

# Levitador neumático controlado por Arduino.

Christian Zorrilla Valencia

Ingeniería eléctrica industrial.

## Resumen

Desde hace años, en el Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC en Vilanova y la Geltrú, se ha buscado que los alumnos aprendan a aplicar la teoría impartida en sus asignaturas en maquetas reales. Por esta razón se ha propuesto este proyecto. El principal objetivo de este proyecto es la implementación de un controlador PID en una maqueta de un levitador neumático, así como la realización de una comparación de diferentes sensores de posición que pueden utilizarse. Otro objetivo importante es la obtención del modelo desde las ecuaciones físicas para obtener la función de transferencia del sistema. También se propondrá una posible práctica académica usando la maqueta desarrollada y dirigida a los alumnos de las asignaturas de control de sistemas. El sistema consta de un ventilador de 4 cables que ejerce de actuador, siendo controlado por PWM. Como sistema de sensado, se analizan 3 posibles sensores de distancia: un sensor ultrasonidos, un sensor infrarrojo y un sensor láser infrarrojo. El control del sistema se implementa mediante una placa Arduino Uno. Este control consistirá en un controlador PID. La planta del sistema está compuesta por un tubo de metacrilato y una bola de porexpan, que es el objeto levitado. Para determinar la consigna de una forma más intuitiva, se utiliza un sensor de ultrasonidos y, adicionalmente, un potenciómetro. Como sistema de visualizado, se utiliza una pantalla LCD y unos diodos LED que indican si la consigna ha sido alcanzada o no.

## 1. Introducción

Desde el Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la UPC en Vilanova y la Geltrú, se ha estado buscando, desde hace años, todo tipo de maquetas adecuadas para ilustrar los conceptos de teoría de control de las asignaturas que incluyen esta disciplina (Fundamentos de Automática, Regulación Automática, Ingeniería de control, ...). En este proyecto se ha decidido implementar una maqueta de un levitador neumático donde poner en práctica algunos de los conocimientos teóricos adquiridos sobre control.

## 2. Objetivos

Con el fin de demostrar los conceptos aprendidos sobre modelización y control de un sistema, se ha desarrollado un prototipo que puede utilizarse para levitar una esfera de forma controlada. El principal objetivo de este proyecto es la implementación de un controlador PID. Asimismo, también se hará un análisis comparativo de los diferentes sensores de distancia que pueden utilizarse. Por ende, se procederá a la construcción de una maqueta de un levitador neumático para desarrollar dichos objetivos. Esta maqueta podrá utilizarse juntamente con un ordenador o sin él. Debido a que este trabajo se realiza con fines educativos, otro de los objetivos buscados, es la implementación de un código simple y fácil de entender. Asimismo, se añadirán características de monitorización y determinación de las consignas, así como indicadores visuales. Otro objetivo importante es la obtención del modelo y la comparación de éste con la maqueta desarrollada.

## 3. Contextualización

Los sistemas de levitación son sistemas que pueden mantener suspendido un objeto en el aire. Estos sistemas son, a menudo, no lineales e inestables, hecho que implica que su control sea desafiante. El control de estos sistemas debe implementarse necesariamente en lazo cerrado para mantener la levitación. Actualmente, existen 5 tipos diferenciados de levitación: la magnética, la neumática, la acústica, la óptica y la electrostática. La levitación neumática se basa en el empuje del aire. Mediante un actuador (un ventilador o un compresor) se canaliza este aire a la zona donde se encuentra el objeto suspendido. El sistema utiliza necesariamente una realimentación mediante un sensor que mide la altura del objeto suspendido. Hoy en día, la aplicación más destacable de la levitación neumática es la educativa, debido a la fácil construcción de una maqueta y la accesible implementación en ella de diversos controladores. De esta manera, se puede ver de una forma práctica los diferentes controles que se pueden hacer sobre un sistema y, a su vez, compararlos para ver sus ventajas y desventajas.

### 3.1. Descripción del sistema

El sistema de control de este proyecto está compuesto de los siguientes elementos:

- *Actuador*: Ventilador de PC de 4 cables con encoder y control PWM.
- *Sensor*: Para medir la altura de la bola, la maqueta permite intercambiar entre 3 tipos de sensores distintos; un sensor ultrasonidos, un sensor infrarrojo y un sensor láser infrarrojo.
- *Control*:. El control del sistema se hace mediante una placa de Arduino Uno, en el cual se implementará un controlador PID.
- *Planta*: La planta del sistema está compuesta por un tubo de metacrilato y una bola de porexpan, la cual es el objeto levitado.
- Otros:
  - Pantalla LCD
  - Diodos LED
  - Sistema de determinación de la consigna:

### 4. Modelización de la planta

La física de un levitador neumático está basada en la segunda ley de Newton. Ésta dice que la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a su masa por la aceleración de este cuerpo. En este caso, han de considerarse dos fuerzas: la fuerza gravitatoria y la fuerza de arrastre del aire. Por otra parte, la bola levitará cuando la velocidad sea cero.

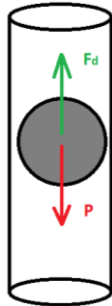


Ilustración 1: Fuerzas que actúan en un levitador neumático. Fuente: Propia.

$$\sum F = m \cdot \ddot{z} \rightarrow F_d - P = m \cdot \ddot{z} \rightarrow F_d - m \cdot g = m \cdot \ddot{z}$$

Donde  $z$  es la altura de la bola.

La fuerza de arrastre tiene esta expresión:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot A \cdot (v_{aire\ tubo} - v_{objeto})^2$$

Para velocidades pequeñas,  $c_d$  es una cantidad adimensional que depende de la geometría de contacto entre el fluido y el objeto, pudiéndose considerar constante. Juntaremos todas las constantes en una sola llamada  $\alpha$ :

$$\alpha \equiv \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot A$$

Así pues, el sistema queda de la siguiente manera:

$$\ddot{z} = \frac{\alpha}{m} \cdot (v_{aire\ tubo} - \dot{z})^2 - g$$

Cuando la bola esté en el punto de equilibrio, ésta estará en reposo en una posición  $z$ , es decir,  $\dot{z} = \ddot{z} = 0$ . Por consiguiente, aparece la velocidad del aire en el punto de equilibrio,  $v_{aire\ tubo\ eq}$ :

$$\frac{\alpha}{m} = \frac{g}{v_{aire\ tubo\ eq}^2}$$

Escribiendo la constante  $\frac{\alpha}{m}$  en función de  $g$ , la aceleración de la gravedad, y de  $v_{aire\ tubo\ eq}$ , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\ddot{z} = g \cdot \left( \left( \frac{v_{aire\ tubo} - \dot{z}}{v_{aire\ tubo\ eq}} \right)^2 - 1 \right)$$

Para linealizar esta ecuación, se utiliza la variable  $x = \frac{v_{aire\ tubo} - \dot{z}}{v_{aire\ tubo\ eq}}$ , quedando la siguiente ecuación:

$$\ddot{z} = g \cdot (x^2 - 1)$$

El punto de equilibrio es el mencionado anteriormente, es decir, cuando  $\dot{z} = \ddot{z} = 0$ . De este modo, para la ecuación anterior, será cuando  $v_{aire\ tubo} - \dot{z} = v_{aire\ tubo\ eq}$ , es decir,  $x = 1$ . Desarrollando la función  $\ddot{z}(x)$  en serie de Taylor entorno al punto de equilibrio,  $x = 1$  y hasta términos de primer orden:

$$\ddot{z}(x) \approx \ddot{z}(1) + 2g \cdot (x - 1)$$

Donde,  $\ddot{z}(1) = 0$ , quedando:

$$\ddot{z} \approx 2g \cdot \left( \frac{v_{aire\ tubo} - \dot{z}}{v_{aire\ tubo\ eq}} - 1 \right)$$

$$v_{aire\ tubo\ eq} \cdot \ddot{z} \approx 2g \cdot v_{aire\ tubo} - 2g \cdot \dot{z} - 2g v_{aire\ tubo\ eq}$$

Llamando en el espacio de Laplace,  $Z = \mathcal{L}(z - z_{eq})$  y  $V_{aire\ tubo} = \mathcal{L}(v_{aire\ tubo} - v_{aire\ tubo\ eq})$  se consigue la siguiente relación:

$$\frac{Z}{V_{aire\ tubo}} = \frac{2g/v_{aire\ tubo\ eq}}{s \cdot (s + 2g/v_{aire\ tubo\ eq})} \equiv \frac{a}{s(s + a)}$$

De esta manera, asumiendo que el modelo del ventilador (tensión / velocidad del viento) es de primer orden:

$$\frac{V_{aire\ tubo}(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

se obtiene:

$$\frac{Z}{U} = \frac{1}{s} \cdot \frac{k \cdot a}{(s + a)(\tau s + 1)}$$

Por ello, si el voltaje del motor proporciona exactamente la velocidad de equilibrio del viento,  $v_{aire\ tubo\ eq}$ , se conseguirá que la bola esté en la posición de equilibrio  $z_{eq}$ , para cualquier valor de altura, ya que cualquier valor de esta puede ser un punto de equilibrio. Que el equilibrio sea inestable significa que, si se aumenta ligeramente el voltaje del motor, la velocidad del viento también aumentará y, por lo tanto, la bola subirá hasta el final del tubo. En cambio, si se aplica una acción contraria a la anterior, disminuyendo el voltaje, la velocidad del viento disminuirá y la bola bajará hasta el principio del tubo. Esto

ocurrirá independientemente del valor inicial de la altura. Debido a la dificultad de encontrar experimentalmente los valores de los parámetros  $k$ ,  $a$  y  $\tau$  en lazo abierto, se propone hacerlo en lazo cerrado, tomando una  $z_0 = 50\text{cm}$  y cerrando el lazo con un controlador proporcional con  $k_p = 1$ , es decir,  $u = ref - z$ . La función de transferencia en lazo cerrado es de tercer orden:

$$\frac{Z}{R} = \frac{A}{s^3 + C \cdot s^2 + B \cdot s + A}$$

Usando las herramientas de identificación de sistemas de MATLAB se encuentra que la función de transferencia es:

$$tf = \frac{6.66}{s^3 + 3.177 \cdot s^2 + 5.862 \cdot s + 11.27}$$

La función de transferencia teórica y la real discrepan, ya que la real debería tener un numerador idéntico al término independiente del denominador. Aun considerando que dicha diferencia puede ser despreciable, el sistema no cumple con el modelo teórico, ya que este incluye un término integrador,  $\frac{1}{s}$ , el cual hace que el sistema ante una entrada escalón tenga un error nulo en el estado estacionario. Sin embargo, el sistema nunca alcanza un error nulo, sino todo lo contrario, estabilizándose con un error de casi 20cm. Esto es debido a que la velocidad del aire no es independiente de la altura. Así pues, se debe encontrar una relación entre la velocidad del aire y la altura.

## 5. Descripción de la maqueta



Ilustración 2: Maqueta utilizada. Fuente: Propia.



Ilustración 3: Ventilador maqueta. Fuente: Propia.

La estructura del sistema cuenta con los siguientes componentes:

- 4 patas circulares (1) como soporte de la estructura, teniendo un diámetro de 2.5cm y 9.5cm de altura.
- Una tabla de madera (2) con dimensiones 30x1x30cm, que tiene un agujero en centro con diámetro de 7cm de diámetro. Esta tabla sirve para fijar el actuador (7) y como base para el tubo y el controlador.
- 4 patas circulares (3), de 2.5cm de diámetro y 12.5cm de altura para sujetar una estructura cuadrada de plástico,
- Una tabla de plástico transparente (4) de 25x1x25cm que sirve como sujeción del tubo.
- 1 tubo de metacrilato (5) con un diámetro de 9cm y 100cm de altura, por el que se moverá la bola.
- 1 bola de porexpan (6) de 7cm de diámetro.

Aparte de estos elementos, se han diseñado 3 soportes, Ilustración 4, mediante el software TINKERCAD, en una impresora 3D para la parte superior del tubo. De esta manera, se sujeta el sensor de ultrasonidos (1), el sensor láser infrarrojo (2) y el sensor infrarrojo (3) de manera precisa. También, se ha diseñado una base para el tubo (4), mejorando su sujeción y su estabilidad, ya que, sin el soporte, el tubo se tuerce. Estos soportes se han diseñado para que encajen con él, teniendo un diámetro exterior de 9.2cm. Dejan 2mm de margen para errores de calibrado de la impresora 3D.



Ilustración 4: Soportes sensores y tubo. Fuente: Propia.

## 5.1 Actuador

El actuador, es el encargado de suministrar a la planta la señal que proviene del controlador. Este tipo de dispositivo, dependiendo de la aplicación, suele llevar drivers que amplifican su actuación o que la regulan. Se ha decidido utilizar como actuador un ventilador de 4 hilos que necesitará una fuente de alimentación de 12 V. Esto es debido a que se requiere controlar la velocidad de giro del ventilador para hacer levitar más o menos altura el objeto, siendo más efectivo utilizar el PWM que ya tiene incorporado el ventilador a implementar uno de forma externa.

## 5.2 Sensores de distancia

La maqueta de este levitador neumático está preparada para analizar el funcionamiento de tres tipos sensores de distancia diferentes; un ultrasonido, un láser infrarrojo (ambos digitales) y un sensor analógico de infrarrojos. Un sensor es un elemento que registra una magnitud y envía dicha información a un sistema a través de una señal. Dicha magnitud, en este proyecto es la distancia.

### 5.2.1. Sensor ultrasonidos

El sensor de ultrasonidos utilizado para este proyecto es el sensor HC-SR04, un sensor digital. Este tipo de sensor se basa en un emisor que envía una señal, en este caso, un pulso de alta frecuencia no audible por el ser humano y un receptor, un micrófono que se encarga de medir el pulso rebotado por los objetos cercanos. Mediante las siguientes ecuaciones se obtiene la distancia:

$$\begin{aligned} C &= 343 \text{ m/s} \cdot 100 \text{ cm/m} \cdot \frac{1}{1000000} \text{ s}/\mu\text{s} \\ &= \frac{1}{29.2} \text{ cm}/\mu\text{s} \quad [1] \\ \text{Distancia} &= \frac{1}{2} \cdot \text{Tiempo} \cdot C \text{ [cm]} \quad [2] \end{aligned}$$

### 5.2.2. Sensor láser infrarrojo

El sensor láser infrarrojo digital seleccionado es el VL53L0XV2. Su funcionamiento consiste en el envío de un pulso láser de luz infrarroja, y medir el tiempo necesario del haz en volver al sensor. La luz que se envía es una onda electromagnética, la cual se propaga a la velocidad de la luz. Este sensor incorpora un emisor láser 940nm VCSEL, un detector de matriz SPAD que utiliza su electrónica interna (FlightSense™) para realizar los cálculos de distancia necesarios.

### 5.2.3. Sensor infrarrojo

A diferencia de los dos sensores anteriores, el sensor infrarrojo seleccionado, el SHARP GP2Y0A21, es un sensor analógico. Este hecho implica que, la salida del sensor es una señal comprendida en un intervalo de valores

instantáneos. Éstos, varían según los efectos que se están midiendo, en este caso distancia. La salida del sensor no es lineal, sino que crece linealmente hasta un valor de distancia para luego decrecer exponencialmente. Su rango de distancia está comprendido desde los 10cm hasta los 80cm, donde la salida, según el rango en el que se encuentre el objeto, emitirá una señal de 0.3V y 3.1V.

## 5.3. Control

La parte del control se desarrolla en una placa Arduino UNO. La placa incorpora un microcontrolador ATmega328P a 16MHz, lo que implica que puede hacer 16 millones de operaciones por segundo. Esta placa consta de 14 pines digitales que se pueden utilizar tanto de entrada como de salida, 6 de los cuales los pines (3, 5, 6, 9, 10 y 11) tienen PWM con el que controlar la actuación del ventilador. El PWM tiene una frecuencia aproximada a los 500Hz, y el valor del ciclo útil se puede escalar entre 0 y 255. También, incorpora 6 pines analógicos con los que se puede obtener los valores del sensor infrarrojo. De estos pines analógicos, el A4 y A5, son los encargados de la comunicación I2C, la cual emplea el sensor láser infrarrojo para transmitir los valores de distancia obtenidos. En el apartado de memoria, esta placa cuenta con el suficiente espacio de memoria para implementar el código del levitador.

## 5.4. Otros elementos

### 5.4.1. Diodos LED

Se utilizan dos diodos leds, uno verde y uno rojo, para indicar de forma visual si la bola ha alcanzado o no la consigna. El funcionamiento de este elemento es muy sencillo, ya que simplemente se ha de conectar el ánodo (patilla larga) al positivo y el cátodo (patilla corta) al negativo. De esta manera, la corriente circulará por el semiconductor y el LED emitirá luz. Si se conecta en sentido inverso, la corriente no pasará y el LED no emite luz. Como la tensión de la placa es de 5V y se recomienda que los LEDs trabajen a 2V, se conecta una resistencia de 220Ω entre el cátodo y masa.

### 5.4.2. Pantalla LCD

A parte de los LEDs se ha añadido una pantalla LCD para indicar el valor de consigna y la altura actual de la bola. Esta pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*) funciona cambiando las propiedades eléctricas del líquido contenido entre unos cristales polarizados, dejando pasar solamente ciertos tipos de luz. Para ahorrar tiempo en hacer conexiones y, sobre todo espacio, se añade un adaptador HW-061, con el que se reducen los pines de 16 a 4.

### 5.4.3. Sistema de determinación de la consigna

Para que el sistema sea más interactivo se ha diseñado un sistema que permita introducir la consigna de diferentes modos:

- Mediante un sensor de ultrasonidos.
- Mediante un potenciómetro.

Mediante un sensor de ultrasonidos se reasigna la consigna, haciendo más visual y fácil de determinar la consigna marcada. Para ello se coloca el sensor paralelo al tubo y se delimita el valor de medición hasta el límite del tubo, así cuando no detecte nada en ese rango, no modificará la referencia almacenada. Como el procesador de Arduino no tiene la capacidad para trabajar con señales de entrada analógicas, necesita de conversores analógicos, los cuales convierten las señales analógicas en señales digitales. Esto se hace mediante un software de mapeo. Los valores van de 0 a 5V, donde 0V equivale a B0000000000, siendo el valor de este 0, y 5V es expresado como B1111111111, el cual equivale a 1023. El potenciómetro elegido, es de variación lineal. Esto significa que su resistencia interna varía proporcionalmente al ángulo de giro. Siendo el rango de 0 a 5V, Arduino podrá detectar cambios de voltaje de 0.004V (5/1024), yendo de 0 a 1023.

## 6. Software

El flujograma mostrado en la Ilustración 5, es el mismo para todos los sensores. Este se basa en la inicialización de los componentes a utilizar. Después se definen los pines de entrada y salida, para, posteriormente, inicializar el puerto serie. A continuación, comienza el bucle del código. Este se basa en correr la variable *timer*. Cada vez que ese *timer* llega a ser igual que el valor del periodo de muestreo, se ejecuta la función Control, donde se lleva a cabo la medición de la altura de la bola y su control. Seguidamente, se entra en la función Monitorización donde se muestra por la pantalla LCD y por el puerto serie la referencia y la altura de la bola. Para acabar esta función, se entra en la función ControlLeds, la cual se encarga de encender o apagarlos leds según si se ha alcanzado o no la consigna.

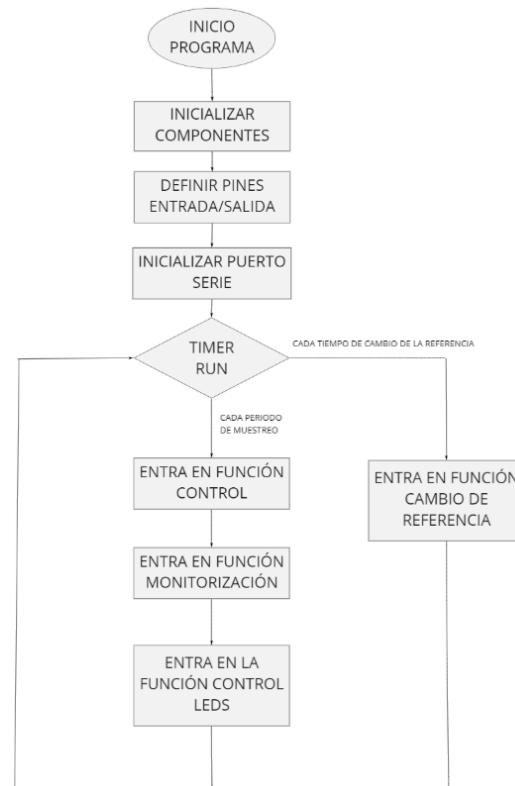


Ilustración 5: Flujograma código sistema.  
Fuente: Propia.

## 7. Comparativa de los sensores

Para el análisis y su posterior comparación, se han tenido 3 aspectos en cuenta; rango del sensor, tiempo de muestreo y error.

### 7.1. Rango

El sensor ultrasonidos, mide que la bola está a 87.35cm cuando está abajo del tubo, mientras que cuando está arriba, a 2cm de él, se obtienen valores aproximados a esta medida. En cambio, el sensor láser infrarrojo, tiene un rango más amplio, que va desde los 4cm a los 97cm, teniendo un rango aproximado al del fabricante. Finalmente, el sensor infrarrojo analógico ha resultado ser un fiasco. Con este sensor no se ha podido hacer ninguna toma de medida ni de control del sistema. Esto es debido a que detecta varias cosas en su entorno y le es imposible distinguir entre un reflejo del tubo, la bola o cualquier otro objeto que haya cerca, imposibilitando su control.

### 7.2. Periodo de muestreo

Para este análisis no se ha tenido en cuenta la comunicación de la pantalla I2C. Esto es debido a que este tipo de comunicación ralentiza el tiempo de ejecución de la función *Control()*, haciendo que pase de unos 10ms a 60ms. Pese a que el sistema utiliza unos 7ms para ejecutar la función de *Control()*, hay que tener en cuenta otros aspectos y tiempos en los que Arduino realiza

otras tareas. El sensor de ultrasonidos se adapta muy bien a cualquier periodo de muestreo que no baje de los 20ms. A partir de ese tiempo hacia cualquiera más bajo, el sistema se vuelve inestable y no se puede controlar. Si el periodo de muestreo es de 15ms, el sistema puede llegar a controlarse, pero de una manera poco eficiente, tardando en arrancar y con muchas oscilaciones. En cambio, el sistema con el sensor láser infrarrojo debe tener un periodo de muestreo de superior a los 90 ms como mínimo, si no el sistema se controla de una manera imprecisa.

### 7.3. Error

Para el sensor de ultrasonidos se ha obtenido un error mínimo de 1.76 cm, tardando aproximadamente 4s en alcanzar la consigna. Mientras, para el sensor láser infrarrojo, alcanza la consigna en menos tiempo que el sensor de ultrasonidos, tardando cerca de 400ms menos, y alcanzando la referencia de una manera más precisa.

### 8. Sintonización de los parámetros

Se han ajustado los valores de las ganancias del PID, viéndose cómo afectan al sistema, consiguiendo un control estable sobre el levitador. Los mejores valores obtenidos con los dos sensores que han funcionado bien son:

	Sensor ultrasonidos	Sensor Láser Infrarrojo
$k_p$	5	2
$k_i$	1	1
$k_d$	2	2

Tabla 1: Valores ganancias. Fuente: Propia.

### 9. Práctica de control con la maqueta

Como parte del proyecto también se ha propuesto una posible práctica académica para alumnos de asignaturas de control. Mediante esta práctica, los alumnos podrán implementar los conocimientos adquiridos en clase. Esta práctica está diseñada para que, antes de su realización, los alumnos se lean la parte previa, aunque en la clase práctica se hará un repaso de ello. Está diseñada para poder implementarse en una clase de 2h:

- 30 minutos para repasar los conceptos teóricos.
- 30 minutos para realizar las conexiones.
- 30 minutos para aplicar el código de Arduino.
- 30 minutos para realizar las cuestiones.

### 10. Presupuesto

El presupuesto de esta maqueta es el siguiente:

Componente	Precio por unidad (€)	Unidades	Precio total (€)
Pata para la base	3,5	8	28
Tabla de madera	5	1	5
Tabla de plástico	10	1	10
Tubo	50	1	50
Arduino UNO	20	1	20
Sensor ultrasonidos	1,8	2	3,6
Sensor láser infrarrojo	7	1	7
Sensor infrarrojo	9,5	1	9,5
Potenciómetro	1	1	1
Pantalla LCD + Controlador I2C	7	1	7
Ventilador	7	1	7
Otros elementos	-	-	10
Total			158,1

Tabla 2: Presupuesto. Fuente: Propia.

### 11. Conclusiones

Al final se ha conseguido que con el controlador PID pueda mantener la bola levitando con un error casi nulo y en un tiempo razonable. Durante el trabajo, se ha podido observar cómo afectaba cada acción de control (proporcional, integral y derivativa) al sistema. Por un lado, se ha conseguido que, mediante dos sensores de distancia diferentes, se pueda controlar el sistema. Lamentablemente, mediante el sensor analógico no se ha podido. De la comparativa de los sensores, se ha concluido que, pese a que el sensor láser tiene una medición más precisa, el sensor de ultrasonidos es el más adecuado para la maqueta. Esto es debido a que sus resultados han sido prácticamente iguales, pero el sensor de ultrasonidos es capaz de trabajar con un periodo de muestreo mucho más bajo que el sensor láser, pudiendo ser este, en el primer caso, de 20ms. Este hecho hace que el sistema pueda ser mejor controlado ya que se están obteniendo más datos del sistema por segundo. También se han implementado de manera correcta, dos formas diferentes de cambiar la referencia del sistema en tiempo real. Una de ellas se basa en la medición obtenida por un segundo sensor de ultrasonidos y la otra por un potenciómetro. Esto hace que, de cara a una práctica, se vea de manera intuitiva la nueva referencia a alcanzar. Asimismo, se ha implementado un sistema de visualización de las variables del sistema. Por otra parte, mediante unos diodos LED, se puede observar a simple vista si la consigna ha sido alcanzada o no. Con la pantalla LCD pasa exactamente lo mismo, ya que se muestra por ella la referencia actual y la posición de la bola. Todo esto se ha conseguido mediante una maqueta que no supera los 160€. Por otro lado, cabe destacar que la modelización del sistema no ha sido completa, ya que la función de transferencia obtenida no concuerda exactamente con la teorizada. Esto es debido a que la velocidad del aire no es independiente de la altura, como se supone en la obtención del modelo. Una mejora del modelo teniendo en cuenta esto, puede hacer que se obtenga una función de transferencia correcta. La mejora podría partir de la fórmula [2] que permite medir la velocidad del aire en un punto determinado a una distancia concreta de la boca de insuflación. De esta manera, se relaciona la altura con la velocidad del aire en el tubo:

$$v_{\text{aire tubo}} = \frac{C \cdot v_{\text{aire boca insuflación}} \cdot \sqrt{S}}{z} \quad [2]$$

donde  $v_{\text{aire tubo}}$  es la velocidad del aire en el tubo,  $C$  una constante que está establecida en una tabla,  $v_{\text{aire boca insuflación}}$  la velocidad del aire de la boca de insuflación,  $S$  la superficie libre de la boca de insuflación y  $z$  la altura de la bola.

## 12. Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutor del proyecto, Francisco Javier Ruiz Vegas, toda la ayuda aportada a lo largo de este proyecto.

## 13. Referencias

- Bas, P. S. (2018). Diseño y construcción de un levitador magnético. *Repositorio Comillas*, 10-30.
- Buenache Vega, A. J. (2010). Teoría, diseño y simulación de componentes y circuitos para la docencia interactiva vía web. *UC3M*, 1-50.
- Chacon, J., Saenz, J., Torre, L. d., Diaz, J. M., & Esquembre, F. (2017). Design of a Low-Cost Air Levitation System for Teaching Control Engineering. *MDPI*, 1-18.
- Cholodowicz, E. (2017). Low-cost air levitation laboratory stand using MATLAB/Simulink and Arduino. *UIBrepositori*, 1-7.
- Jara Ortiz, C., & Maldonado Achig, J. (2015). Diseño e implementación de un controlador PID y MPS aplicado al posicionamiento lineal de un sistema neumático en bucle cerrado. *Dspace UPS*, 126.
- Martinez Quintero, J., & Andrade Ramirez, J. (2013). Implementación de controladores en sistemas retroalimentados usando electrónica embebida y simulación hardware in the loop. *Repositorio UTP*, 15-50.
- Milena Moreno, J. C. (2010). Control Lineal y No Lineal de un Levitador Magnético. *UPCommons*, 10-40.
- Ortega, M., & Rubio, F. (2005). Position control of a pneumatic levitation system. *Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 1-7.
- Valencia Murillo, R. A. (2017). Sistema de levitación ultrasónica para análisis espectroscópico de muestras líquidas. *CIO Repositorio*, 1-39.