

# Trabajo Práctico - Control digital avanzado

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.

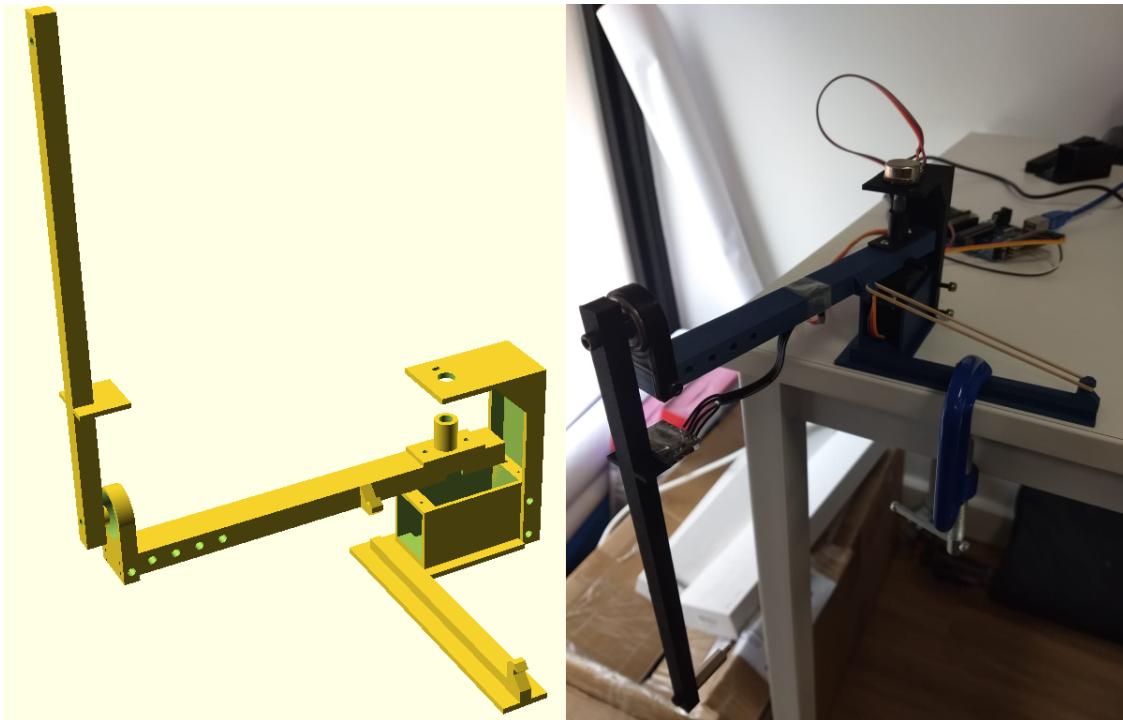


Figure 1: Pendulo normal / invertido.

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 alem. 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

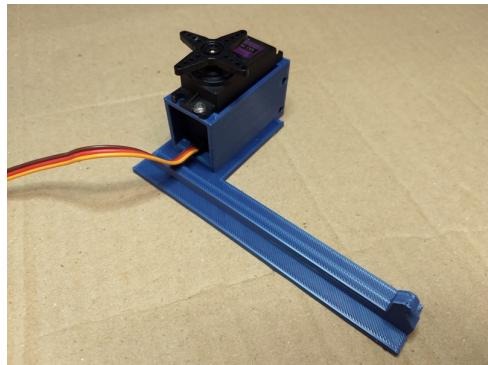
La Fig. 2 representa el proceso de armado mecánico del sistema. Se comienza colocando el servo dentro del soporte de la base con el cable hacia adelante, como se muestra en la subfigura **a**). El servo debe haberse centrado previamente, y debe colocarse el accesorio en cruz con una de las puntas apuntando 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**).

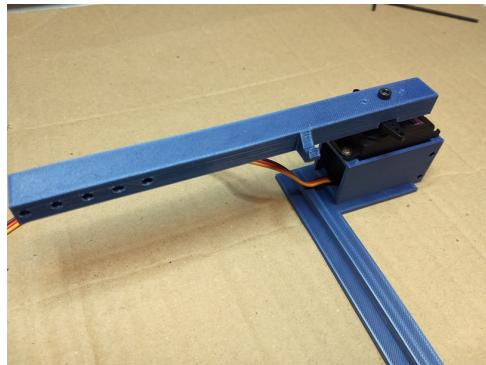
Por encima del brazo y el tornillo, se coloca el soporte de la perilla del potenciómetro, que se sujetará con los dos tornillos restantes del servomotor, mostrado en **c**).

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**).

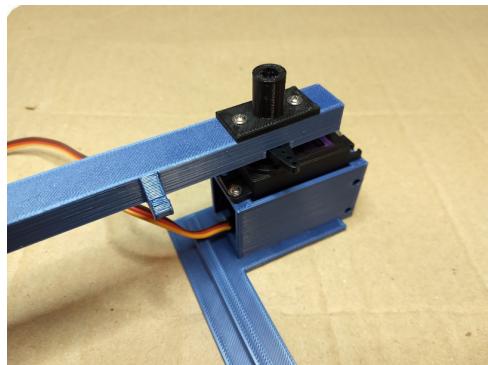
En **e**) y **f**) se muestra como montar el ala superior sobre la base del servo, desde arriba y descendiendo verticalmente, de tal manera que la perilla del potenciómetro se deslice dentro del soporte correspondiente, hasta que los agujeros de la base y del ala coincidan, y se puedan pasar por los 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



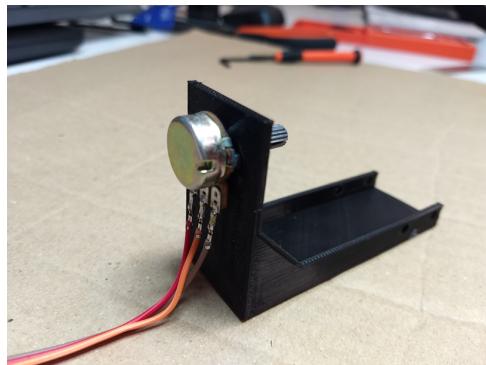
(a) Montaje del servo en la base.



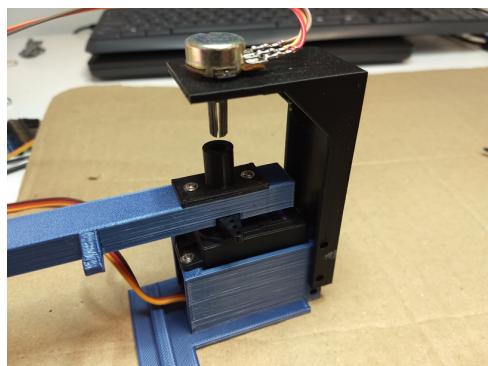
(b) Montaje del brazo en el servo.



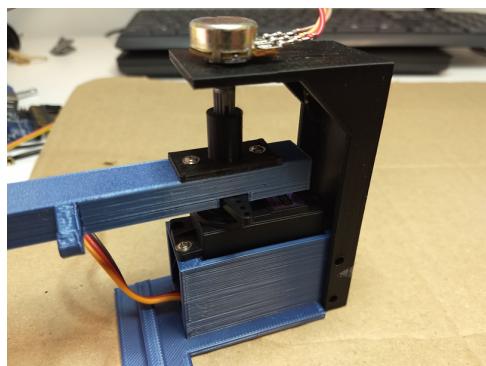
(c) Montaje de soporte de perilla pote.



(d) Montaje de pote en ala superior.



(e) Deslizar ala superior hacia abajo.



(f) Pote ajustado y tornillos coincidentes.

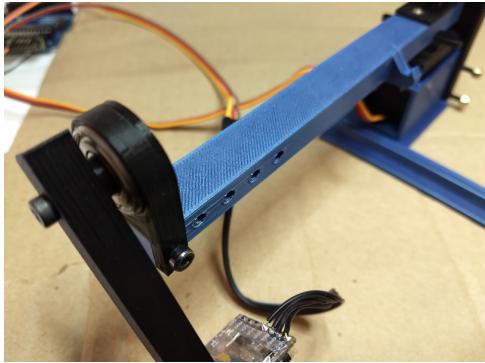


(g) Montaje ruleman en péndulo.



(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.

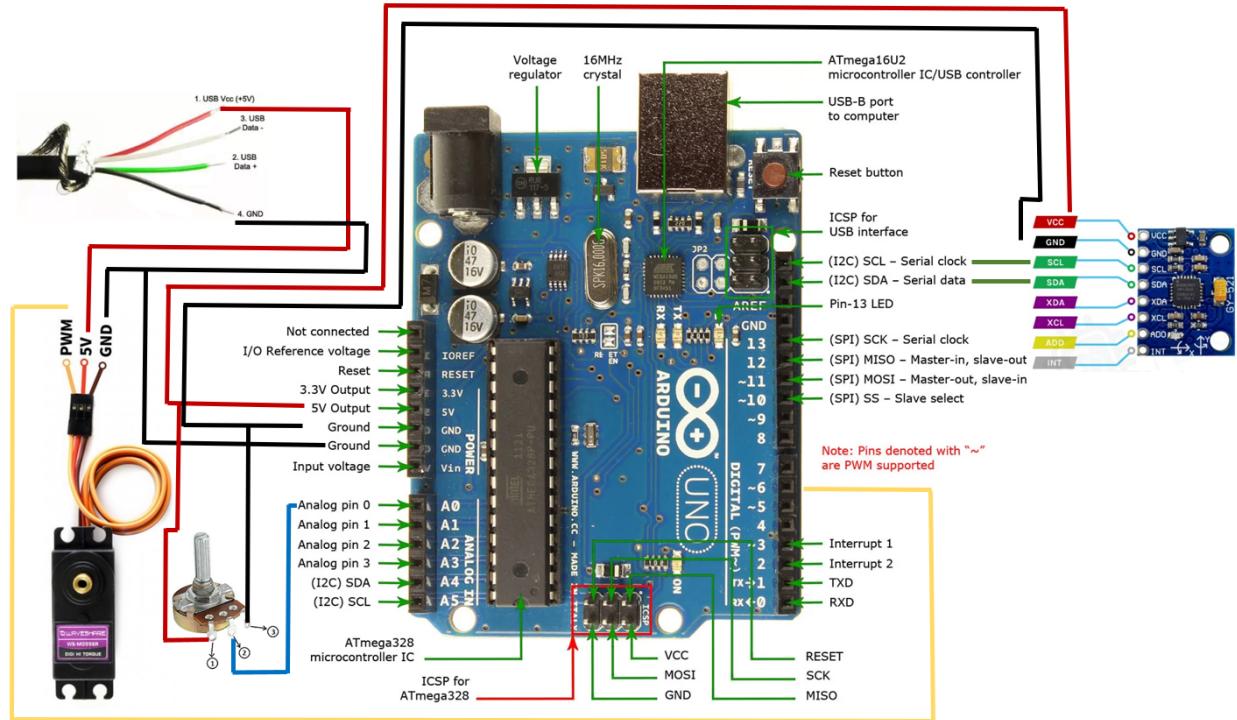


Figure 4: Cableado del péndulo

- 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 Recomendaciones

Se sugiere realizar una calibración inicial de la IMU, ya que un error en el ángulo medido dificulta enormemente el problema. Para quienes sean hábiles con la programación y/o hayan investigado a fondo la implementación del MPU6050, es posible realizar una calibración por software y configurar los registros internos con el valor de los sesgos, de forma tal que las mediciones de los acelerómetros y giróscopos sean corregidas internamente. Para aquellos que opten por una solución más sencilla, pueden simplemente poner el péndulo lo más vertical posible, y registrar qué ángulo  $\theta$  mide el sensor. Luego, puede utilizarse ese valor como la referencia de equilibrio a la cual se quiere estabilizar el sistema. Este último método no asegura repetibilidad cada vez que se encienda y apague el sistema. El mismo proceso puede repetirse para calibrar el giróscopo, dado que con todo el sistema estático, debería medir exactamente cero.

## 4.2 Modelado

Se considerará el sistema del péndulo estable.

Se define la entrada del sistema como la señal de comando  $\phi_{ref}$ , y las salidas como el ángulo del péndulo  $\theta$  y el ángulo del brazo  $\phi$ , las cuales también pueden considerarse variables de estado del sistema. Utilice exactamente las mismas convenciones que para el trabajo anterior, en cuanto a la definición de las ternas, la dirección positiva de cada uno y la definición del cero.

Definir una representación en variables de estado, linealizada en torno al punto de equilibrio 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. Se puede asumir que las variables de estado serán los ángulos y sus velocidades angulares. Si bien se puede obtener cualquier otra representación en variables de estado, se sugiere utilizar esas cuatro variables para facilitar la etapa de diseño.

## 4.3 Observador

Implementar un observador de Luenberger completo, considerando las cuatro variables de estado  $[\phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}]$ . Como medición se consideran las salidas  $y = [\phi, \theta]$ . Para probar y demostrar el correcto funcionamiento, genere una secuencia de comandos tipo escalón para  $\phi_{ref}$ , por ejemplo, una referencia de  $10^\circ$  durante unos segundos, otra referencia de  $-15^\circ$  durante unos segundos más, y así sucesivamente, para mover el sistema de diferentes maneras. Grafique, comparando, las mediciones reales de los ángulos y velocidades angulares de las que disponga, contra la estimación de los estados correspondiente. Indique por qué diseñó el observador de la manera en la que lo haya hecho, y qué consideraciones tuvo al respecto.

## 4.4 Diseño de controlador

Diseñar un controlador por realimentación de estados, que estabilice al sistema en torno al punto de equilibrio, sin la posibilidad de darle una referencia de ningún tipo. Esto implica poner a funcionar un bloque de realimentación de estados que opere correctamente, sin considerar la matriz de feedforward. Para este sistema, grafique la respuesta temporal de todas las variables de estado del sistema ante una perturbación tipo impulso al péndulo (golpee el péndulo lo más instantáneamente posible hacia un lado y hacia el otro). Compare contra la respuesta simulada, para ello, inyecte una perturbación tipo impulso que logre un apartamiento similar en el ángulo del péndulo.

Agregue al controlador la capacidad de seguimiento de referencias, para poder comandar los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  **al mismo tiempo**. Grafique la respuesta temporal de todas las variables de estado del sistema ante una secuencia de comandos tipo escalón para  $\phi_{ref}$ , con  $\theta_{ref} = 0$ . **Grafique la respuesta temporal de todas las variables de estado del sistema ante una senoidal de amplitud  $10^\circ$  y período 1 s para  $\theta_{ref}$ , para  $\phi_{ref} = 0$ .**

Reformule el control por realimentación de estados para agregar también acción integral. Logre un tiempo de establecimiento menor a 1.5 s y un sobrepico menor a 15%. Repita los últimos experimentos para este caso.

Si en cualquier momento se requiere reformular el observador de estados, hágalo, e indique por qué es necesario y bajo qué consideraciones se propone el nuevo observador.