

Trabajo Práctico - Control digital

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Laboratorio de Control Automático (86.22)

Dr. Ing. Claudio D. Pose

1 Descripción de la planta

Dependiendo cómo se arme, la planta puede responder a la dinámica del péndulo normal (estable) o a la del invertido (inestable). El mismo puede visualizarse en la Fig. 1.

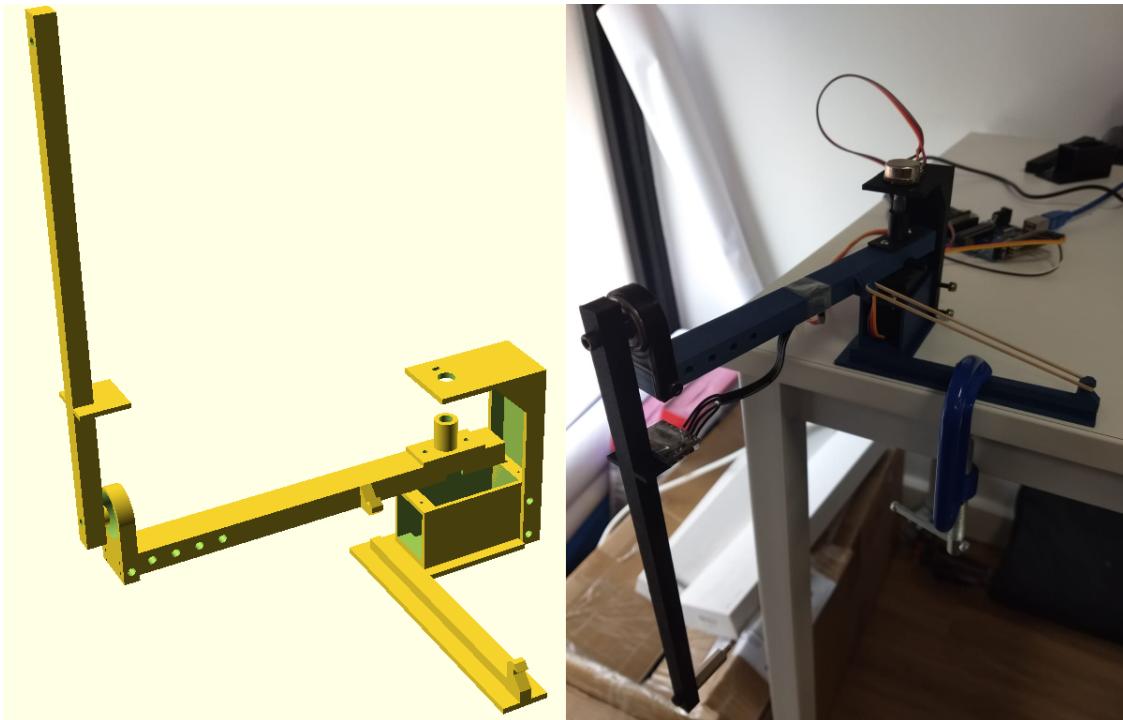


Figure 1: Pendulo normal / invertido.

La planta se basa en un modelo de péndulo, pero en lugar de ser un péndulo con eje fijo controlado por un torque, la base del péndulo es móvil. Existen dos formatos típicos para esta planta, el primero de ellos es el péndulo invertido que se mueve a lo largo de un riel de manera lineal. Si bien este sistema es sencillo de modelar, cuenta con una cierta complejidad mecánica para su armado, debido a la necesidad de conversión de un movimiento rotativo (motor) a uno lineal para el desplazamiento del péndulo. La alternativa aquí propuesta se conoce como péndulo invertido rotativo (Rotary Inverted Pendulum - RIP, o también péndulo

de Furuta). Este sistema posee una mayor complejidad en el modelado, pero es de más fácil construcción, y se puede armar con componentes económicos. A continuación, se presenta la tabla de componentes necesarios:

Cant.	Descripción
1	Arduino, preferentemente UNO R3 al ser el de mejor calidad-precio. Los modelos Nano o Mini son aceptables, pero pueden llegar a quedarse sin memoria con algunos programas complejos.
1	Servo MG996R 12Kg.
1	IMU MPU6050 en placa de desarrollo.
1	Potenciómetro 10K lineal, con perilla de 20mm de largo y 6mm de diámetro.
1	Rulemán 626zz, diámetro 19mm externo, 6mm interno, y espesor 6mm.
1	Piezas impresas 3D.
1	Fuente de 5V-3A, de las típicas de cargador de celular.
1	Tornillería varia cabeza aleman. 1 Tornillo M3 de 15mm. 1 Tornillo M3 de 20mm. 1 Tornillo M3 de 25mm. 2 tornillos M3 de 35mm. 5 tuercas M3 autofrenantes. 1 arandela M3. Tornillos para servo.
1	Banda elástica.

2 Instrucciones de armado

2.1 Mecánica

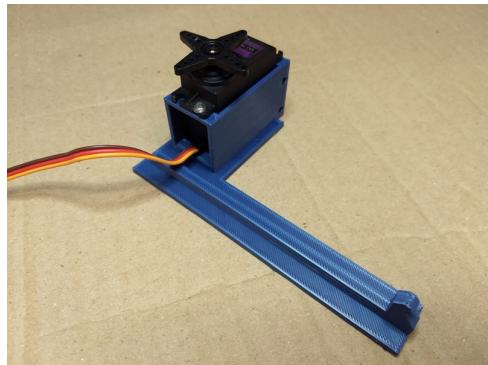
La Fig. 2 representa el proceso de armado mecánico del sistema. Se comienza colocando el servo dentro del soporte de la base con el cable hacia adelante, como se muestra en la subfigura **a**). El servo debe haberse centrado previamente, y debe colocarse el accesorio en cruz con una de las puntas apuntando lo más centrado posible hacia el lado del cable. Ajustar el servo con dos de los tornillos provistos en el mismo, sin necesidad de amortiguadores de goma u otro adicional.

Luego, se coloca el brazo por encima del servo, encastrándolo en el accesorio en cruz, y ajustando con el tornillo M3 de 15mm como se muestra en **b**).

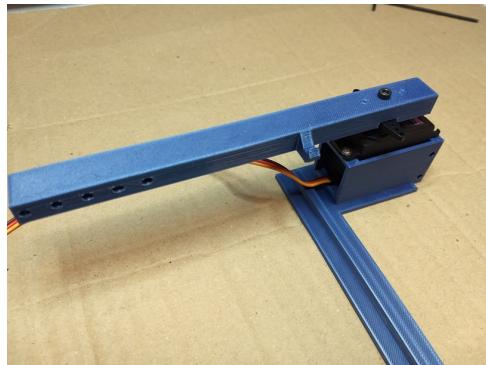
Por encima del brazo y el tornillo, se coloca el soporte de la perilla del potenciómetro, que se sujetará con los dos tornillos restantes del servomotor, mostrado en **c**).

Se montará el potenciómetro sobre el ala superior, ubicando la traba del mismo sobre el agujero correspondiente, y ajustando con su propia tuerca, como en **d**).

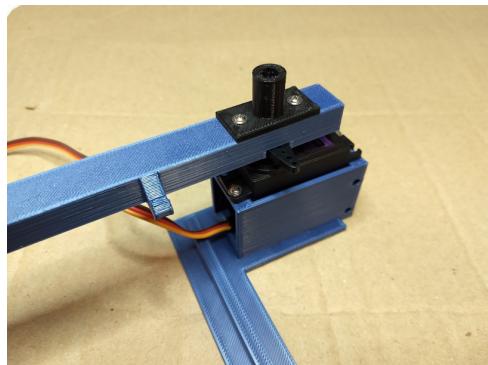
En **e**) y **f**) se muestra como montar el ala superior sobre la base del servo, desde arriba y descendiendo verticalmente, de tal manera que la perilla del potenciómetro se deslice dentro del soporte correspondiente, hasta que los agujeros de la base y del ala coincidan, y se puedan pasar por los mismos los dos tornillos M3 de 35mm de ajuste con su tuerca. Al deslizar el pote, el mismo debe estar en su punto medio, así como



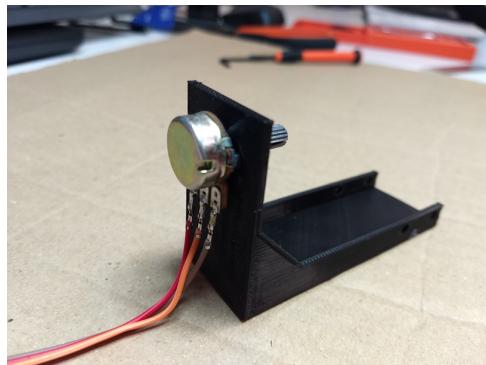
(a) Montaje del servo en la base.



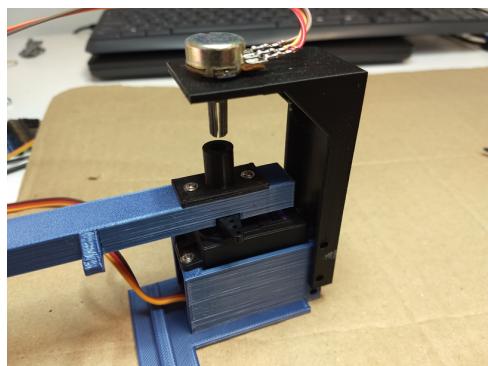
(b) Montaje del brazo en el servo.



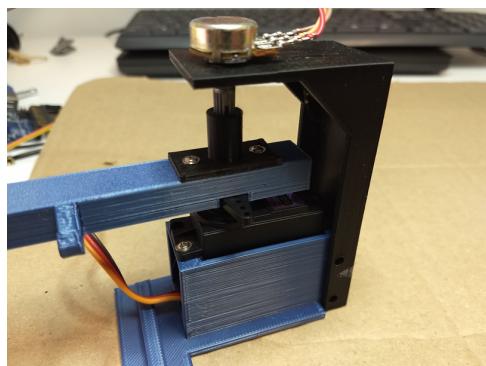
(c) Montaje de soporte de perilla pote.



(d) Montaje de pote en ala superior.



(e) Deslizar ala superior hacia abajo.



(f) Pote ajustado y tornillos coincidentes.

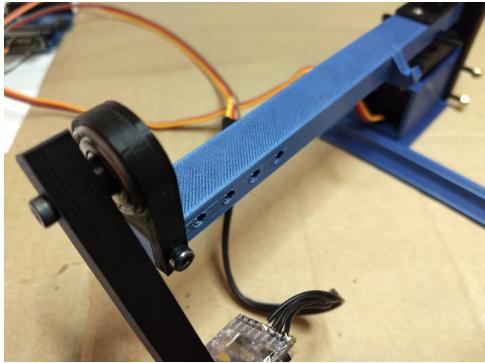


(g) Montaje ruleman en péndulo.



(h) Montaje soporte rulemán en brazo.

Figure 2: Proceso de montaje



(a) Montaje del péndulo en el brazo.



(b) Montaje de la IMU.

Figure 3: Montaje péndulo e IMU.

también el servo debería estar en su posición media, para permitir la excursión máxima del servo y el pote en cualquier dirección.

Sobre el péndulo se colocará el rulemán con el tornillo M3 de 20mm, ajustando del lado del rulemán con arandela y tuerca como puede verse en **g**). No debe hacerse fuerza excesiva, ya que puede mellarse el rulemán y trabarse.

Se montará el encapsulado del rulemán sobre el brazo, en el último agujero, con el lado del rulemán mirando en sentido opuesto al servo, y se sujetará con tornillo y tuerca M3 de 25mm, como en **h**).

En la Fig. 3 se muestran los detalles del montaje del péndulo e IMU en el brazo. El rulemán debería simplemente montarse a presión en su encapsulado, y quedar bien sujeto. La IMU debe montarse sobre el ala que sobresale del péndulo, de forma tal que los componentes quede hacia arriba. Puede utilizarse cinta doble faz, y complementar con cinta por encima para que no se mueva. Se recomienda que los 4 cables de conexión que se utilizarán para la IMU sean muy finos y siliconados, maleables, de forma tal que afecten lo menos posible a la dinámica real de la planta.

2.2 Electrónica

En la Fig. 4 puede observarse el esquemático de las conexiones del sistema para un Arduino Uno, pero son válidas para cualquier modelo.

La IMU MPU6050 sólo debe conectarse con alimentación de 5V y masa, además de los pines de comunicaciones I2C denominados SDA y SCL, los cuales suelen estar marcados en cualquier Arduino con el mismo nombre.

El potenciómetro debe conectarse en sus extremos a 5V y masa (sin importar cuál extremo a cuál), y su punto medio debe conectarse a cualquiera de las entradas analógicas del Arduino.

El servomotor debe conectarse a 5V y masa de la fuente externa, dado que requiere mucha mas corriente de la que puede proveer el Arduino. Sin embargo, debe conectarse la masa de la fuente con la masa del Arduino para que tengan los mismos niveles de referencia. La señal de control PWM del servo debe conectarse a alguna de las salidas digitales con capacidad de PWM del Arduino, que suelen estar marcadas con el carácter “~”.

3 Puesta en marcha

Para poner a funcionar el sistema, se recomienda primero probar todos los subsistemas por separado. Para ello, es útil programar algunas funciones para cada tarea. Por ejemplo:

- Programar una función que tome el valor analógico del potenciómetro, y devuelva un valor de ángulo donde está posicionado el brazo.

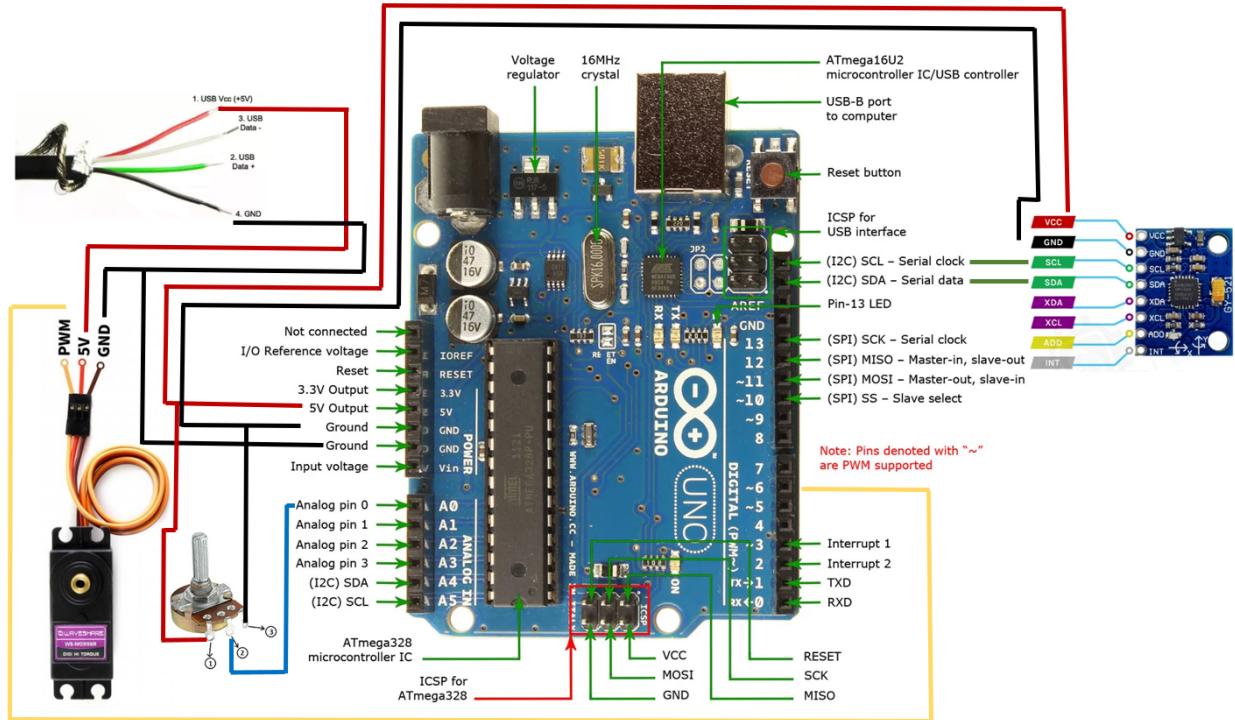


Figure 4: Cableado del péndulo

- Programar una función que reciba como parámetro un ángulo de referencia, y mueva al servomotor a dicho ángulo. Puede ser conveniente saturar las respuestas a los valores máximos y mínimos que debería tener.
- Se puede combinar el uso de ambas funciones para modelar la respuesta del servomotor ante una entrada angular.

En el caso de la IMU, es muy compleja la programación desde cero, con lo cual se pueden utilizar librerías disponibles para Arduino. Observe la orientación de la placa con el sensor, y proponga un filtro complementario para medir el ángulo de la barra. Utilice solo aquellos sensores que son útiles para el problema en cuestión.

4 Tareas

4.1 Modelado

Se considerará el sistema del péndulo normal (no invertido).

Se define la entrada del sistema como la señal de comando u al servomotor. Indique cuál es la señal de comando que utilizará para comandar el mismo (sea la real, o sea virtual a conveniencia), cuáles son los valores límites, y cuál es el concepto físico relacionado a dicho valor.

Se define la salida como el ángulo del péndulo θ , obtenido al procesar los datos obtenidos de la IMU. Indique cómo se representa dicho valor en el sistema, en qué dirección está definido, cuáles son los valores límites que considera.

Se define otra variable como el ángulo del brazo ϕ , la cual puede considerarse una variable de estado del sistema. Indique cómo se representa dicho valor en el sistema, en qué dirección está definido, cuáles son los valores límites que considera, y cuál es el concepto físico relacionado a dicho valor.

Obtener una representación en variables de estado, y una transferencia entrada-salida del sistema, linealizado en torno al punto donde el péndulo está apuntando hacia abajo, y el brazo se encuentra en el centro de

su recorrido, que se denominará el punto de equilibrio. El modelo del sistema puede obtenerse de cualquier manera conveniente. Puede utilizarse un modelo matemático donde se midan de manera directa los valores de las variables (pesos, largos, momentos de inercia). También un modelo mixto donde se identifiquen de manera práctica algunos parámetros o transferencias del sistema. Es posible también utilizar un modelado tipo caja negra. Sin embargo, deben recordarse y tenerse en cuenta las ventajas y sobre todo las desventajas de cada uno.

4.2 Limitaciones de diseño

En base a la información sobre los polos del sistema, y la forma de la planta, indique si hay alguna limitación en cuanto al diseño del controlador, considerando si el ancho de banda del lazo tiene limitaciones superiores o inferiores, y justifique. Si no existe dicha limitación, explique las ventajas y desventajas de diseñar un controlador con un ancho de banda mayor o menor, desde el punto de vista de velocidad de respuesta, esfuerzo de control, margen de fase y ganancia.

4.3 Diseño de controlador

Considerando el modelo de la planta a lazo abierto, simule la respuesta de la salida θ del sistema ante un escalón de la referencia angular del brazo, de amplitud tal que el brazo se mueva unos 30° en cualquier dirección (ángulo ϕ). Realice el mismo experimento en la planta real y compare con la respuesta simulada.

En base al modelo del sistema, diseñe en simulación un control proporcional que estabilice el sistema en torno al punto de equilibrio, y programe dicho control en el Arduino. Evite valores muy grandes ya que pueden provocar oscilaciones. Simule la respuesta del sistema a lazo cerrado a una perturbación tipo impulso, y compare contra la respuesta de la planta real al aplicar un ligero golpe al péndulo.

Modifique el control proporcional a uno proporcional / integral, comenzando con valores bajos para la constante integral. Implemente el controlador en la planta real, y déjelo un largo rato sin perturbarlo, hasta que el sistema se mueva. Explique lo que sucede, cuál es la causa, y si existe una forma de compensar ese efecto. Simule la respuesta de la acción de control u a un escalón de $\theta_r = 5^\circ$. Cuál sería el comportamiento al intentar realizar la misma experiencia en la planta? Cuál es el fenómeno físico que explica dicho comportamiento?

Diseñe en simulación un control proporcional / derivativo que estabilice la planta lo más rápido posible, sin saturar la acción de control en ningún momento. Implemente dicho controlador en la planta, y comparar la respuesta simulada del sistema a lazo cerrado ante una perturbación tipo impulso, con la respuesta real al aplicar un ligero golpe al péndulo. Si la planta real presenta muchas oscilaciones, hacer más lento el controlador. Una vez se obtenga un controlador adecuado, sacar la banda elástica y repetir la experiencia. Qué diferencias nota entre ambas situaciones, y cómo puede explicarlas?

Implementar todos los controladores en su forma bilineal.