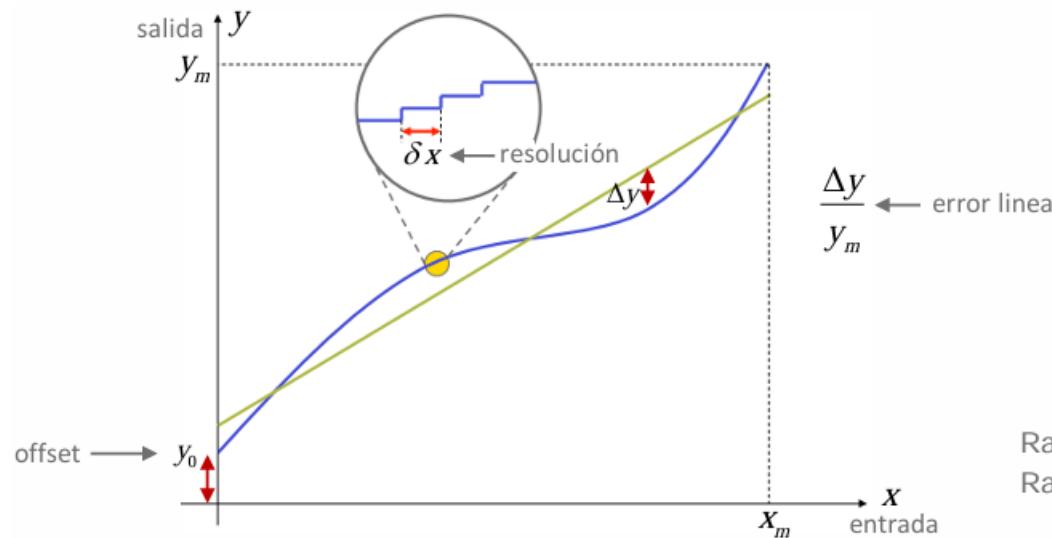
Error de sesgo (offset o bias)

- Valor de salida cuando la *entrada real es cero*.

Error de sesgo (offset o bias)

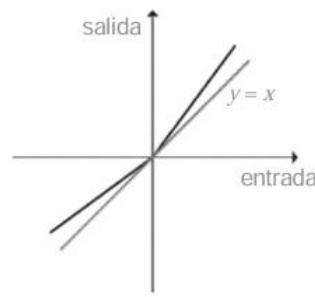
- Variación mínima de la entrada que *no produce cambio en la salida*.

Tipos de Error en Sistemas de Medición

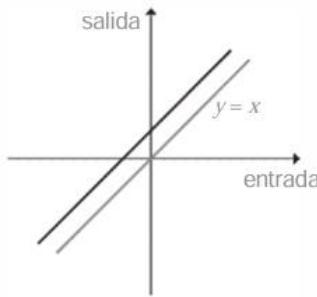


Tipos de Error en Sistemas de Medición

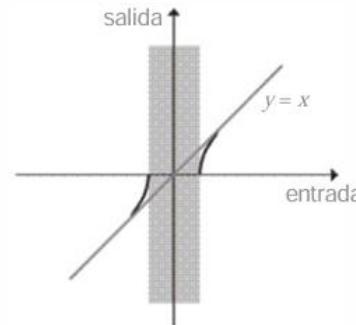
Asimetría



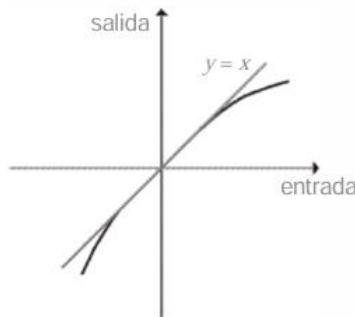
Sesgo ("bias")



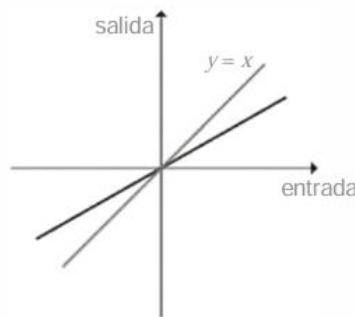
Zona muerta



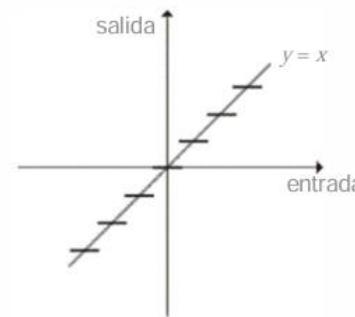
No linealidad



Factor de escala



Cuantización



Tipos de Sensores en Sistemas Robóticos

Sensores Propioceptivos

- Sensores de Posición – motor.
- Sensores de Velocidad Angular.
- Sensores de Aceleración Lineal.
- Sensores de Unidad de Medida Inercial (IMU).



Sensores Exteroceptivos

- Sensores de Fuerza/Torque.
- Sensores de Proximidad.
- Cámaras.
- Otros Sensores Exteroceptivos.

Sensores Propioceptivos - Posición

Función:

- Entregan una *señal eléctrica proporcional* al desplazamiento (lineal o angular) del eje del motor.

Tipos de Desplazamiento Lineal:

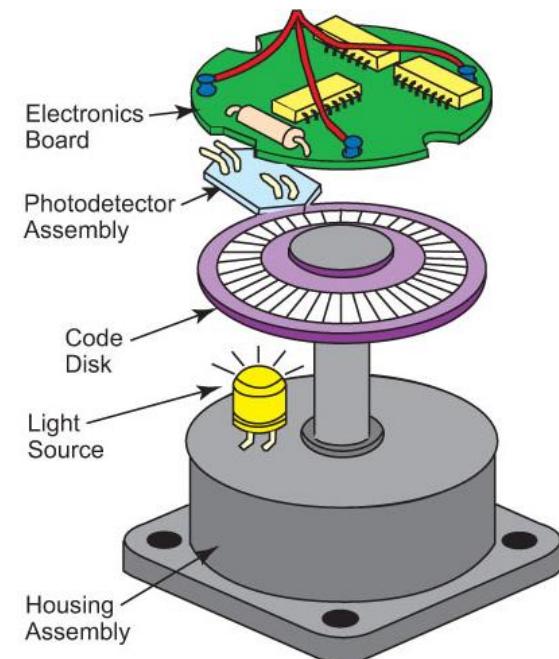
- Potenciómetro lineal* → resistencia varía según el desplazamiento.
- LVDT (Linear Variable Differential Transformer)* → voltaje cambia con el movimiento del núcleo ferromagnético entre bobinas.
- Inductosyn™ (regla magnética)* → parte móvil desliza sobre la fija, variando voltaje y fase con un patrón periódico.



Sensores Propioceptivos - Posición

Tipos de Desplazamiento Angular:

- **Potenciómetros** → resistencia varía proporcional al giro del eje.
- **Resolvers (Resolutores)**
 - Funcionan como un transformador rotatorio.
 - Rotor energizado induce campos en bobinas **seno/coseno**.
 - Los voltajes inducidos determinan la posición angular.
- **Sincros (Synchros)**
 - Otro tipo de transformador.
 - Rotor (primario) monofásico y estator (secundario) trifásico.
- **Encoders (digitales)**
 - Más usados en robótica.
 - Tipos: absolutos e incrementales.
 - Nota: desplazamientos lineales suelen obtenerse con transmisión desde motores angulares.

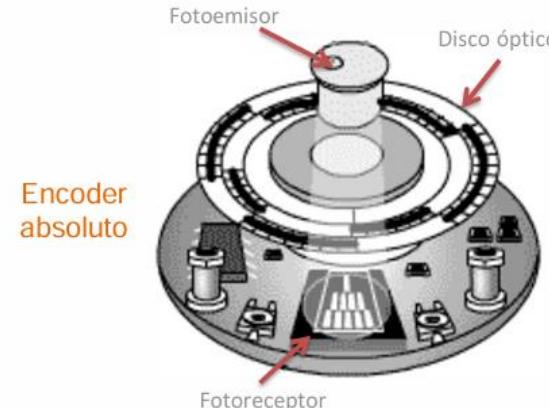
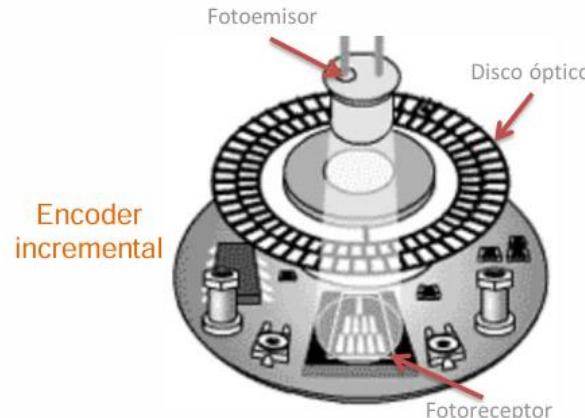


Sensores Propioceptivos - Encoders

- **Magnitud medida:** posición (y también velocidad) del eje del motor.

Principio de funcionamiento:

- Disco giratorio con sectores **transparentes** y **opacos alternados** (múltiples pistas).
- **Foto-emisor (LED infrarrojo)** ilumina → **foto-receptor** detecta el patrón.
- Tipo común: encoder óptico.



Sensores Propioceptivos - Encoders

Encoders Absolutos

- **Definición:** entregan la *posición angular absoluta* del eje, codificada digitalmente.
- **Codificación:** normalmente *código Gray* (solo cambia 1 bit entre posiciones sucesivas).
- **Resolución:**
 - Con N pistas (N bits) → posibles combinaciones: 2^N .
 - Resolución angular = $360^\circ / 2^N$.
- **En robótica:** típicamente $N > 12$ (alta precisión).

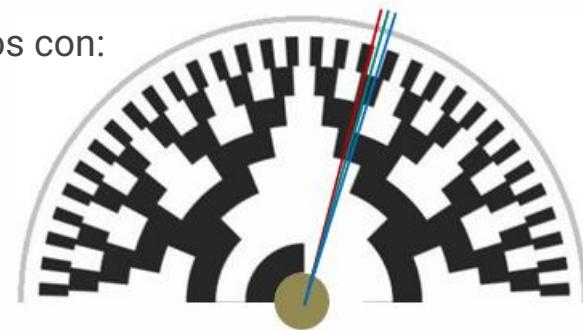
Ejemplo:

- Determinar la resolución en grados de los siguientes Encoders absolutos con:
 $N = 8, 10, 12$ y 16 bits.

Encoder absoluto con $N = 12$ bits.

Combinaciones = $2^{12} = 4096$.

Resolución = $360^\circ / 4096 \approx 0.088^\circ$ por paso.



Sensores Propioceptivos - Encoders

Encoders Absolutos

Con 1 vuelta:

- *No requieren memoria.*
- Al encender, están listos (no necesitan posición inicial homing).



Con múltiples vueltas:

- *Necesitan memoria* para registrar el número de vueltas.
- Problema: al encender, ¿cómo saber en qué vuelta está?
- Soluciones:
 - Batería activa (incluso con sistema apagado).
 - Activar frenos y guardar la posición en memoria flash al apagar.



Sensores Propioceptivos - Encoders

Encoders Incrementales

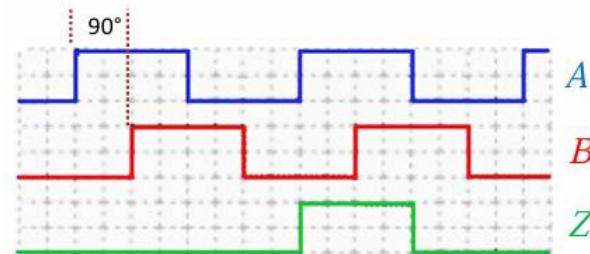
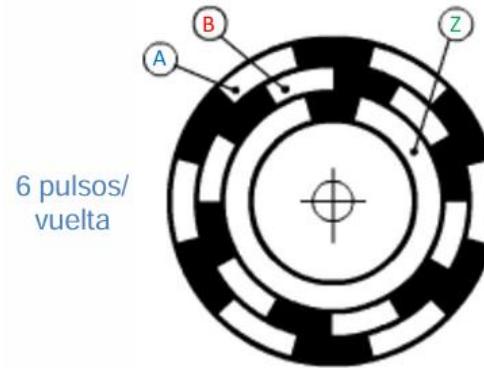
- **Miden** incrementos angulares, no posición absoluta.

Estructura:

- 2 pistas (A, B) o 3 pistas (A, B, Z).
- A y B en cuadratura (90° de desfase).

Estructura:

- Se cuentan pulsos en A o B.
- El desfase A-B indica la dirección de giro.
- Pista Z = referencia de posición 0 (reset).



Sensores Propioceptivos - Encoders

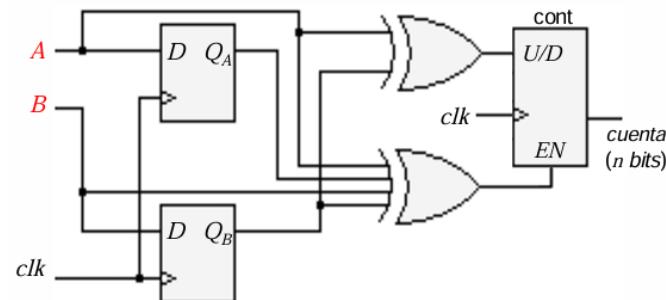
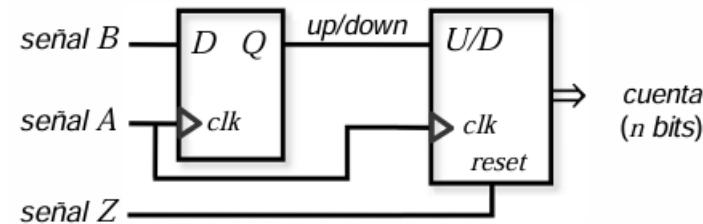
Encoders Incrementales

Procesamiento básico (hardware):

- Flip-flop D → detecta dirección (A o B como reloj).
- Contador up/down (reseteado por Z) → cuenta pulsos (n bits).
- La cuenta se escala a unidades físicas (ej. grados).

Procesamiento x4:

- Aprovecha 4 transiciones por ciclo (A y B).
- Incrementa la resolución x4.
- Usa flip-flops D y un reloj rápido.



Sensores Propioceptivos - Encoders

Comparación: Encoders Absolutos vs Incrementales

| Característica | Absolutos | Incrementales |
|----------------------|--|--|
| Medición | Posición absoluta (cada lectura = posición real) | Solo incrementos angulares (requieren conteo) |
| Referencia inicial | No necesitan "homing" (si es de 1 vuelta) | Necesitan punto de referencia (homing) |
| Memoria | Multivuelta → requieren memoria o batería | No requieren memoria |
| Resolución | Muy alta (ej. >12 bits, hasta miles de posiciones) | Limitada por número de líneas del disco (mejorable con x4) |
| Procesamiento | Directo: lectura digital → posición | Requiere contar pulsos y calcular dirección |
| Costo | Más costosos | Más económicos |
| Robustez | Menos sensibles a pérdidas de energía (si multivuelta con memoria) | Si se pierde la cuenta, se pierde la posición |
| Aplicaciones típicas | Robots manipuladores industriales, CNC, sistemas críticos | Robots móviles, impresoras 3D, motores paso a paso con control |

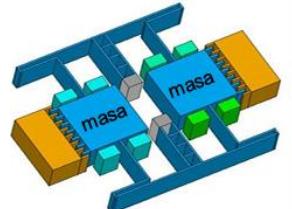
Sensores Propioceptivos - Velocidad Angular

Giroscopio

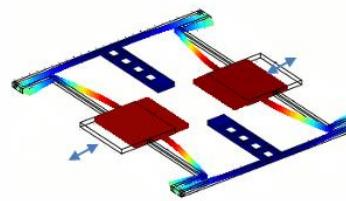
- **Miden** la velocidad angular (puede usarse para calcular la orientación).

Tipos principales:

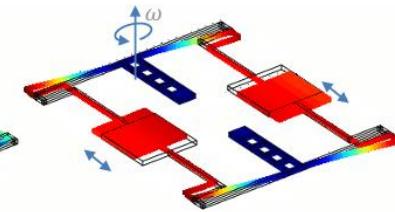
- Mecánicos (rueda giratoria).
- Ópticos → basados en efecto Sagnac.
- Piezoeléctricos.
- Láser.
- Vibracionales (Coriolis).



Microestructura mecánica de giroscopio "tuning fork"



Siempre hay vibración ("horizontal") de las masas (en direcciones opuestas)



Al haber velocidad angular, las masas vibran "diagonalmente". La deflexión es proporcional a la velocidad angular.

Giroscopio de estructura vibrante (más común en MEMS)

- Es el más usado en **dispositivos electrónicos y robots**.
- Basado en el **efecto de la fuerza de Coriolis**.
- El sensor MEMS contiene una **estructura vibrante** que, al girar, sufre una desviación proporcional a la velocidad angular.
- Normalmente cada chip incluye **3 ejes (X, Y, Z)**.

Ejemplo de aplicación:

- Drones para estabilización de vuelo.
- Robots móviles para navegación inercial.
- Smartphones para detección de orientación.

Sensores Propioceptivos - Aceleración Lineal

Acelerómetro

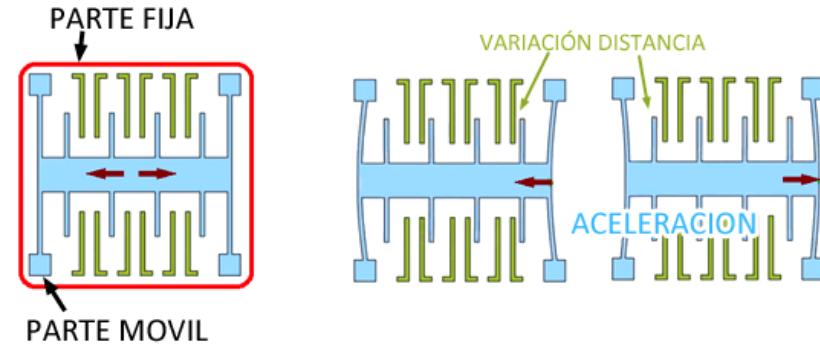
- *Miden* la aceleración lineal → detecta *fuerzas iniciales*.

Tipos principales:

- Piezoeléctricos.
- Piezoresistivos.
- Capacitivos.

Acelerómetro MEMS (capacitivo)

- Estructura:
 - (Micro) resortes → sostienen una (micro) masa vibrante.
 - Cuando hay *aceleración* (Δa) → la masa se desplaza.
 - Esto cambia la *distancia entre placas* → variación en la *capacitancia*.
- Muy usado en robótica y dispositivos portátiles.



Usos en Robótica:

- Medición de *aceleración de articulaciones* o *vibraciones*.
- Estimación de la *posición y velocidad* de un robot móvil (por integración).
- Parte esencial de la *IMU (Unidad de Medida Inercial)* junto con el giroscopio.

Sensores Propioceptivos - Unidad de Medida Inercial (IMU)

Sensores que la componen

- **Acelerómetro** → mide aceleración lineal (incluye gravedad).
- **Giroscopio** → mide velocidad angular.
- **Magnetómetro (opcional)** → orientación con respecto al campo magnético terrestre.
- **Barómetro (opcional)** → altura relativa.

Funciones:

- Estimar mediante integración:
 - **Velocidad lineal** → **posición relativa**.
 - **Orientación** (actitud del robot).



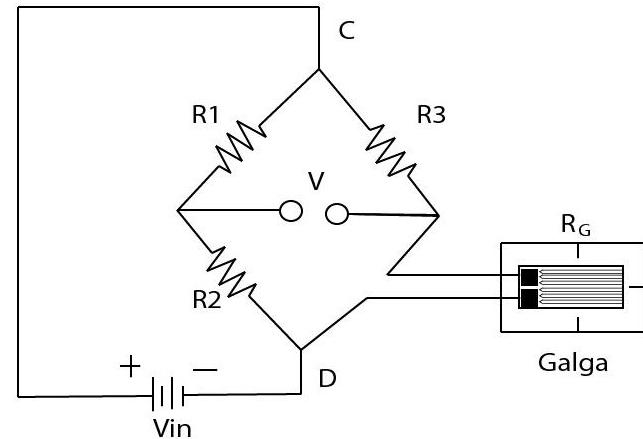
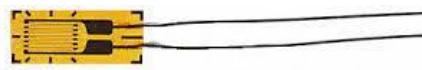
Problema principal:

- **Deriva acumulada**: errores aumentan en funcionamiento prolongado.
- Necesita **referencia externa** para corrección (ej. GPS, balizas, visión).

Sensores Exteroceptivos - Fuerza/Torque

Principio de funcionamiento:

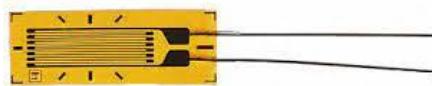
- Basados en *galgas extensiométricas*.
- Detectan *deformación mecánica* causada por fuerza o torque.
- La *resistencia eléctrica (R)* de la galga cambia cuando:
 - Se modifica la *longitud* del material.
 - Se modifica el *área* transversal.



$$V = V_s \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_g}{R_3 + R_g} \right)$$

Medición:

- Se utiliza un *ponte de Wheatstone* para convertir la variación de resistencia en una señal de voltaje (V_{out}).
- Configuración típica:
 - $R_1 = R_2 = R_3 = R_a$.
 - En equilibrio (sin carga): $R = R_a$.
- La salida de voltaje permite cuantificar la fuerza o el torque aplicado.



Sensores Exteroceptivos - Fuerza/Torque

Principales aplicaciones

Sensor de torque en articulaciones (ejes)

- Permite medir el par aplicado por el motor o resistencias externas.
- Usado en *control de esfuerzo* y *robótica colaborativa* (detectar contactos con humanos).



Sensor de fuerza/torque 6D en el efecto final

- Mide fuerzas y torques en los *3 ejes cartesianos* ($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$).
- Implementado como *discos con galgas extensiométricas*.
- Esencial para:
 - Tareas de *ensamblaje de precisión*.
 - *Manipulación delicada* de objetos.
 - *Teleoperación* y robótica quirúrgica.

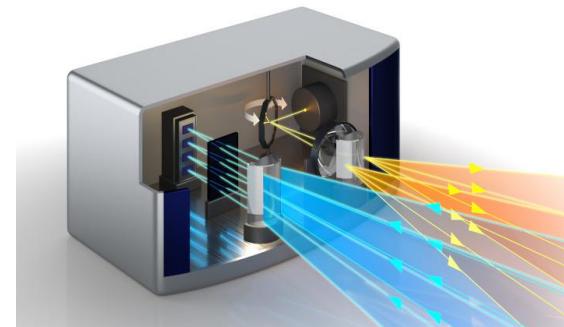


Sensores Propioceptivos - Proximidad

- También llamados: *sensores de rango* o de *profundidad*.
- Permiten medir la *distancia a objetos cercanos*.

Según Principios de funcionamiento

1. Basados en triangulación
 - Triangulación óptica (1D):
 - Mide distancia con un emisor y un receptor en ángulo.
 - Alcance *muy limitado*.
 - Luz estructurada (2D):
 - Proyecta un patrón (rejilla o franjas).
 - La deformación en el patrón permite reconstruir la *profundidad*.
2. Basados en Tiempo de Vuelo (ToF)
 - Ultrasonido:
 - Emite ondas sonoras de alta frecuencia.
 - El tiempo de eco determina la distancia.
 - LIDAR (láser):
 - Usa pulsos de luz láser.
 - Alta precisión y mayor rango.
 - Cámaras ToF:
 - Cada píxel mide la distancia.
 - Generan un *mapa 3D en tiempo real*.

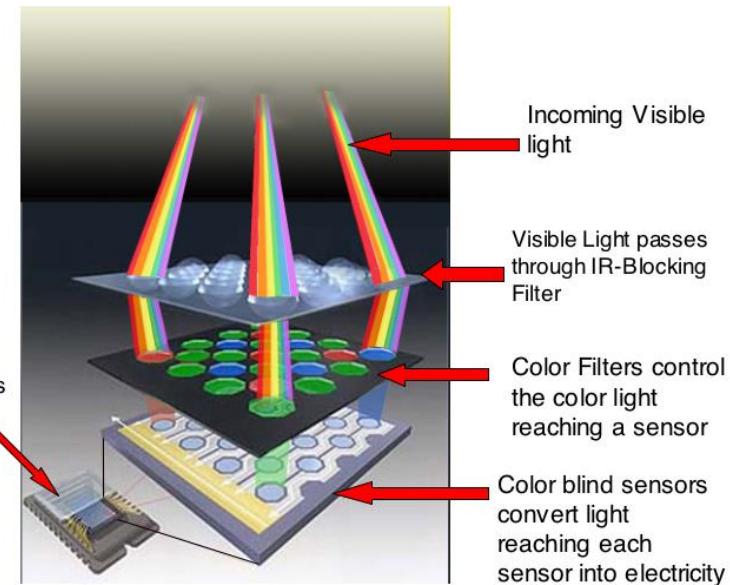
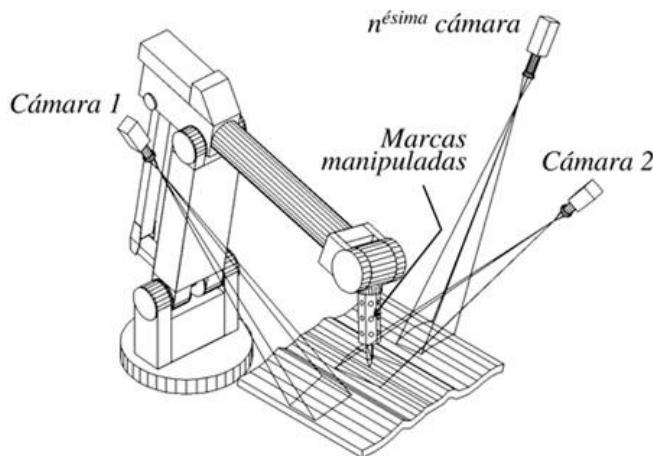


Sensores Exteroceptivos - Cámaras en Robótica

Definición:

- Son sistemas usados para dotar al robot de *visión computacional/artificial*.
- Funcionan a partir de un *arreglo de elementos foto-resistivos (pixeles)* que convierten:

Energía luminosa → Energía eléctrica



Sensores Exteroceptivos - Cámaras en Robótica

Tipos principales de cámaras en robótica

1. Cámaras RGB

- Capturan imágenes en color (rojo, verde, azul).
- Usadas para *reconocimiento de objetos, clasificación y navegación.*

2. Cámaras RGB-D

- Además del color, capturan *profundidad* (distancia a cada píxel).
- Ejemplo: Kinect.
- Útiles para *mapeo 3D y SLAM* (Simultaneous Localization and Mapping).

3. Cámaras estereoscópicas

- Dos cámaras separadas *simulan la visión binocular.*
- Permiten calcular la *profundidad por triangulación.*

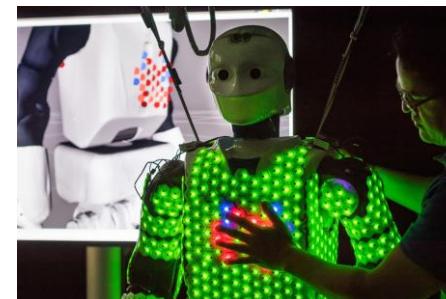
4. Cámaras ToF (Time of Flight)

- Usan *luz infrarroja* y calculan el tiempo que tarda en regresar.
- Generan *mapas de profundidad en tiempo real.*

Sensores Exteroceptivos - Otros Sensores

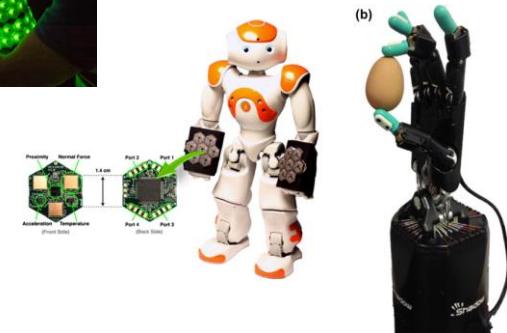
Piel artificial

- Inspirada en la piel humana, diseñada para dar a los robots *capacidad de tacto*.
- *Basada en sensores de presión*, que detectan la fuerza ejercida sobre la superficie.
- Se usa para que los robots interactúen con personas y objetos de manera *segura y delicada*.
- Ejemplo: Robot humanoide *i-Cub*, que utiliza piel artificial sensible al tacto en su cuerpo.



Sensores de toque (Táctiles)

- Detectan el *contacto físico directo* con un objeto o superficie.
- Principios de funcionamiento más comunes:
 - Cambio de *capacitancia* (variación de carga eléctrica al presionar).
 - Cambio de *resistencia eléctrica* (cuando la presión deforma un material conductor o resistivo).



Contenido:

2.1

Sistemas de robots

2.2

Sistema mecánico

2.3

Sistema de actuación

2.4

Sistema de sensado

2.5

Sistema de control

Sistemas de Control en Robótica

Función principal

- *Brindan señales adecuadas* para generar y regular el movimiento del robot.
- Se encargan de que el robot ejecute las acciones deseadas con *precisión, estabilidad y seguridad*.

Tipos de control

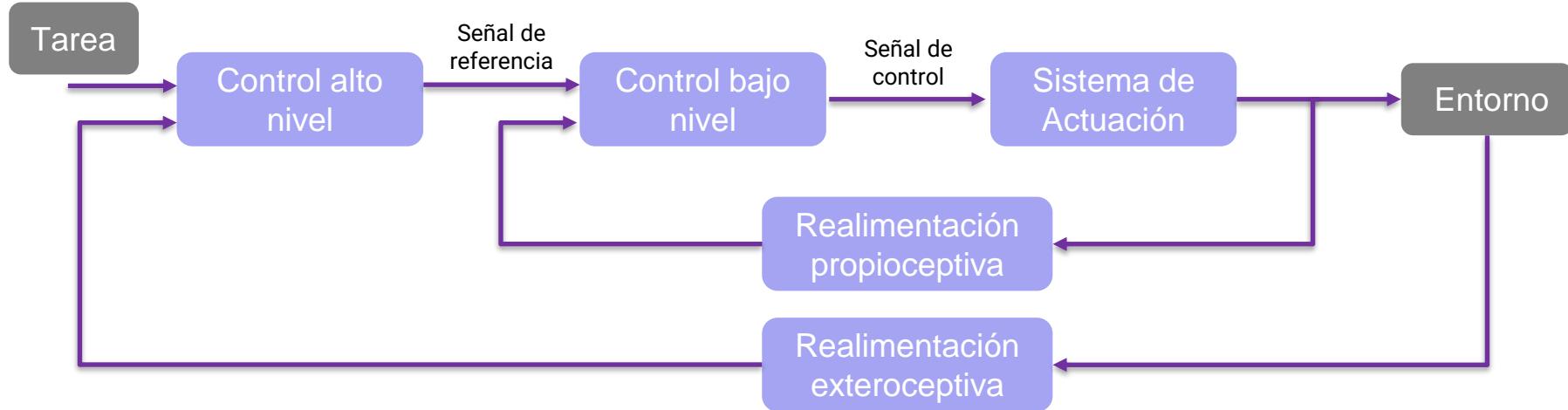
1. Control de Alto Nivel

- Toma *decisiones globales* sobre la tarea del robot.
- Se basa en modelos, planeación de trayectorias y percepción.
- Ejemplo: planificación del movimiento de un manipulador desde la posición inicial hasta el objetivo.

2. Control de Bajo Nivel

- Se ocupa de la *ejecución directa* de las señales que mueven motores o actuadores.
- Controla variables como posición, velocidad y torque en cada articulación.
- Ejemplo: un controlador PID para un motor de corriente continua.

Sistemas de Control en Robótica



Esquemas de Control Mixtos

- Combinan ambos niveles.
- El *alto nivel envía referencias* (posiciones, trayectorias) que el *bajo nivel ejecuta*.
- Ejemplo:
 - Visual Servoing: un sistema de visión (alto nivel) mide la posición de un objeto, y ajusta directamente el control de los actuadores (bajo nivel) para alcanzarlo.

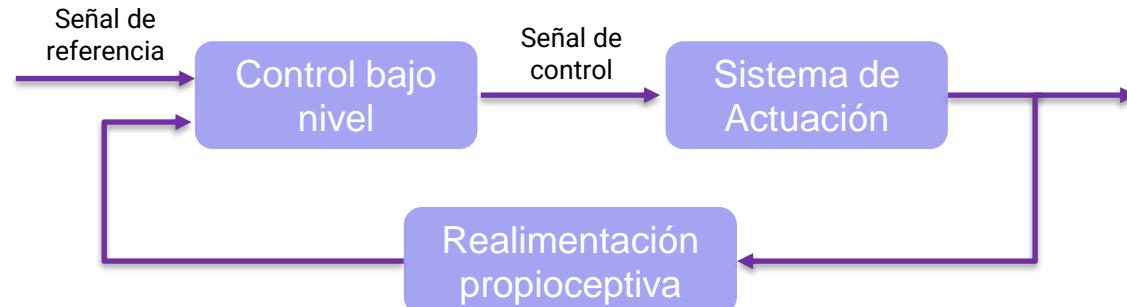
Control de Bajo Nivel

Características principales

- Envía *señales directas a los actuadores* (motores, servos, etc.) para generar movimiento.
- La *retroalimentación* proviene de *sensores propioceptivos* (ejemplo: encoders que miden posición y velocidad del eje).
- Se implementan *controladores clásicos* y en la mayoría de casos de tipo *SISO (Single Input Single Output)*.

Ejemplos de controladores

- PID, LQR



Particularidad en robots

- Generalmente, este control está en un *bucle cerrado*:
 - El *usuario externo* solo da la *referencia* (ejemplo: "mover articulación a 30°").
 - El sistema de bajo nivel se encarga de ejecutar la acción y corregir errores automáticamente.

Control de Bajo Nivel – Hardware Usual

Microcontroladores

- Usados principalmente en *robots pequeños*.
- Ejemplos:
 - *Atmel AVR* → ATmega (usado en Arduino).
 - *PICs* → Serie 16F84.
 - *ARM Cortex-M* → gran variedad, bajo consumo y alto rendimiento.
- Ventaja: bajo costo, fáciles de programar, existen módulos de *prototipaje rápido* (Arduino, STM32 Nucleo, ESP32).



PLCs (Programmable Logic Controllers)

- Usados en *robots industriales* y aplicaciones de alta potencia.
- Ejemplos:
 - *Siemens* → Simatic S7-1500.
 - *Allen-Bradley* → ControlLogix 5580.
- Ventaja: muy robustos, confiables en entornos industriales.



Control de Bajo Nivel – Hardware Usual

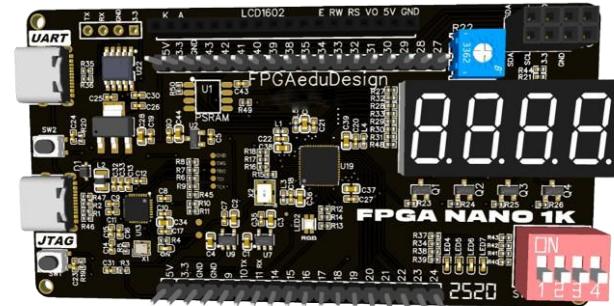
Autopilots

- Específicos para *drones y UAVs*.
- Ejemplos:
 - *Pixhawk* (ej. Pixhawk 4).
 - *ArduPilot* (ej. APM 2.6, APM 2.8).
- Ventaja: integran sensores (IMU, GPS) y software de navegación



FPGA (Field Programmable Gate Array)

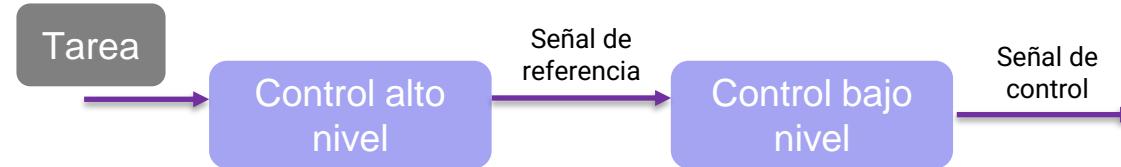
- Usados cuando se requiere *procesamiento en paralelo* y *alta velocidad*.
- Típicos en aplicaciones que requieren control muy preciso o procesamiento de señales en tiempo real.
- Ventaja: muy robustos, confiables en entornos industriales.



Control de Alto Nivel

Función principal

- Genera *señales de referencia* que luego recibe el control de bajo nivel.
- Se apoya *principalmente en sensores exteroceptivos* (cámaras, LiDAR, ultrasonido, etc.).
- Objetivo: permitir al robot realizar *tareas complejas* y alcanzar *autonomía*.



Métodos usados

- Control cinemático.
- Planificación de movimiento (Motion Planning).
- Aprendizaje por reforzamiento (Reinforcement Learning, RL).

Nota importante

- Algunos métodos de alto nivel también actúan sobre el bajo nivel, por ejemplo:
 - Control óptimo.
 - Optimización de trayectorias.
 - Visual servoing (usar visión para ajustar directamente los actuadores).

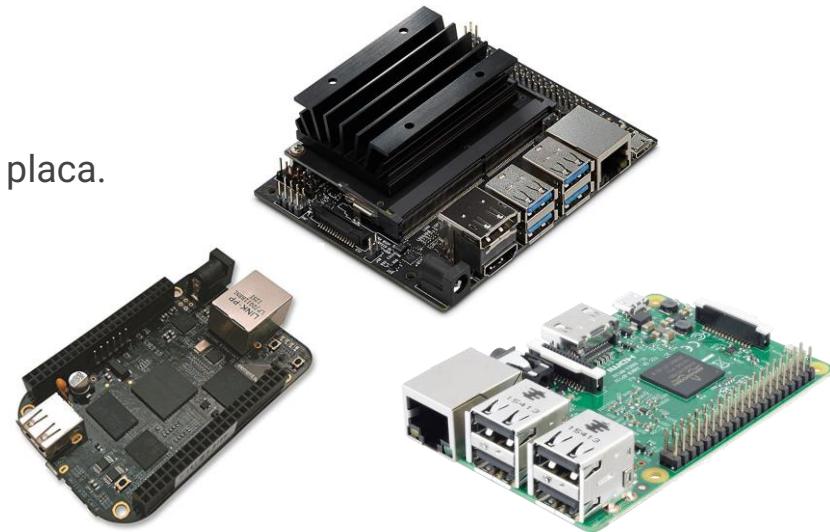
Control de Alto Nivel – Hardware Usual

Computadora

- Usan *microprocesadores potentes* para tareas de procesamiento intensivo.
- Permiten ejecutar algoritmos complejos (visión, IA, planeación).
- *Sistemas operativos*: versiones de Linux en tiempo real (RoS, RTLinux, RTAI, Xenomai, etc.).
- En algunos casos se emplean *computadoras dedicadas* exclusivamente para ciertas funciones (ejemplo: visión computacional).

SBC (Single Board Computer)

- Computadoras *compactas y de bajo consumo* en una sola placa.
- Diseñadas para *integrarse dentro del robot* ("embebidas").
- Incluyen:
 - Microprocesador.
 - Memoria RAM.
 - Pines de I/O (para conectar sensores/actuadores).
- Usualmente ejecutan alguna variante de *Linux*.



Capítulo II:

FIN

Introducción a la Robótica