



Fundamentos de Robótica Industrial

Acercamiento a un 4GDL

25 de Marzo de 2025

Recuerde, todos los laboratorios contarán con un control de lectura escrito previo al inicio con el objetivo de controlar se haya leído el material facilitado por los docentes, y garantizar la seguridad en todos los procedimientos

Laboratorio 1

Objetivo

Este laboratorio tiene por objetivo el acercamiento del estudiante al ensamblaje y funcionamiento de un brazo robótico de 4 grados de libertad, siguiendo la convención de Denavit-Hartenberg utilizada en Teórico. Se pretende que el estudiante, provisto de las piezas necesarias, sea capaz de ensamblar y manipular con controles básicos dicho brazo robótico desde la computadora.

Fundamentos y Metodología

Antes del uso del laboratorio es indispensable haber leído y tener presente la guía de “Buenas prácticas para trabajo de laboratorio”, disponible en el EVA del curso.

En robótica suelen utilizarse diversos tipos de actuadores, neumáticos, hidráulicos y eléctricos. En este laboratorio se hará uso de actuadores eléctricos, siendo los actuadores neumáticos e hidráulicos utilizados en aplicaciones a mayor escala.

Dentro de los actuadores eléctricos utilizados en robótica se destacan los motores paso a paso y los servomotores.

Actuadores

Motores Paso a Paso

Los motores paso a paso (o stepper motors en inglés) son un tipo de motor de corriente continua (DC) que consiste de un estator bobinado y un rotor de hierro o con imanes permanentes. Existen tres tipos principales: de imán permanente que utilizan un rotor compuesto por imanes, los de reluctancia variable que utilizan un rotor de hierro dentado, y los híbridos que utilizan un rotor de imanes dentado.

Considere un motor simplificado de dos bobinados en su estator y un imán permanente como su rotor (Figura 1). Cuando uno de los bobinados se energiza, genera un campo magnético al cual el rotor girará para alinearse. Luego, al apagar este bobinado y prender el siguiente, el campo magnético dentro del motor rota y por lo tanto también el rotor para alinearse con el mismo. El ángulo de cada rotación es el ángulo de paso (en este caso 90°). Si para el siguiente movimiento no se apaga la bobina y se prende la otra, el rotor girará 45° para alinearse con la dirección de menor reluctancia. A esto se le llama “medio paso”. Dependiendo del orden en el que se energizan las bobinas, y con qué polaridad se energizan, el rotor girará en una dirección o la otra. La cantidad de bobinados en el estator y de dientes o polos en el rotor determina el ángulo por paso del motor. Los grados por paso más comunes son 0.72° , 1.8° , 3.6° , 7.5° , 15° .

Por lo tanto, a diferencia de los motores DC con escobillas o los motores AC, si se conecta un motor paso a paso a una fuente de potencia, el motor no girará. Los steppers sólo giran cuando el campo magnético del estator gira y para que esto suceda se necesita de un controlador que conecte secuencialmente los bobinados del estator.

Los motores paso a paso desarrollan su par máximo a velocidad nula y disminuye al aumentar la velocidad. Aún sin estar energizados, los steppers desarrollan un par residual.

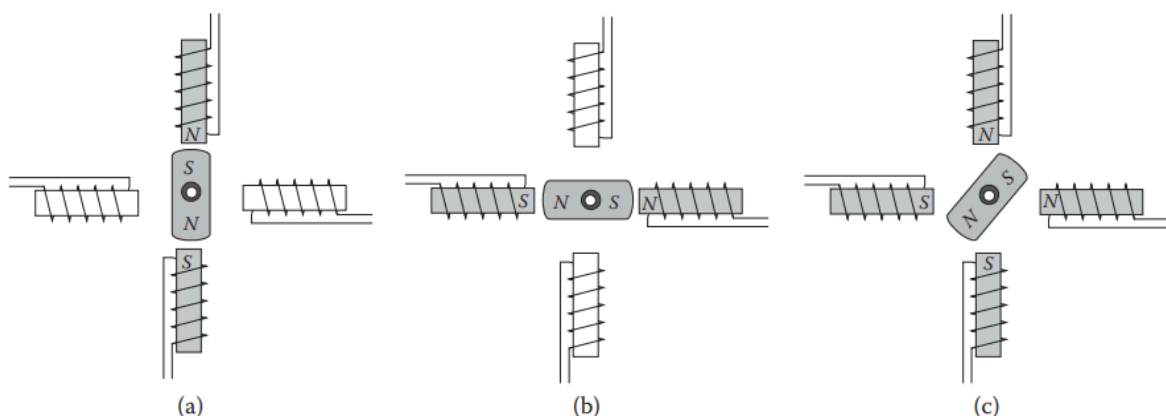


Figura 1: Esquema de un motor paso a paso de 4 dientes en el estator y 2 dientes en el rotor

En la mayoría de las aplicaciones los steppers son utilizados sin retroalimentación de posición esto es debido a que, si no se pierde un paso, el motor gira un ángulo conocido por cada paso. Aplicaciones donde la probabilidad de perder pasos no es alta (o no es de importancia) o donde el motor resetea su posición con asiduidad, son ideales para su utilización sin realimentación.

Ventajas

- Fáciles de controlar, dado su control en lazo abierto no necesitan un controlador complejo y costoso
- Menor costo que los servomotores
- Se trata al mismo tiempo de motores muy ligeros, compactos y fiables

Desventajas

- Disminución significativa del par a medida que aumenta la velocidad

- Pueden entrar en resonancia debido a las vibraciones que producen
- Existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto

Motores DC con escobillas

Consisten en un estator que genera un campo magnético, producido por imanes permanentes o por un devanado que transporta corriente. El rotor tiene otro devanado que transporta una corriente fija.

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, provocando el giro del rotor.

Cuando el devanado del rotor se encuentre perpendicular al campo magnético, la fuerza dejará de hacer girar al rotor. Es por esto que el par entregado varía con el giro del rotor. Esto se soluciona teniendo varios devanados en el rotor, y conmutando la corriente que circula por los devanados de forma sincronizada al giro del rotor a través del uso de escobillas (Figura 2).

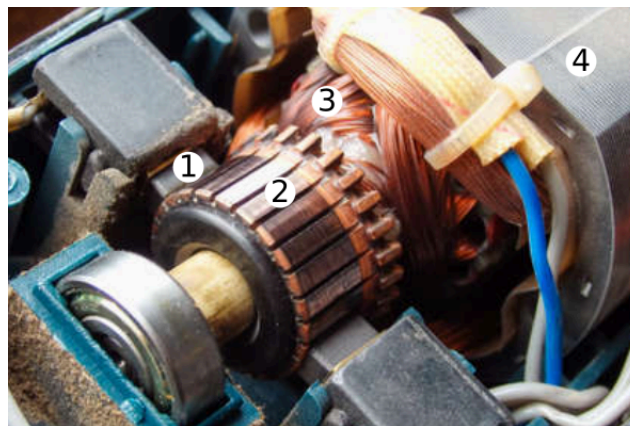


Figura 2: Motor DC: 1: Carbones (antes escobillas), 2: Contactos para conmutar los bobinados energizados, 3: Rotor bobinado, 4: Estator.

Ventajas

- Facilidad del control de velocidad

Desventajas

- Las escobillas se desgastan y deben ser reemplazadas
- limitaciones de par, motivadas por el riesgo de sobrecalentamiento

Motores DC sin escobillas

Los motores sin escobillas (BLDC por su sigla en inglés) presentan una construcción similar a los motores AC, con un rotor de imanes permanentes y un estator compuesto por distintos devanados. La principal diferencia es que los BLDC son controlados a través de una señal DC que es electrónicamente conmutada de forma que obtiene características similares a una señal AC. Como esta señal es generada por el sistema de control, estos motores son capaces de operar a cualquier velocidad, incluyendo velocidades muy bajas.

El sistema de control necesita de una retroalimentación de la posición del rotor para determinar cuándo se deben invertir las direcciones de las corrientes. Para esto generalmente se utilizan resolver, encoders o sensores de efecto hall, para enviar esta señal de realimentación al controlador. Los motores sin escobillas, similarmente a los motores paso a paso, no giraran al ser conectados directamente a una fuente de potencia.

Ventajas

- Facilidad del control de velocidad
- Alta potencia/peso

Desventajas

- Se necesita un sistema de control complejo

Servomotores

Se denomina servomotor a un sistema compuesto por diversos elementos electrónicos y mecánicos, como un motor continuo DC, un sistema de engranajes reductores, un controlador e incluso diversos sensores. Estos sistemas poseen incluso un sistema de control de retroalimentación de posición para corregir el estado del sistema, como puede verse en el esquema de la figura 3.

Los servomotores poseen por lo menos tres cables (Positivo, tierra y señal de control), a diferencia de los motores comunes que sólo tienen dos. Los servomotores son generalmente controlados mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) donde la posición final del servo está dada por el ancho de cada pulso.

El sensor de posición, generalmente un potenciómetro, le indica al controlador la posición actual del eje. El controlador hará girar al motor hasta que el eje alcance la posición indicada por la señal de control.

Existen dos tipos principales de servomotor: de rango de giro limitado y de rotación continua. Los servos de rango limitado son los más comunes y los rangos típicos son de 45°, 90° y 180°. Los servos de rotación continua son capaces de girar 360°.

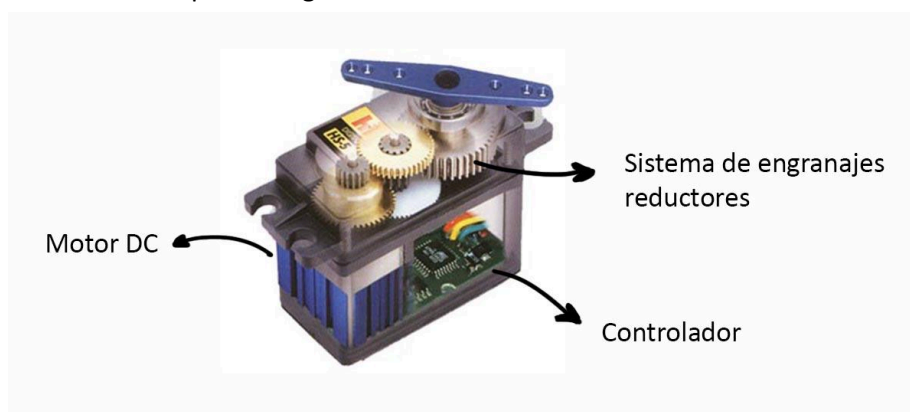


Figura 3: Esquema de un servomotor

Ventajas

- Actuadores lineales, permiten gran control de la velocidad y aceleración
- El torque entregado es elevado para su tamaño, incluso al aumentar la velocidad

- Alta velocidad, aceleración y precisión

Desventajas

- Necesitan de una placa controladora y un sistema de control de lazo cerrado haciéndolos más costosos
- Generalmente incluyen un sistema reductor de engranajes que requiere mantenimiento

Ref: Niku, S. B. (2020). Introduction to robotics: analysis, control, applications. John Wiley & Sons.

Sensores

Potenciometros

Es un sensor que convierte una variación de posición en una variación de voltaje mediante una resistencia variable. Consiste de una perilla conectada a un cursor o flecha, que se desplaza sobre un material resistivo. Al girar o desplazarse la perilla (Figura 4), la proporción de la resistencia antes y después del cursor cambia respecto a la resistencia total del potenciómetro, actuando como un divisor de tensión.

Los potenciómetros pueden ser angulares o lineales, por lo que pueden sensor desplazamientos angulares o lineales. Además, los angulares pueden ser de giro limitado o de varias vueltas.

Ventajas

- Económico

Desventajas

- Desgaste mecánico

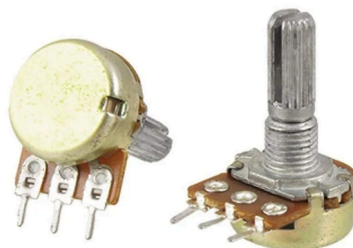


Figura 4: Potenciómetro angular

Encoders

Estos sensores de posición están compuestos por discos (angular) o reglas (lineal), las cuales presentan pequeñas secciones tanto transparentes o reflectivas, intercaladas con secciones opacas a la luz que utiliza el dispositivo. También se tiene una fuente y un receptor de luz (Figura 5).

Dependiendo de la posición de estas secciones transparentes y opacas, se permite (o no) el pasaje del haz de luz hacia el receptor, generando una salida digital (0 y 1) para cada pequeña porción de movimiento. Contando la cantidad de señales, se puede obtener el desplazamiento. Dependiendo del tipo de encoder, estos pueden brindar información adicional como sentido de movimiento, y posición absoluta.



Figura 5: Encoder angular

Microswitches

Estos sensores de contacto, son interruptores que contienen terminales tanto normal cerrado como normal abierto, de manera que al activarse pueden utilizarse tanto para abrir como para cerrar circuitos.

Su principal uso es como finales de carrera, y son activados por contacto directo con el sensor o mediante un sistema de palanca dependiendo del tipo de instalación.

Son sensores simples, robustos y de bajo costo.



Figura 6: Microswitches para final de carrera.

Materiales a utilizar

En la figura 8 se muestra un catálogo de las piezas necesarias para la práctica obtenidas del kit Bioloid Premium de Robotis, dentro de ellas cabe destacar los servos Dynamixel AX-12A que tienen sensor de torque incluido.

Se utilizará este modelo por su versatilidad en el ensamblado, permitiendo orientarlos de diversas formas así como acoplarlos a varias piezas del kit.

Dichos servos serán conectados en serie, recibiendo alimentación de 12V.

Para comunicación con PC se utilizará el módulo USB U2D2 de Robotis mostrado en la figura 7:

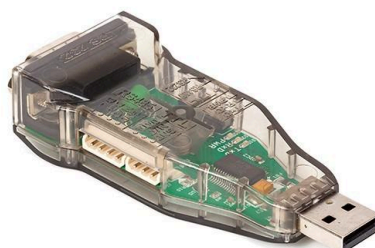


Figura 7: Módulo USB U2D2 de Robotis

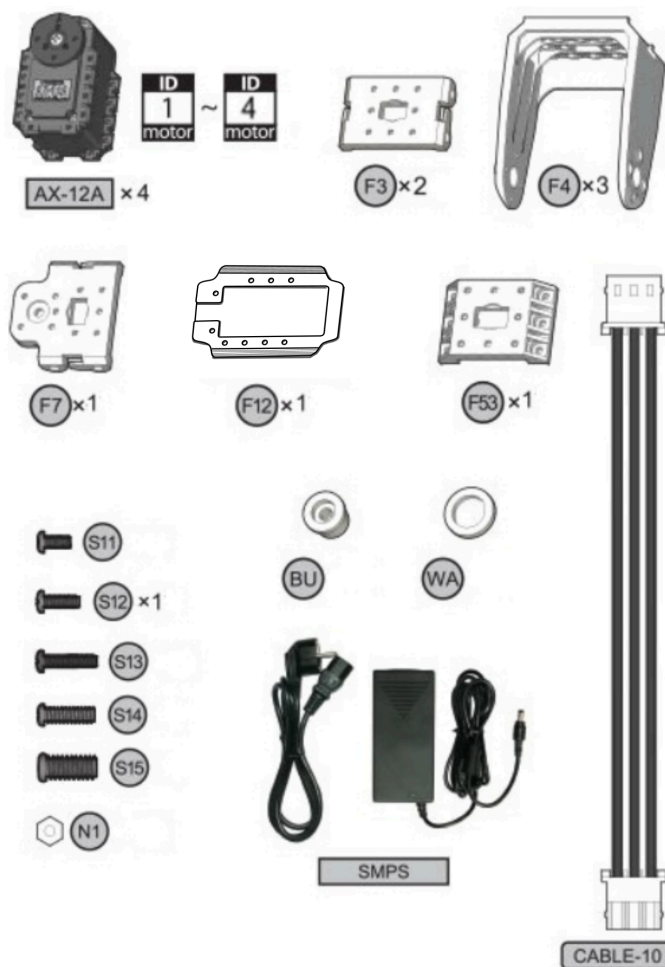


Figura 8: Piezas a utilizar en el ensamblaje del brazo robótico

Esquema de referencia

En la figura 9 puede verse el esquema que se utilizará como referencia, en conjunto con las normas definidas por el método Denavit-Hartenberg, para ensamblar un manipulador antropomórfico de 4 grados de libertad.

Se utilizarán 4 servos Dynamixel para generar las articulaciones rotacionales y un puntero como soporte que se utilizará más adelante.

El método Denavit-Hartenberg establece reglas simples para lograr un ensamblaje coherente y que facilite la resolución de la cinemática del manipulador:

- Determinar el número n (del 0 en adelante) de articulaciones (4 en el caso de 4 grados de libertad) y el número $n+1$ de eslabones
- El eje z_n siempre se encuentra colineal al eje de rotación, siendo z_0 el eje de rotación de la articulación 1
- Sistema de coordenadas de referencia $x_0 y_0 z_0$ es fijo a la mesa de trabajo
- El eje x_n es colineal con la normal común entre z_n y z_{n-1}
- El eje y_n sigue la regla de la mano derecha

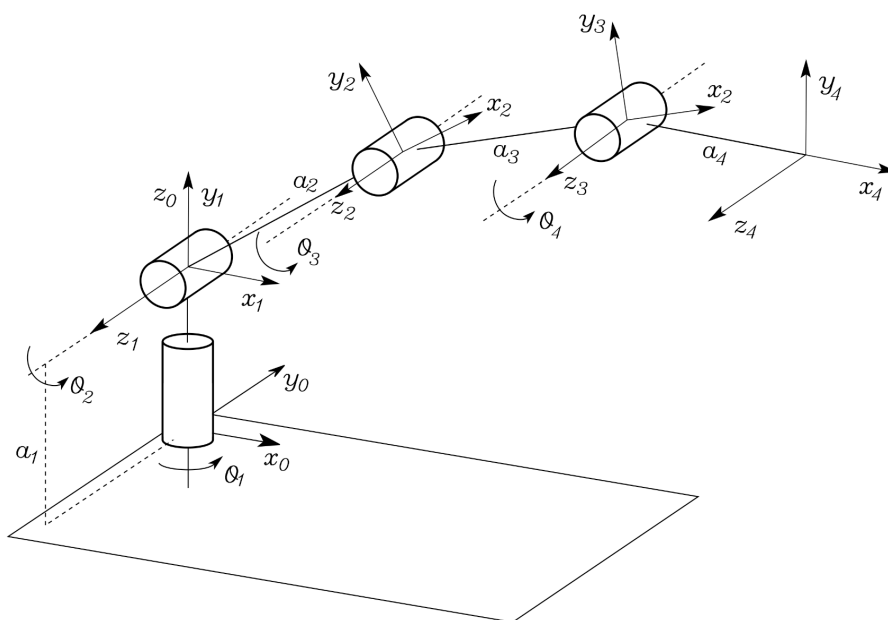


Figura 9: Esquema 4GDL

Ensamblaje del Brazo

Siguiendo las reglas de D-H, además de definir el eje z colineal con el eje de rotación del servomotor, se tomará la dirección y sentido del eje x como se muestra en la figura 10, para todos servos del manipulador:

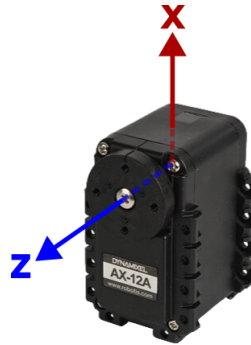


Figura 10: Esquema de ejes de coordenadas a utilizar en los servomotores

En las figuras 11.a y 11.b se muestran las piezas en particular que se utilizarán para ensamblar el brazo y una guía simple de cómo hacerlo.

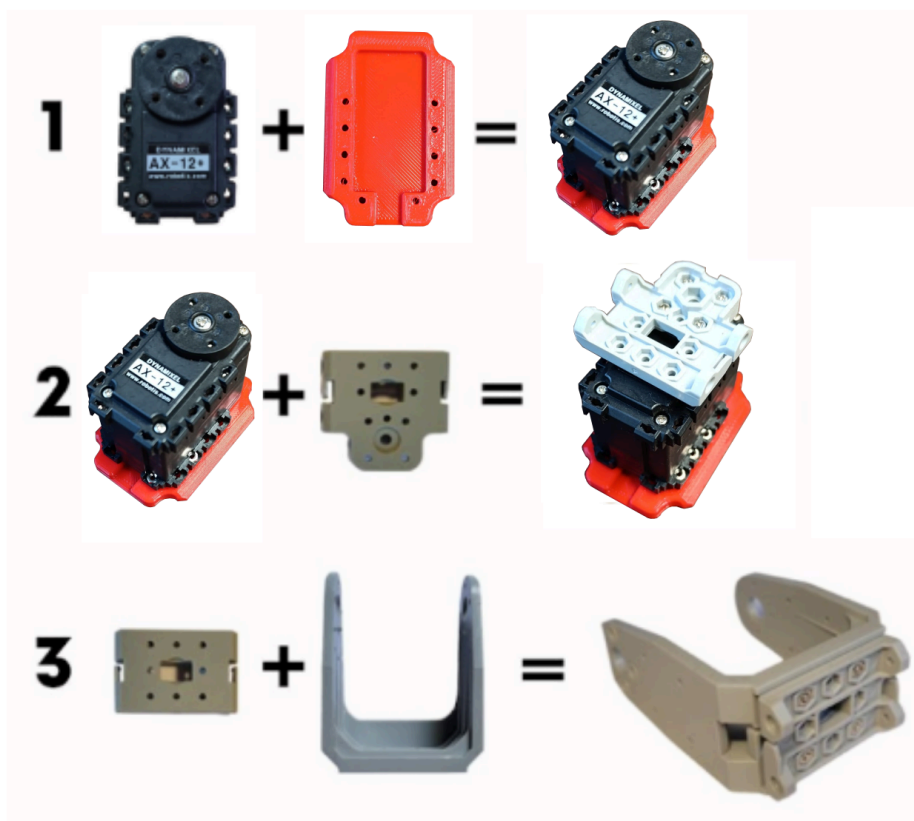


Figura 11.a: Ensamblaje del brazo

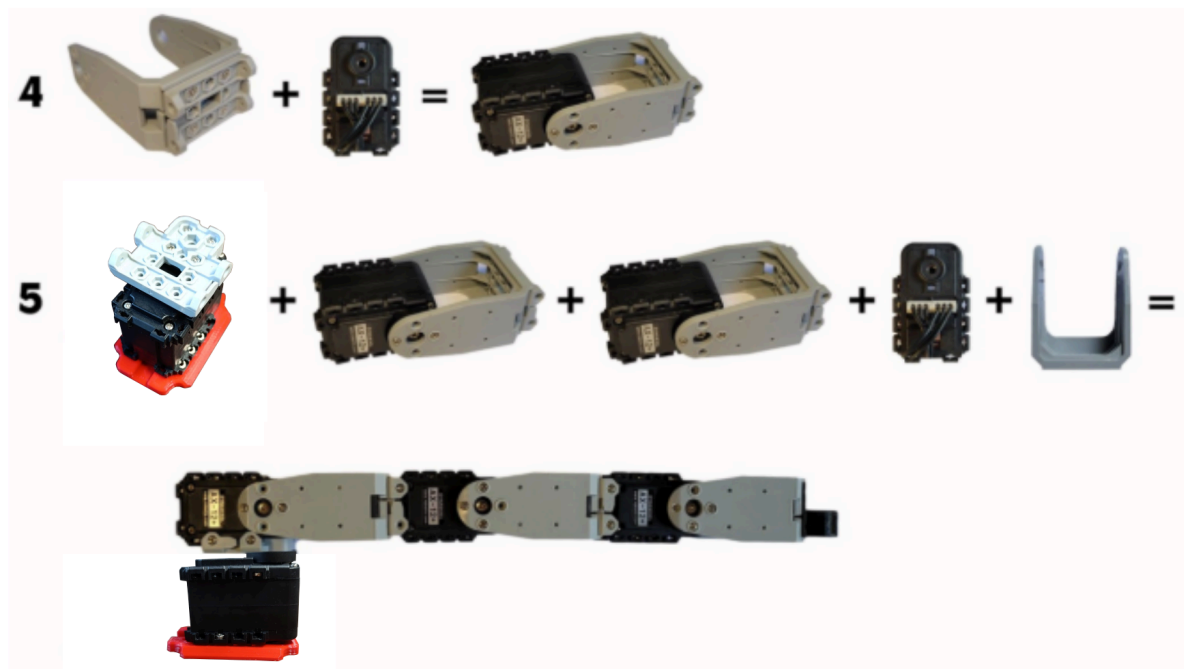


Figura 11.b: Ensamblaje del brazo

Conexión Eléctrica

- El conexionado eléctrico entre cada motor es serial, por lo que se conectará el cable mostrado en la figura 8 de un motor al siguiente sin importar qué conexión se utilice en el motor (izquierda o derecha)
- El tipo de conexión serial deja un extremo de cable sin conectar en el primer y último eslabón del brazo, en el primero se conectará la unidad USB2D y en el último la alimentación (NO CONECTAR LA ALIMENTACIÓN AL USB2D)

Conexión a la PC

Una vez realizado el conexionado eléctrico se puede proceder a conectar la unidad a la PC. Se utilizará el programa DynamixelLab, una interfaz gráfica de base que hace uso de la librería Human Robotics, una librería Python 2.7.

En la figura 12 puede verse la ventana principal, en la cual hay que asegurarse de estar utilizando el puerto COM correcto. Una vez seleccionado dicho puerto, se presiona el botón “scan” y en la ventana izquierda se mostrará una lista de los servos encontrados. Por otro lado, en la ventana derecha aparecerá una lista de parámetros que pueden manipularse, en éste caso sólo se manipulará el ID, o número de identificación, de cada servo, se utilizarán los ID del 1 al 4. Es importante adjudicar los ID correspondientes a cada servo ya que con ellos se identificarán cada vez que se conecten a la PC, adjudicar el mismo ID a dos servos en el mismo manipulador generará conflictos. Para cambiar el ID de un servo es recomendable que no se encuentre conectado en serie con ningún otro, por lo

tanto, debe realizarse el proceso de escaneo individualmente para cada servo estando únicamente el servo a identificar conectado tanto a la PC como a la alimentación.

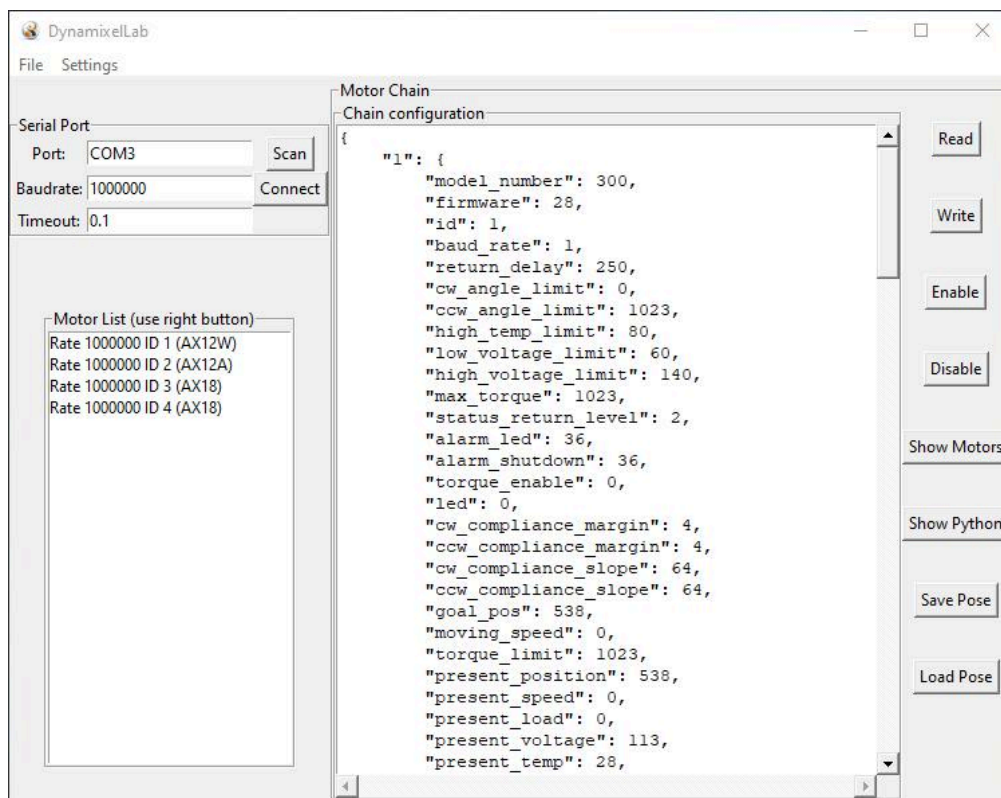


Figura 12: Ventana principal de DynamixelLab

Desde este programa se puede acceder a comandos directos de los servomotores, como se muestra en la figura 13, que serán de gran utilidad para corroborar el correcto funcionamiento de los mismos y familiarizarse con su comportamiento;

- *goal_pos*: establece la posición dentro del rango de 300 grados en la que se ubica el motor
- *moving_speed*: es la velocidad con la que se moverá ese motor (es recomendable que se encuentre en valores intermedios)

También se podrá acceder al Python Sandbox, donde se puede hacer uso de la librería y sus comandos para programar movimientos en el manipulador.

En caso de que se trabe algún servo o el manipulador entero, resetear la alimentación y volver a escanear los servos para retomar el correcto funcionamiento.

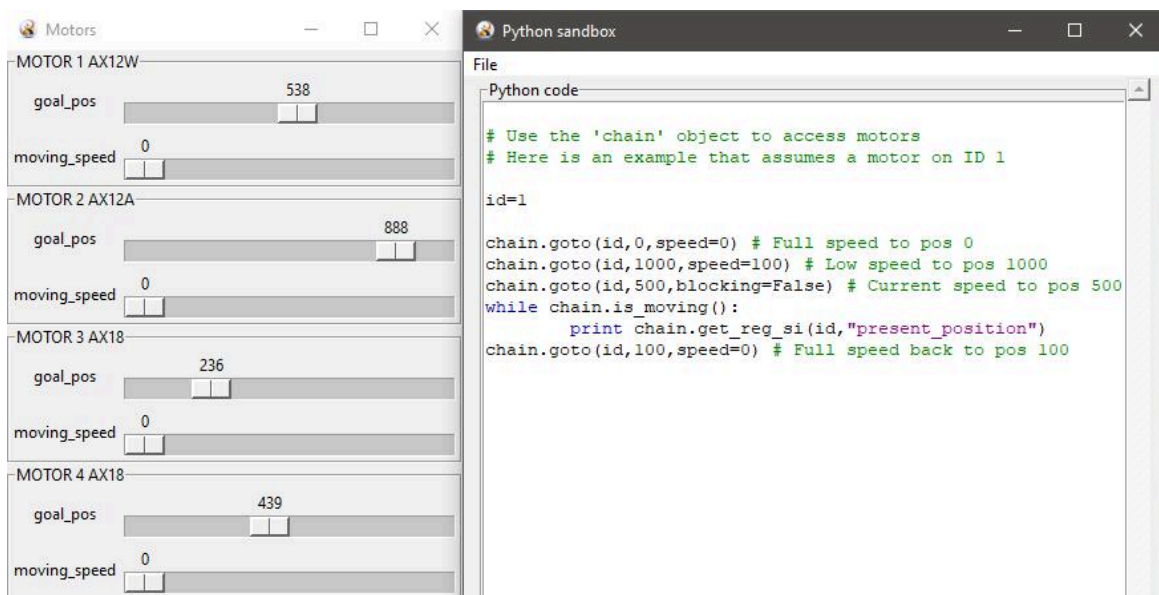


Figura 13: Comandos de servomotores y Python Sandbox

Descripción de tareas:

1. Planificación de ensamblado mediante el método Denavit-Hartenberg
2. Ensamblado de un manipulador de 4 grados de libertad
3. Conexión en serie de servomotores, fuente de alimentación y conexión a la PC
4. Chequeo de ID de cada servomotor
5. Chequeo de funcionamiento mediante comandos directos
6. (Opcional) Probar código de ANEXO en Python Sandbox y experimentar con él.

Anexo:

Código Python para mover todos los servos simultáneamente definiendo una posición inicial y una final:

```
initial_pos = {
1: 545,
2: 990,
3: 40,
4: 250
}

final_pos = {
1: 600,
2: 1050,
3: 60,
4: 300
}

for i in range(4):
    chain.goto(i + 1, initial_pos[i + 1], speed, blocking=False)

chain.wait_stopped()

for i in range(4):
    chain.goto(i + 1, final_pos[i + 1], speed=speed, blocking=False)

chain.wait_stopped()
```