

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Escuela de Ingeniería Eléctrica

Levitación de Bola de Ping Pong con Control PID

Benjamín Malaquías Collao Campos
Asignatura: Control Automático
Profesor: Gonzalo Farías C.

Junio 2025

Introducción

El siguiente informe describe el desarrollo de un proyecto de control automático con fines pedagógicos, que consiste en mantener una bola de ping-pong levitando a una altura constante mediante un sistema de control PID. El proyecto fue diseñado para ser simple y didáctico, permitiendo comprender el comportamiento de sistemas dinámicos en lazo cerrado, su modelado, análisis y control.

1 Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de control automático que mantenga una bola de ping pong en suspensión a una altura específica, utilizando un controlador PID.

2 Armado del proyecto

El sistema consiste en una aspiradora de mano con batería incorporada, modificada para actuar como generador de flujo de aire vertical. Esta se controla mediante un transistor IRLZ44N, activado por una señal PWM generada por un Arduino UNO. El aire asciende a través de un tubo cilíndrico de acrílico transparente, en cuyo interior se encuentra una bola de ping pong. En la parte inferior del tubo se colocó un cono de papel para centrar el flujo de aire.

El sistema mide la distancia entre la bola y el sensor ultrasónico HC-SR04, ubicado en la parte superior del tubo. Esta señal de retroalimentación se utiliza para ajustar la velocidad del motor de la aspiradora mediante el controlador PID.

Materiales principales:

- Arduino UNO
- Sensor ultrasónico HC-SR04
- Transistor MOSFET IRLZ44N
- Resistencias de $220\ \Omega$ y $10\ k\Omega$
- Diodo 1n4001
- Protoboard, cables dupont
- Aspiradora de mano con batería (motor)
- Tubo de acrílico transparente (50 mm de diámetro exterior)
- Bola de ping pong (38 mm)
- Cono de cartón piedra (difusor de flujo)
- Cinta aisladora, silicona caliente, base plástica

2.1 Conexión

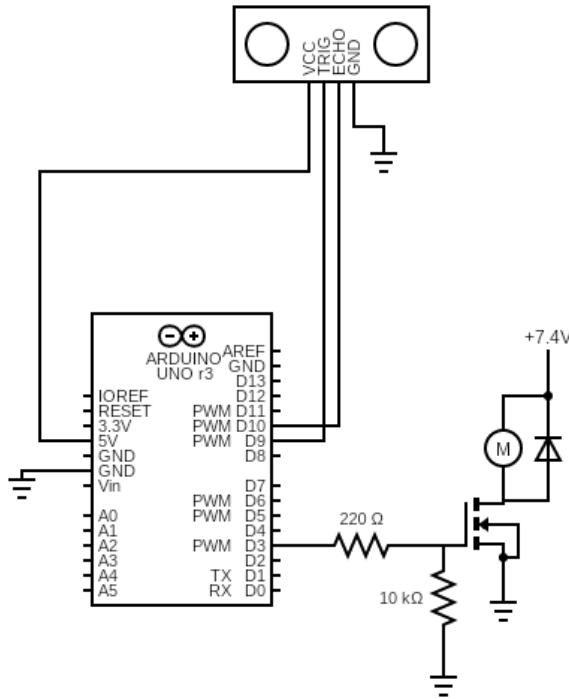


Figure 1: Circuito para el proyecto

En la Figura 1 se muestra el circuito encargado de controlar el motor de corriente continua utilizado para la levitación de la pelota. El control de velocidad del motor se realiza mediante modulación por ancho de pulso (PWM), generada por un microcontrolador Arduino Uno y aplicada al Gate del MOSFET IRLZ44N. El motor es alimentado directamente por la batería de ion-litio de 7,4V, mientras que el MOSFET permite activar o desactivar el paso de corriente hacia el motor en función de la señal PWM entregada por el Arduino.

Para garantizar el correcto funcionamiento del MOSFET, se ha incorporado una resistencia de 220 ohmios en serie entre el pin digital D3 del Arduino y el Gate del transistor, con el objetivo de limitar la corriente de entrada. Adicionalmente, se incluye una resistencia pull-down de 10 kΩ entre el Gate y tierra, que asegura que el transistor permanezca apagado cuando no exista señal de control.

El sistema también incorpora un diodo 1N4001 conectado en paralelo al motor, con polaridad inversa. Este componente cumple una función de protección frente a los picos de voltaje generados por la naturaleza inductiva del motor al apagarse, evitando posibles daños en el MOSFET.

Finalmente, el circuito incluye un sensor ultrasónico HC-SR04 conectado a los pines digitales 9 (TRIG) y 10 (ECHO) del Arduino. Este sensor mide la distancia desde el emisor hacia la esfera suspendida, lo que permite retroalimentar el sistema de control PID implementado en el software. Es fundamental que todos los componentes comparten una misma referencia de tierra (GND), para asegurar un comportamiento eléctrico estable y evitar fallos en la comunicación o activación del transistor.

3 Diseño del controlador PID

Se utilizó un controlador PID debido a su simplicidad, robustez y capacidad de corregir errores sostenidos, adaptarse a variaciones y amortiguar oscilaciones. Los parámetros fueron ajustados mediante prueba y error, observando la respuesta del sistema a perturbaciones y al arranque:

- $K_p = 6.6$
- $K_i = 1.9$
- $K_d = 1.2$

Durante las pruebas se documentaron las variaciones de comportamiento en función de los cambios en estos parámetros. El ajuste final logró una buena estabilidad sin oscilaciones graves, manteniendo el setpoint deseado.

4 Modelo de comportamiento del sistema

El sistema puede ser modelado como un lazo de control con realimentación negativa. La variable controlada es la distancia entre la bola y el sensor ultrasónico, mientras que la variable manipulada es la señal PWM enviada desde el Arduino hacia el transistor, que regula la velocidad del motor. La planta está compuesta por el motor y la pelota de ping pong suspendida por flujo de aire. Entre las posibles perturbaciones que afectan al sistema se encuentran la turbulencia del flujo de aire y el ingreso accidental de aire por aberturas no deseadas.

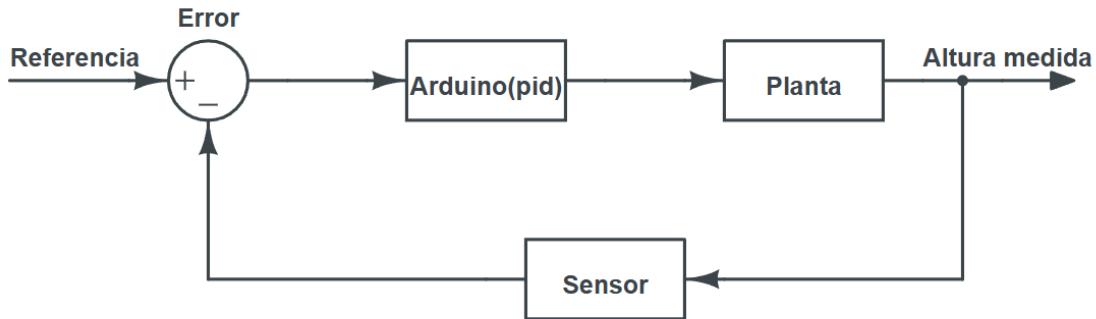


Figure 2: Diagrama de bloques

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente. La referencia establece la altura deseada de la bola, la cual se compara con la altura medida por el sensor ultrasónico. El error resultante es procesado por un controlador PID implementado en un microcontrolador Arduino, que ajusta la señal de control hacia la planta. Este sistema permite mantener la bola flotando a la altura deseada mediante una retroalimentación continua.

5 Resultados y comportamiento del sistema

El sistema logró estabilizar la bola de ping pong a una altura de aproximadamente 15 cm (setpoint) desde el sensor. El tiempo de estabilización fue de 9 a 10 segundos. Ante perturbaciones (bloqueo parcial o liberación súbita de entradas de aire), el sistema mostró una rápida capacidad de recuperación.

Se observaron oscilaciones leves debido a turbulencias en el flujo de aire y a vibraciones en la estructura del tubo. Estas fueron parcialmente mitigadas con la incorporación de un cono de papel en la base del tubo, que ayudó a centrar el flujo. Además, se utilizó silicona caliente para mantener más estable el tubo en la base. A continuación, se presentan algunas imágenes del proyecto terminado y funcionando.

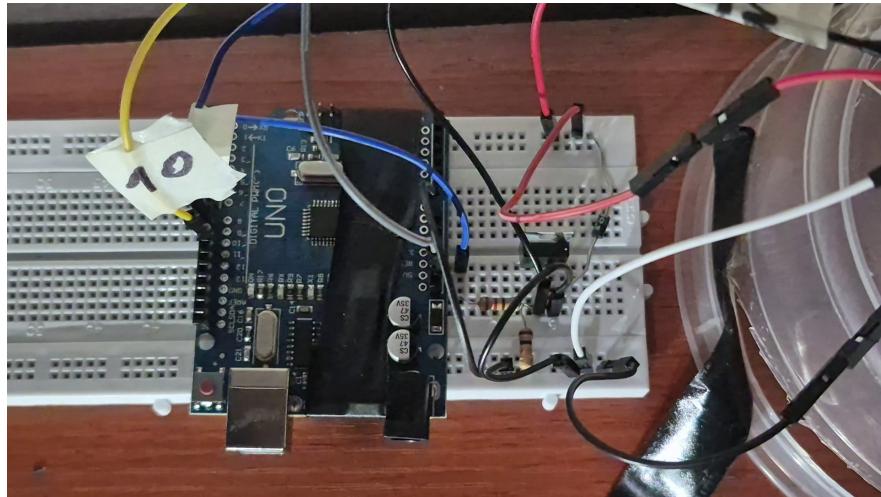


Figure 3: Circuito armado en protoboard

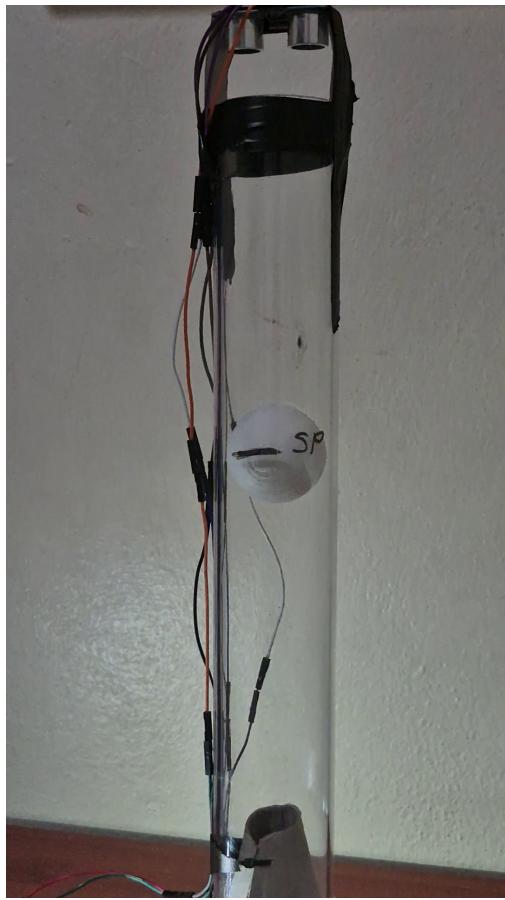


Figure 4: Pelota de ping pong en el setpoint estable

Conclusiones

El proyecto permitió implementar y comprender un sistema de control PID real aplicado a un sistema físico dinámico. Se logró cumplir el objetivo de mantener la bola levitando en una altura específica, con estabilidad y capacidad de respuesta ante perturbaciones. Se evidenció la importancia del diseño físico en el comportamiento del sistema, destacando el impacto de las turbulencias y vibraciones.

Como mejoras futuras se plantea:

- Incorporar mallas o rejillas para laminar el flujo de aire.
- Usar un sensor de distancia más preciso y menos sensible a vibraciones.
- Implementar una etapa de filtrado digital o control adaptativo para compensar errores pequeños.