



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

## GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

### TRABAJO FIN DE GRADO CONTROL DE UN LEVITADOR MAGNÉTICO

Autor: Patricia García de Castro Iribas  
Director: Juan Luis Zamora Macho

Madrid  
Julio de 2019



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

..... CONTROL DE UN LEVITADOR MAGNÉTICO .....

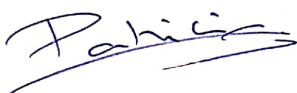
.....  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico ..... 4º ..... es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada

de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 16 / 07 / 2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: 16 / 7 / 2019



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### **1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor D. PATRICIA GARCÍA DE CASTRO IRIBAS

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: CONTROL DE UN LEVITADOR MAGNÉTICO, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### **2ª. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### **3ª. Condiciones de la cesión y acceso**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### **4ª. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### **5ª. Deberes del autor.**

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.



- #### **6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

**ACCEPTA**

Fdo. ....

1. The first step in the process of identifying a problem is to define the problem. This involves identifying the symptoms of the problem and determining the scope of the problem. Once the problem has been defined, the next step is to identify the causes of the problem. This involves identifying the factors that are contributing to the problem and determining the relationships between these factors. Once the causes of the problem have been identified, the next step is to develop a plan of action. This involves identifying the steps that need to be taken to solve the problem and determining the resources that will be needed to implement the plan. Once a plan of action has been developed, the next step is to implement the plan. This involves carrying out the steps that have been identified in the plan and monitoring the progress of the implementation. Finally, the last step in the process is to evaluate the results of the implementation. This involves determining whether the problem has been solved and whether the resources have been used effectively.



# CONTROL DE UN LEVITADOR MAGNÉTICO

Autor: Patricia García de Castro Iribas

Directores: Juan Luis Zamora Macho

Aurelio García Cerrada

Entidad colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia de Comillas

## 1. INTRODUCCIÓN

La levitación magnética es una disciplina que abarca numerosos campos de la ingeniería. El método aplicado en este trabajo consiste en mantener levitando un objeto imantado mediante la fuerza ejercida por un electroimán.

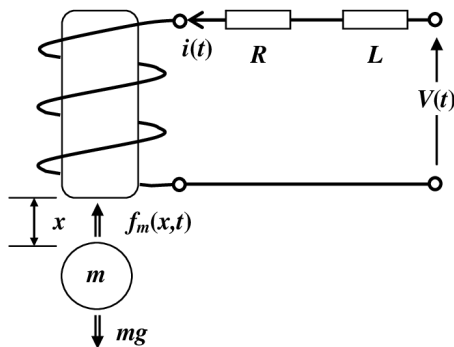


Figura 1: Esquema básico del levitador

La levitación magnética es, hoy en día, conocida sobre todo por los trenes Maglev o el Hyperloop One, de Space X [1]. Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza un campo magnético para suspenderse por encima del carril (algunos de estos trenes van a 1 cm por encima de la vía y otros pueden levitar hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía [2]. Existen otras aplicaciones como, por ejemplo, la separación de plásticos en la basura vía levitación magnética [3].

En este proyecto se pretende diseñar un control en realimentación de estados que mantenga la altura del objeto,

además de la corriente por la bobina. Este sistema se implantará en el entorno MatLab/Simulink.

Los principales objetivos de este proyecto son:

1. Mejora del diseño del equipo respecto de proyectos anteriores: estructura, sensor, actuador y fuente de alimentación.
2. Actualización del simulador y diseño del sistema de control.
3. Implantación del control, incluyendo el actuador de estado (EKF) y el control lógico.

## 2. METODOLOGÍA

El orden que se ha seguido para la realización del trabajo es el siguiente: modelado de la planta, diseño del control e implantación del control (previa simulación).

En cuanto al modelado de la planta, hay que tener en consideración los estados que se van a utilizar para el diseño del control; estos son: corriente, posición y velocidad. La entrada es la tensión que se aplica a la bobina. Al tener 3 estados

necesitamos 3 ecuaciones diferenciales para el diseño de la planta: una que corresponda a la ecuación eléctrica (2.1), la derivada temporal de la posición, que corresponde a la velocidad (2.2) y por último, una al equilibrio de fuerzas en el electroimán (2.3) [4].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - R \cdot i_L). \quad (2.1)$$

$$\frac{dz}{dt} = V_z \quad (2.2)$$

$$\Sigma F = K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} - m \cdot g = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2.3)$$

Finalmente, se decide utilizar un control en cascada. Esto nos permite obtener un doble control, en este caso, un control proporcional de corriente y un PID de posición. Además, reduce el ruido que haya en el lazo interno del control. El lazo interior del control será el de corriente, cuya salida constituirá el mando del control de posición.

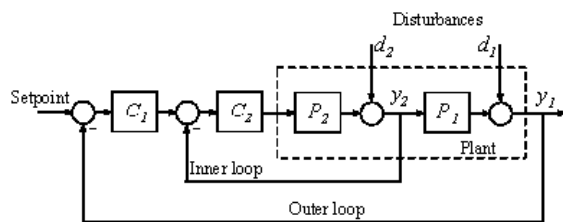


Figura 2: Esquema de un control en cascada

Debido a esto, es necesario adaptar las ganancias del control por realimentación de estados que había anteriormente, a los nuevos parámetros para el control en cascada.

El micro utilizado es una Raspberry pi modelo 3 b+, con la ventaja de la velocidad de cálculo y gran potencia que posee. El bloque de hardware del esquema de Simulink (ver Figura 3)

Cabe destacar que, al no poder medir todos los estados mediante sensores, se hace necesario el uso de un estimador para hallarlos fácilmente. En este caso, se utiliza un Filtro Extendido de Kalman (EKF), para estimar la velocidad (no se puede medir) y el resto de las variables, para filtrar el ruido [5].

### 3. IMPLANTACIÓN DEL CONTROL

Una vez diseñados la planta y el control, toca implantarlo en el hardware. Para ello, utilizamos la herramienta de MatLab/Simulink con el siguiente esquema básico:

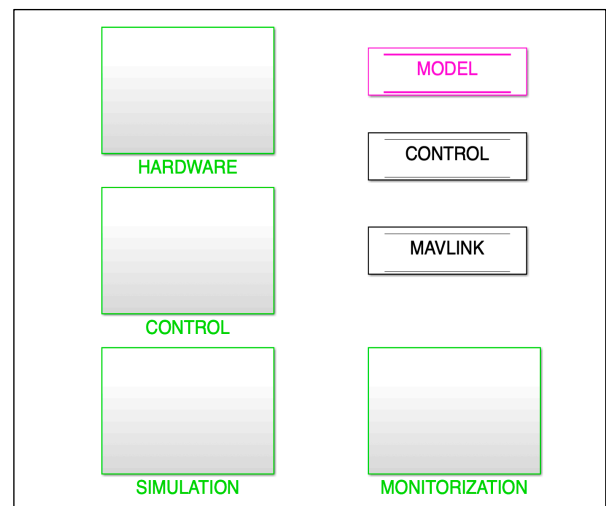


Figura 3: Estructura Simulink

Este bloque nos permite tanto hacer simulaciones sin hardware como implantar directamente nuestro control en el microprocesador, monitorizándolo en tiempo real.

contiene la programación de los sensores (posición y corriente) y del actuador (generador de PWM). Antes de la implantación en el propio levitador, se procede a simular mediante el bloque de simulación.

El resultado de las simulaciones tras un escalón en posición de 1 cm se ha dibujado en la Figura 4.

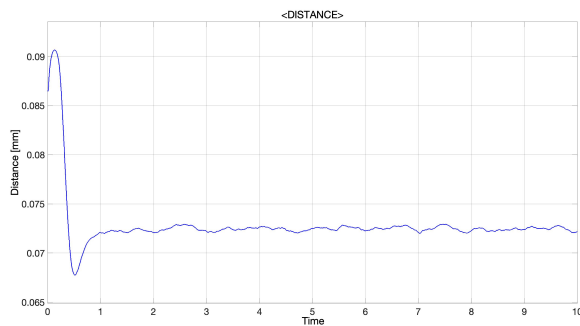


Figura 4: Respuesta a escalón en posición en simulación

#### 4. RESULTADOS

Los puntos que resumen los resultados del proyecto son:

- Se ha conseguido mejorar el diseño del hardware de proyectos anteriores: la medición de la corriente con la sonda efecto Hall, la nueva fuente de 24V, más moderna y robusta que anteriores y quizá el nuevo modelo de microprocesador.

- Se ha logrado diseñar un control estable en simulación, aunque quizá muy ruidoso y brusco para el funcionamiento del levitador.
- Una correcta implantación del control, pudiendo observar en tiempo real las mediciones de todos los sensores, con sus correctas estimaciones por parte del EKF.

A pesar de haber cumplido la mayoría de los objetivos propuestos, cabe destacar que no se logró mantener la posición del imán a una distancia constante de la bobina, seguramente debido a la obtención de un modelo sensiblemente más sencillo y aproximado de lo que es en realidad el sistema del levitador.

#### 5. CONCLUSIONES

Para concluir el proyecto, cabe destacar la aportación de un nuevo control, en realimentación de estados adaptado a un control en cascada, con un hardware moderno y robusto capaz de hacer levitar el imán. Quizá podría servir para docencia para futuras generaciones.

Para futuros proyectos, debería estudiarse el modelo con más detalle. Además, cabe la posibilidad de utilizar otro tipo de imán, quizá más pequeño o de otro material, pues la carga utilizada en este proyecto tiene un imán demasiado potente, y no trabajaba muy bien con la bobina de la que se dispone.

## 6. REFERENCIAS

- [1] SpaceX, "Hyperloop Alpha," 2013. [Online]. Available: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf). [Accessed Febrero 2019].
  
- [2] G. Perren, "Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética," Universidad Nacional del Rosario, 2003. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/view/12710988/estudio-de-las-aplicaciones-practicas-de-la-levitacion-magnetica->. [Accessed Julio 2019].
  
- [3] P. Zhao, J. Xie, F. Gu, N. Sharmin, P. Hall and J. Fu, "Separation of mixed waste plastics via magnetic levitation," Waste Management, Elsevier, 2018.
  
- [4] P. S. Bas, "Diseño y construcción de un levitador magnético. Trabajo de Fin de Grado. ETSI-ICAI, Universidad Pontificia Comillas," 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11531/21660>. [Accessed Julio 2019].
  
- [5] M. Romasanta, "Estudio y aplicación del Filtro de Kalman en fusión de sensores UAVs," Sevilla, 2017.



# CONTROL OF A MAGNETIC LEVITATOR

Author: Patricia García de Castro Iribas

Director: Juan Luis Zamora Macho

Aurelio García Cerrada

Entity: ICAI - Universidad Pontificia de Comillas

## 1. INTRODUCTION

Magnetic levitation is a discipline that embodies many fields of engineering. The experiment studied in this work consists in maintaining levitating a magnetized object ("target" in the rest of this summary) by means of the force exerted by an electromagnet.

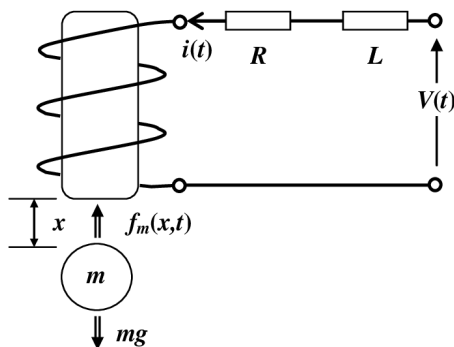


Figure 1: Basic scheme of the levitator

Magnetic levitation is today best known for Space X's Maglev or Hyperloop One trains [1]. A magnetic levitation train is a vehicle that uses a magnetic field to levitate above the rail (some of these trains are 1 cm above the track and others can levitate up to 15 cm) and propel themselves along a guideway [2]. Other applications are, for example, the separation of plastics in waste via magnetic levitation [3].

This project aims to design a state-feedback controller to sustain an object while controlling the current in an electromagnet. This system will be implemented in the MatLab/Simulink environment.

The main objectives of this project are:

- 1) To improve the design of the equipment already used in previous projects: position, sensor, actuator and power supply.
- 2) To update the available simulator and design of a control system.
- 3) To implement the controller, including a state-variable estimator such as an Extended Kalman Filter (EKF).

## 2. METHODOLOGY

The work has been carried out as follows: plant modeling, control design and control implementation (with prior simulation).

As far as plant modeling is concerned, the states to be used for control design must be taken into consideration, namely, of the target current, target position and speed. The command input is the voltage applied to the electromagnet. Having 3 states we need 3 differential equations to describe the plant dynamics: one for the electrical subsystem (2.1), the time derivative of the position, or speed (2.2) and finally, one to describe the equilibrium of forces applied on the target (2.3) [4].



$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - R \cdot i_L). \quad (2.1)$$

$$\frac{dz}{dt} = V_z \quad (2.2)$$

$$\Sigma F = K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} - m \cdot g = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2.3)$$

Eventually, the state-feedback controller was designed as a cascade controller with a proportional (P) current controller plus a Proportional-Integral-Derivative controller (PID) for the target's position. This approach should reduce the noise in the inner control loop.

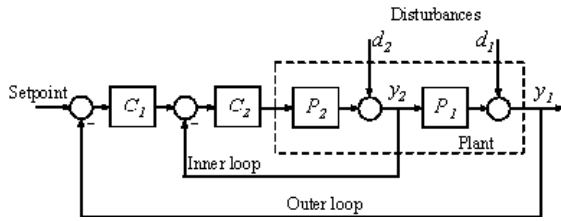


Figure 2: Basic diagram of a cascade control

Because of this, it is necessary to adapt the gains of the previous state feedback control to the new parameters for cascade control.

It should be noted that since not all states can be measured by sensors, it is necessary to use an estimator to easily find them. In this case, a Kalman Extended Filter (EKF) is used, because the speed cannot be measured directly from the sensors, and in this way, we also estimate the rest of the measurements, reducing the noise in them [4].

### 3. CONTROL IMPLEMENTATION

A hardware prototype has been built to be driven using MatLab/Simulink, as depicted in Figure 3.

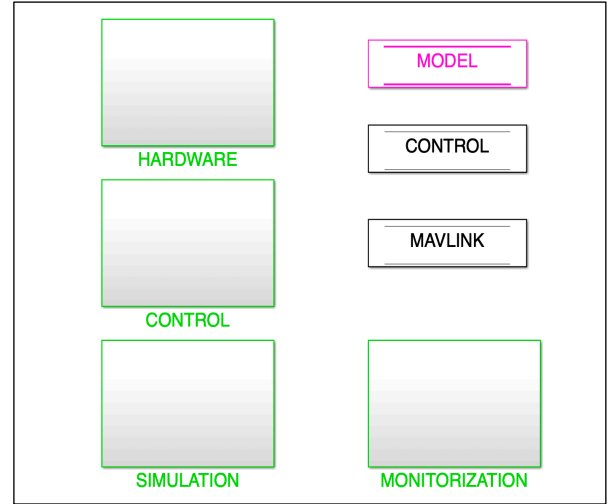


Figure 3: Simulink block diagram

The system in Figure 3, makes simulation without hardware possible as well as real-time tests and monitoring.

The micro used is a Raspberry pi model 3 b+, which has the advantage of speed of calculation and the great power that it possesses. The hardware block shown in Figure 3 contains the code of the sensors (position and current) and the actuator (PWM generator). Before implantation in the levitator itself, simulation is carried out using the simulation block in Figure 3.

The result of the simulations after a step in 1 cm position is shown below.

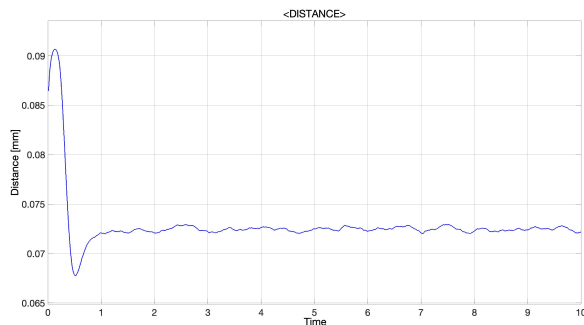


Figure 4: Distance step response in simulation

#### 4. RESULTS

The points that summarize the results of the project are:

- The hardware used previously was improved. For example, the electromagnet current is now measured using a Hall-effect probe, and a more robust power supply and a more powerful microprocessor have been used.
- The designed controller has been successful in simulation, although it may be too noisy and lightly damped.

- Current and position sensors were tested successfully in the hardware platform. The EKF was also tested successfully.

In spite of having fulfilled most of the proposed objectives, it is important to point out that it was not possible to maintain the position of the magnet at a constant position, probably due to the use of a too simplistic model for the system in hand.

#### 5. CONCLUSIONS

This project has contributed with a new state-feedback controller with a cascade approach, with modern and robust hardware capable of levitating the magnet, using the force provided by an electromagnet. Perhaps it could serve for laboratory experiments in the future.

For future projects, a much more thorough study of a suitable model for a non-linear levitator is recommended.

## 6. REFERENCES

- [1] SpaceX, "Hyperloop Alpha," 2013. [Online]. Available: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf). [Accessed Febrero 2019].
- [2] G. Perren, "Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética," Universidad Nacional del Rosario, 2003. [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/view/12710988/estudio-de-las-aplicaciones-practicas-de-la-levitacion-magnetica->. [Accessed Julio 2019].
- [3] P. Zhao, J. Xie, F. Gu, N. Sharmin, P. Hall and J. Fu, "Separation of mixed waste plastics via magnetic levitation," Waste Management, Elsevier, 2018.
- [4] P. S. Bas, "Diseño y construcción de un levitador magnético. Trabajo de Fin de Grado. ETSI-ICAI, Universidad Pontificia Comillas," 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11531/21660>. [Accessed Julio 2019].
- [5] M. Romasanta, "Estudio y aplicación del Filtro de Kalman en fusión de sensores UAVs," Sevilla, 2017.





**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO CONTROL DE UN LEVITADOR MAGNÉTICO

Autor: Patricia García de Castro Iribas  
Director: Juan Luis Zamora Macho

Madrid  
Julio de 2019



# ÍNDICE

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                           | <b>6</b>  |
| 1.1. MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO .....                  | 6         |
| 1.2. ESTADO DEL ARTE .....                             | 7         |
| 1.3. OBJETIVOS .....                                   | 10        |
| <b>2. MODELADO DE LA PLANTA .....</b>                  | <b>11</b> |
| 2.1. ECUACIONES FÍSICAS DE LA PLANTA .....             | 11        |
| 2.2. MODELADO EN ESPACIO DE ESTADOS .....              | 13        |
| 2.3. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....                    | 14        |
| 2.4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS ..... | 17        |
| <b>3. DISEÑO DEL CONTROL .....</b>                     | <b>19</b> |
| 3.1. CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS .....       | 19        |
| 3.2. CONTROL EN CASCADA .....                          | 21        |
| <b>4. ESTIMADOR DE ESTADO .....</b>                    | <b>23</b> |
| <b>5. IMPLANTACIÓN DEL CONTROL .....</b>               | <b>25</b> |
| 5.1. SIMULACIONES .....                                | 25        |
| 5.2. MICROCONTROLADOR .....                            | 28        |
| 5.3. CARGA .....                                       | 29        |
| 5.4. SENSORES .....                                    | 29        |
| 5.5. ACTUADORES .....                                  | 31        |
| 5.6. ETAPA DE POTENCIA .....                           | 33        |
| 5.7. MONTAJE .....                                     | 34        |
| <b>6. SOFTWARE .....</b>                               | <b>36</b> |
| 6.1. HERRAMIENTA DE SIMULINK .....                     | 36        |
| 6.2. MÁQUINA DE ESTADOS .....                          | 39        |
| <b>7. RESULTADOS .....</b>                             | <b>42</b> |
| 7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                      | 42        |
| 7.2. ANÁLISIS ECONÓMICO .....                          | 44        |
| <b>8. CONCLUSIONES .....</b>                           | <b>46</b> |
| 8.1. APORTACIONES .....                                | 46        |
| 8.2. FUTUROS DESARROLLOS .....                         | 46        |
| <b>9. REFERENCIAS .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>ANEXO 1 .....</b>                                   | <b>50</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Esquema básico del levitador .....                                            | 6  |
| Figura 2 Transrapid en Shanghai, 2004 .....                                            | 7  |
| Figura 3 "L0" tren de imán superconductor .....                                        | 7  |
| Figura 4 Diagrama de bloques control PID.....                                          | 8  |
| Figura 5 Levitador magnético docente de Feedback Instruments Ltd. con los ajustes .... | 9  |
| Figura 6 <i>Levitor Quanser Consulting</i> [14].....                                   | 10 |
| Figura 7 Diagrama de cuerpo libre .....                                                | 11 |
| Figura 8 Esquema eléctrico de la planta .....                                          | 12 |
| Figura 9 Esquema en Simulink de la planta.....                                         | 16 |
| Figura 10: Esquema detallado de la planta.....                                         | 16 |
| Figura 11: Circuito eléctrico del levitador .....                                      | 18 |
| Figura 12 Estructura en lazo cerrado de un PID.....                                    | 19 |
| Figura 13: Control por realimentación de estados con retenedor y muestreador .....     | 20 |
| Figura 14 Diagrama de bloques de un control en espacio de estados.....                 | 21 |
| Figura 15 Esquema básico de un control en cascada.....                                 | 21 |
| Figura 16 Control PID en cascada .....                                                 | 22 |
| Figura 17 Estructura del filtro de Kalman.....                                         | 23 |
| Figura 18 Respuesta a escalón de la variable posición .....                            | 26 |
| Figura 19 Respuesta de la corriente a un escalón en la posición.....                   | 26 |
| Figura 20 Respuesta de la velocidad a un escalón en la posición .....                  | 27 |
| Figura 21 Respuesta del voltaje al escalón en la posición .....                        | 27 |
| Figura 22 Raspberry pi 3 Model B+ .....                                                | 28 |
| Figura 23 Pi 2 Click Shield para Raspberry pi.....                                     | 28 |
| Figura 24 Imán de neodimio .....                                                       | 29 |
| Figura 25: Esquema del funcionamiento del Efecto Hall .....                            | 29 |
| Figura 26 Sensor de corriente de efecto Hall .....                                     | 30 |
| Figura 27 Conversor DC/DC Traco Power 18-36V a $\pm 15V$ .....                         | 30 |
| Figura 28 Sensor de posición por efecto de la luz.....                                 | 31 |
| Figura 29 Generador de PWM (DC Motor 3 click).....                                     | 32 |
| Figura 30: Señal de PWM para un factor de servicio de 0,2.....                         | 32 |
| Figura 31 ADC 3 click con microchip MCP3428 .....                                      | 33 |
| Figura 32 Conversor AC/DC (Input: 100-240VAC; Output: 5V, 4A) .....                    | 34 |
| Figura 33 Montaje físico del levitador, vista desde arriba.....                        | 34 |
| Figura 34 Montaje del levitador, vista de la bobina y el sensor de posición .....      | 35 |
| Figura 35 Estructura Simulink.....                                                     | 36 |
| Figura 36 Bloque de comunicación i2C.....                                              | 37 |
| Figura 37 Bloque generador de PWM .....                                                | 37 |
| Figura 38 Estructura del bloque de Control de Simulink.....                            | 37 |
| Figura 39: Esquema de Simulink del bloque de simulación .....                          | 38 |
| Figura 40: Monitorización de las simulaciones.....                                     | 38 |
| Figura 41: Monitorización en modo externo.....                                         | 39 |
| Figura 42: Estructura de la máquina de estados .....                                   | 40 |
| Figura 43 Conexión del pulsador mediante puerto GPIO27 .....                           | 41 |
| Figura 44: Respuesta de la medida de corriente durante el control interno de corriente | 43 |



|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45: Efecto bordes de un campo magnético producido por un solenoide ..... | 47 |
| Figura 46: Levitación en el interior de un solenoide .....                      | 47 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Tabla 7.1 Costes de las componentes principales..... | 44 |
| Tabla 7.2 Costes del equipo y herramientas.....      | 44 |
| Tabla 7.3 Costes mano de obra.....                   | 45 |
| Tabla 7.4 Costes software .....                      | 45 |
| Tabla 7.5 Presupuesto general del proyecto.....      | 45 |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO

La levitación magnética es una disciplina que abarca numerosos campos de la ingeniería. El método aplicado en este trabajo consiste en mantener levitando un objeto imantado mediante la fuerza ejercida por un electroimán. Cualquier objeto, por pesado que sea, se puede levitar si la fuerza magnética es suficientemente grande. Además, existen nuevas estrategias de control cada vez más avanzadas que permiten controlar de forma precisa la altura a la cual se desea posicionar dicho objeto.

En este proyecto, se diseñará un controlador que, dados un objeto y una fuente de corriente para crear un electroimán, se mantenga el objeto que queremos levitar a una determinada distancia del electroimán. El principio de funcionamiento es sencillo: hacer pasar una corriente por las espiras del electroimán, para generar un campo magnético. Éste, crea una fuerza de atracción que contrarrestará el peso del objeto a levitar, como se muestra en la Figura 1. Se emplea un electroimán porque consta de un núcleo de material ferromagnético y gracias a esto, se produce una amplificación natural del campo producido [1].

La variable que se desea controlar es la distancia ( $x$ ) del objeto al electroimán (ver Figura 1). Para ello se necesitará un sensor de posición que permita calcular esa distancia y mande la información al microcontrolador, el cual podrá variar la tensión que se aplica al electroimán, en función de las perturbaciones. Este sistema se implantará mediante el entorno de Matlab/Simulink. La dificultad que presenta este sistema se ve resumida en el teorema de Earnshaw [2]. Éste muestra como el sistema es por naturaleza inestable, razón por la cual hacen falta controladores que varíen rápidamente la magnitud de la fuerza magnética, para estabilizar el objeto.

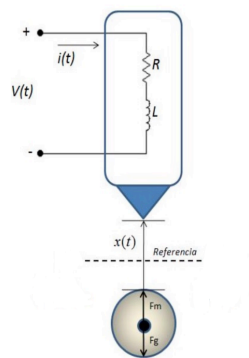


Figura 1 Esquema básico del levitador

En cuanto a las aplicaciones de la levitación magnética, hoy día el uso más extendido del fenómeno se da en los trenes de levitación magnética. Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza los campos magnéticos para suspenderse por encima del carril (algunos de estos trenes van a 1 cm por encima de la vía y otros pueden levitar hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía [3]. Existen otras aplicaciones como, por ejemplo, la separación de plásticos en la basura vía levitación magnética [4].

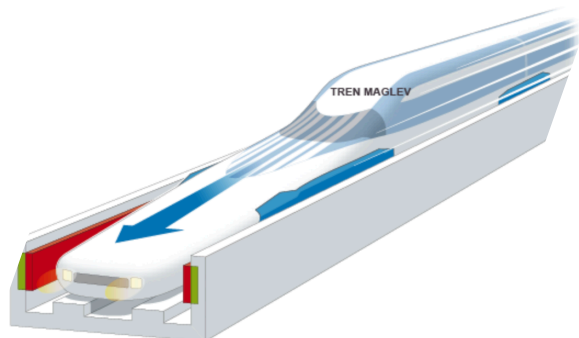
## 1.2. ESTADO DEL ARTE

La aplicación principal y más conocida de la levitación magnética son los trenes Maglev. Fueron patentados en 1934 por el alemán Hermann Kemper. Durante el periodo de 1960-1980 se fue madurando y mejorando el diseño de los mismos, pero no fue hasta 1979 cuando en la ciudad de Hamburgo, finalmente se estrenó esta tecnología alemana con el Transrapid (ver Figura 2) como transporte público [5]. Este modelo puede alcanzar una velocidad de hasta 430 Km/h. En Nagoya, Japón, el HSST (High Speed Surface Transport) está en servicio desde 2005.



*Figura 2 Transrapid en Shanghai, 2004*

Más adelante, han surgido nuevos proyectos de trenes Maglev en Beijing, Korea y Alemania. En 2015, el tren japonés de imán superconductor *L0*, mostrado en la Figura 3, alcanzó una velocidad de 603Km/h, récord mundial de cualquier vehículo guiado. Se pretende operar este tren de Tokyo a Nagoya en 2027 [6].



*Figura 3 "L0" tren de imán superconductor*

Otro avance en cuestión es el Hyperloop One XP de la empresa estadounidense SpaceX, que está previsto que empiece a operar alrededor del año 2021. Éste se basa en un tren que funciona mediante levitación, pero va por dentro de un tubo a muy baja presión, casi al vacío, de forma que podrán alcanzar velocidades mucho más altas. El diseño promete un medio de transporte más rápido y seguro que los que han estado en vigor hasta ahora [7].

El fenómeno más importante que describe el proceso de levitación es el electromagnetismo. Se podría decir que el electromagnetismo tal y como lo conocemos hoy en día es fruto de una invención y dos descubrimientos; la invención es una fuente de corriente eléctrica continua, la pila eléctrica, llevada a cabo por Volta, a principios del siglo XIX. El primer descubrimiento trata la demostración de los efectos que tiene la corriente eléctrica en el magnetismo, obra de Oersted y Ampère en 1820, y el segundo, la generación de corriente eléctrica a partir de campos magnéticos, fenómeno que se conoce como inducción electromagnética, realizada por Michael Faraday en 1831 [8].

Sin embargo, la figura cumbre del electromagnetismo fue James Clerk Maxwell, uno de los científicos más importantes de la ciencia. Éste, realizó una síntesis de todas las teorías electromagnéticas y las resumió en una serie de ecuaciones llamadas las Leyes de Maxwell [8]. Estas leyes son las que han permitido la elaboración de un modelo preciso de la planta que describe el proceso del levitador.

En cuanto al control, el modelo de controlador más básico que se puede emplear se trata de un PID con realimentación, el cual consiste en una acción proporcional, una integral y una diferencial aplicadas al error [9]. Este método de control fue introducido por Minorsky en 1922 [10], y perfeccionado por los ingenieros de Taylor Instruments Ziegler y Nichols [11]. Con esta estructura de control, se consigue un error nulo de la salida respecto de la referencia (suponiéndola constante), además de añadir cierta rapidez al proceso, gracias a la acción diferencial. La Figura 4 muestra un esquema básico de este control.

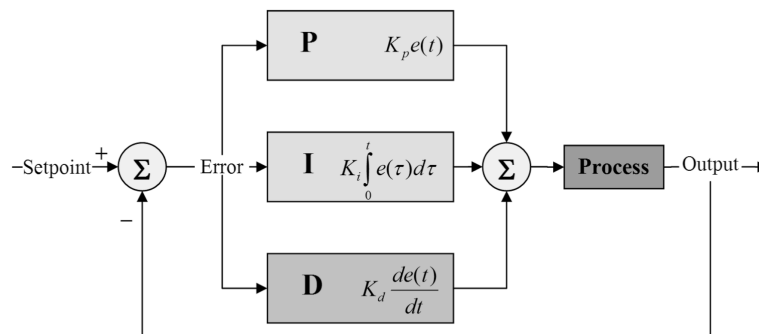


Figura 4 Diagrama de bloques control PID

Otra estrategia de control muy utilizada en esta aplicación es el control por realimentación de estados [2]. La idea fundamental del control en espacio de estados es que se puede obtener información no sólo de las variables de entrada y salida, sino también de otras variables llamadas variables de estado. Otra gran ventaja que tiene este tipo de control es que se pueden controlar varias variables de salida simultáneamente, MIMO, que son las iniciales en inglés de *Multi-Input, Multi-output*.

Asimismo, el posible error de medida de los sensores tanto de posición como de intensidad y la no-linealidad de las ecuaciones que rigen el proceso, hacen necesario un estimador de estado. En este caso se utiliza un Filtro Extendido de Kalman (EKF, del inglés, Extended Kalman Filter), que se trata de un algoritmo iterativo, que, basado en un modelo del sistema dinámico bajo estudio, y de unas medidas realizadas mediante sensores de algunas variables del el sistema, elimina el ruido blanco o aleatorio para dar una estimación del valor real de las variables de dicho sistema [12]. Se usa la versión extendida del filtro dada la no-linealidad de las ecuaciones.

En la actualidad, muchas universidades disponen de prácticas de laboratorios de control basados en levitadores magnéticos. Por ejemplo, en la Universidad Politécnica de Cataluña, en la cual utilizan un levitador magnético de *Feedback Instruments Ltd.* (Figura 5), al cual le añaden dos soportes para mantener el objeto en levitación: una plataforma de PVC para evitar la caída brusca de la bola (A), y una solución mecánica para evitar el contacto de la bola con el imán (B).

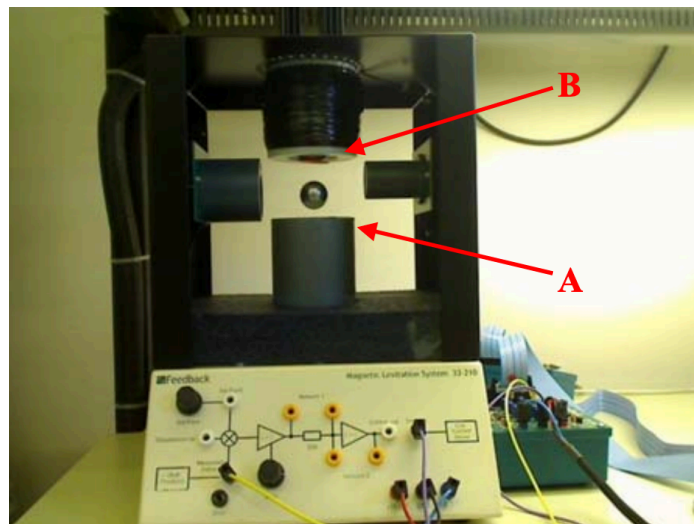


Figura 5 Levitador magnético docente de *Feedback Instruments Ltd.* con los ajustes necesarios (A, B) para realización de prácticas remotas [13]

En otras instituciones, como en la Universidad de St. Petersburgo, se realizan experimentos con un levitador de *Quanser Consulting* (Figura 6), que se caracteriza por su núcleo de ferrita y por el soporte en su parte inferior, alineado con el eje del imán, para guiar el sensor de posición.



Figura 6 *Levitator Quanser Consulting* [14]

### 1.3. OBJETIVOS

Los principales objetivos a lograr con este trabajo son:

1. Mejora del diseño del equipo respecto de proyectos anteriores: estructura, sensor, actuador y fuente de alimentación.
2. Actualización del simulador y diseño del sistema de control.
3. Implantación del control, incluyendo el estimador de estado (EKF) y el control lógico.

## 2. MODELADO DE LA PLANTA

### 2.1. ECUACIONES FÍSICAS DE LA PLANTA

Para las ecuaciones de la planta del levitador, se va a utilizar la ecuación de la fuerza magnética en función de la intensidad y la distancia, y después, se aplicará la ecuación de equilibrio de fuerzas. La ecuación de la fuerza magnética sobre la carga, demostrada en el *Anexo 1* de [1], viene dada por:

$$F_m(z) = K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} \quad (2.1)$$

En esta ecuación,  $F_z$  es la fuerza en dirección  $z$  sufrida por la carga (va en sentido contrario a la gravedad),  $z$  es la distancia entre el centro de gravedad del electroimán y el centro de gravedad de la carga,  $i_L$  es la corriente que circula por la bobina y  $K_m$  es la constante magnética. Cabe destacar que, esta ecuación es válida porque el objeto que se va a levitar es un imán, pues en caso contrario, iría en función de la distancia al cuadrado.

Dado el diagrama de cuerpo libre de la Figura 7, se plantea el equilibrio de fuerzas:

$$\sum F = K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} - m \cdot g = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2.2)$$



Figura 7 Diagrama de cuerpo libre

La ecuación 2.2 muestra nuestra primera ecuación diferencial, la cual será necesaria más tarde para modelar la planta en espacio de estados.

Las ecuaciones eléctricas de la planta sirven para posteriormente trabajar con los siguientes estados:  $i_L$  (corriente),  $z$  (altura) y  $V_z$  (velocidad de movimiento de la carga). El esquema eléctrico de la planta es el que se muestra en la Figura 8.

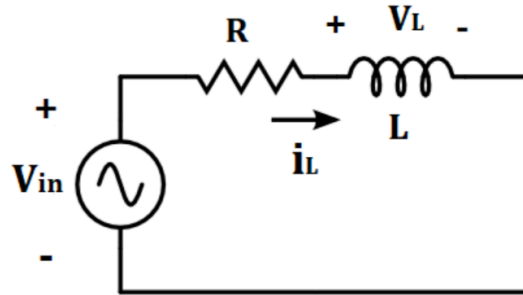


Figura 8 Esquema eléctrico de la planta

Mediante la Ley de Kirchoff de la malla, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{in} = R \cdot i_L + V_L \quad (2.3)$$

Donde  $V_L$  viene dada por la ecuación fundamental de una bobina:

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

Despejando, se obtiene la segunda ecuación diferencial, necesaria para nuestro modelado en espacio de estados.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - R \cdot i_L) \quad (2.5)$$

Todas estas ecuaciones quedan resumidas de forma esquemática en la Figura 10 del apartado siguiente.



## 2.2. MODELADO EN ESPACIO DE ESTADOS

La idea fundamental del control en espacio de estados es que se puede obtener información no sólo de las variables de entrada y salida, sino también de otras variables llamadas variables de estado. Este sistema de control responde a la necesidad de controles más potentes. El vector de estado, compuesto por las variables de estado, contiene la información del sistema y permite sacar el valor de cada salida en función de las entradas.

La forma más conveniente de escoger las variables de estado es escoger aquellas relacionadas con el almacenamiento de energía. La bobina almacena energía en forma de campo magnético a través de su corriente, la posición almacena energía potencial y la velocidad energía cinética. Por lo tanto, éstas serían:  $i_L$ ,  $z$  y  $V_z$ . El vector de estados quedaría de la siguiente manera:

$$X(t) = \begin{pmatrix} i_L(t) \\ z(t) \\ V_z(t) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

La salida o variable que se desea controlar para el levitador es la distancia respecto al electroimán  $z(t)$ , es decir:

$$Y(t) = z(t) \quad (2.7)$$

La entrada en este caso es la tensión aplicada a la bobina:

$$U(t) = V_{in}(t) \quad (2.8)$$

Un modelo en variables de estado, siempre puede resumirse como sigue:

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = F(X(t), U(t)) \\ Y(t) = G(X(t), U(t)) \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde,  $F(X(t), U(t)) = \begin{pmatrix} f_1(X, U) \\ f_2(X, U) \\ f_3(X, U) \end{pmatrix}$  y  $G(X(t), U(t)) = (g_1(X, U))$ .

La primera ecuación es la (2.5) del apartado anterior:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - R \cdot i_L) = f_1 \quad (2.10)$$

La segunda ecuación es una relación sencilla, pues es simplemente la aplicación de la primera derivada de la posición respecto del tiempo, para obtener la velocidad ( $V_z$ ):

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{dz}{dt} = V_z = f_2 \quad (2.11)$$

Por último, para la tercera ecuación, despejamos la aceleración de la ecuación (2.2), pues la aceleración es directamente la derivada de la velocidad. Así, se obtiene:

$$\frac{dx_3}{dt} = \frac{dV_z}{dt} = \frac{1}{m} \cdot (K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} - m \cdot g) = f_3 \quad (2.12)$$

Como,  $Y(t)$  es igual a  $x_2$ ,  $g_1(X, U) = z$ .

### 2.3. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia describe la relación entre la entrada y la salida, para un sistema lineal e invariante en el tiempo. Se observa que las ecuaciones de levitador no son lineales, por lo cual haría falta linealizarlas. El primer paso para linealizar (2.9), es definir un punto de operación. En este punto, las derivadas de los estados son nulas, de forma que el sistema tiende siempre a mantener dicho punto.

$$\frac{dX_0}{dt} = F(X_0, U_0) = 0 \quad (2.13)$$

$$Y_0 = G(X_0, U_0) \quad (2.14)$$

El punto de operación se puede hallar fácilmente mediante el comando *trim()* de Matlab, cuyas entradas son las ecuaciones (2.10), (2.11) y (2.12) y unos valores aproximados

desde los cuales se comienza la búsqueda. Estos valores han de ser cercanos al punto de operación deseado. El punto obtenido es:

$$X_0 = \begin{pmatrix} 1,017 \text{ A} \\ 7,247 \text{ cm} \\ 0 \text{ m/s} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad U_0 = 5,27 \text{ V}$$

Linearizando (2.9), se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) = F(X(t), U(t)) \\ Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t) = G(X(t), U(t)) \end{cases} \quad (2.15)$$

Al tratarse de un sistema MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), la función de transferencia será, en realidad, una matriz de funciones de transferencia. La matriz más importante es la matriz A, pues se trata de la matriz de estado del sistema. Esto implica que sus autovalores son los polos del sistema dinámico.

El cálculo de cada una de las matrices se realiza calculando las derivadas parciales de cada estado o salida con respecto a cada una de las entradas.

$$A = \frac{\partial F}{\partial X} \quad B = \frac{\partial F}{\partial U} \quad C = \frac{\partial G}{\partial X} \quad D = \frac{\partial G}{\partial U}$$

Este cálculo también lo realiza Matlab mediante un comando llamado *linmod()*, al cual le llegan las ecuaciones y el punto de operación calculado anteriormente. Aplicando el comando *linmod()*, y con ayuda de un diagrama de Simulink que represente la estructura de la planta (ver Figura 9), obtenemos las siguientes matrices del sistema linealizado en el punto de operación:

$$A = \begin{pmatrix} -R/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_m}{m \cdot x_{2_0}^4} & \frac{-4 \cdot K_m \cdot x_{1_0}}{m \cdot x_{2_0}^5} & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

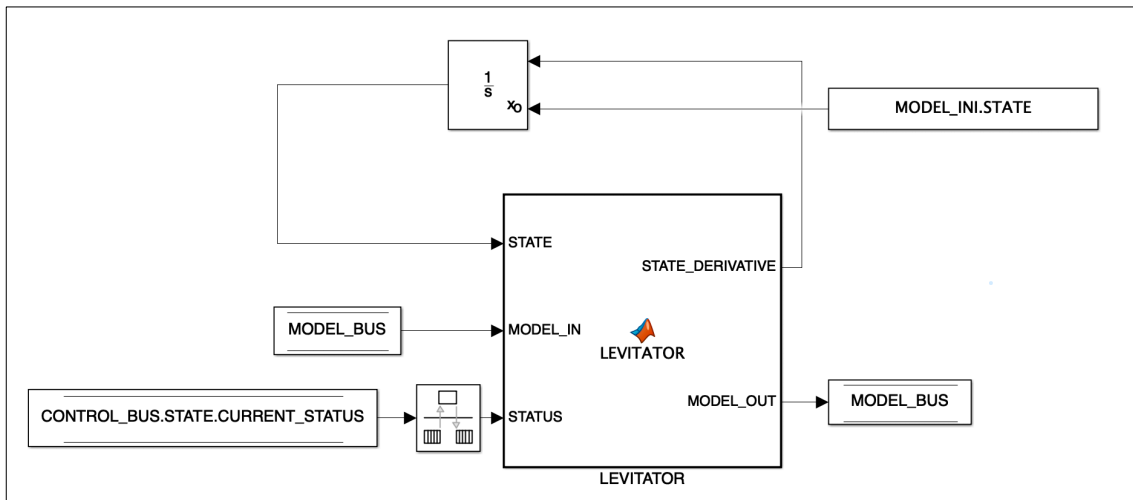


Figura 9 Esquema en Simulink de la planta

Dado que la salida es igual a uno de los estados, las matrices C y D son la matriz identidad y la matriz nula, respectivamente.

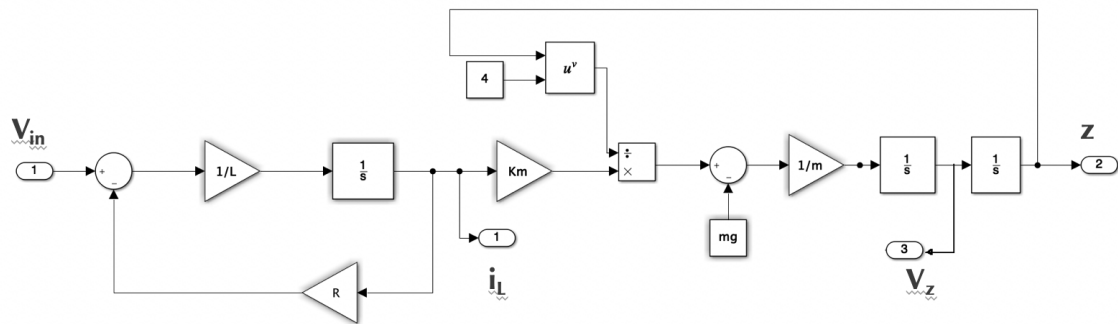


Figura 10: Esquema detallado de la planta

La Figura 10 muestra un esquema más detallado de la planta, donde se puede ver claramente la entrada ( $V_{in}$ ) y los tres estados ( $i_L$ ,  $z$  y  $V_z$ ), donde la salida corresponde a  $z$ . Se distinguen claramente las ecuaciones dentro del esquema, de izquierda a derecha, la ecuación de la bobina, la integración de la aceleración para obtener la velocidad y la posterior integración de la velocidad para obtener la posición.

Sin embargo, la matriz de transferencia que nos interesa es aquella entre la entrada ( $U$ ) y la salida o segundo estado ( $X_2$ ), es decir, entre la corriente y la posición. Aplicando la transformada de Laplace al sistema de ecuaciones (2.15), se obtiene:

$$\begin{cases} s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + B \cdot U(s) \\ Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s) \end{cases} \quad (2.16)$$

Despejando  $X(s)$  de la primera ecuación se obtiene:

$$X(s) = (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \cdot U(s) \quad (2.17)$$

Y si se introduce este valor de  $X(s)$  en la segunda ecuación:

$$Y(s) = (C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B + D) \cdot U(s) \quad (2.18)$$

La función de transferencia importante para este caso es aquella que relaciona la tensión de la entrada con la posición del objeto que se quiere hacer levitar, ésta se encuentra en la posición [2,1] de la matriz de transferencia de (2.18).

$$F(s) = \frac{K_m \cdot x_{20}}{(R+L \cdot s) \cdot (m \cdot x_{20}^5 \cdot s^2 + 4 \cdot K_m \cdot x_{10})} \quad (2.19)$$

## 2.4. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Para obtener los parámetros característicos (constante magnética, resistencia e inductancia), hacen falta un ensayo de fuerza y uno eléctrico (ver Figura 11). El cálculo

de la constante magnética entre el electroimán y el objeto que levitará se calculó midiendo la distancia a la cual se igualaban la fuerza magnética con el peso del imán. En este punto, se puede aplicar (2.20).

$$K_m \cdot \frac{i_L}{z^4} = m \cdot g \quad (2.20)$$

Tras tomar medidas de un par de puntos aplicando diferentes corrientes y aplicando la ecuación en dichos puntos, se obtuvo un valor de  $K_m$  aproximado de  $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^4/\text{A}$ .

Las medidas de la resistencia y la inductancia del electroimán se cogieron de anteriores proyectos que utilizaban la misma bobina y entrehierro [1]. Los valores son:

$$R = 5\Omega \quad L = 21,49 \text{ mH}$$

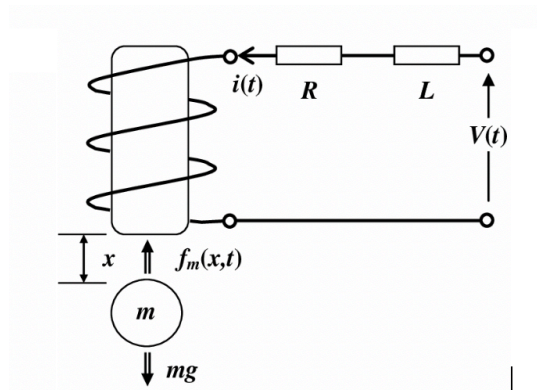


Figura 11: Circuito eléctrico del levitador

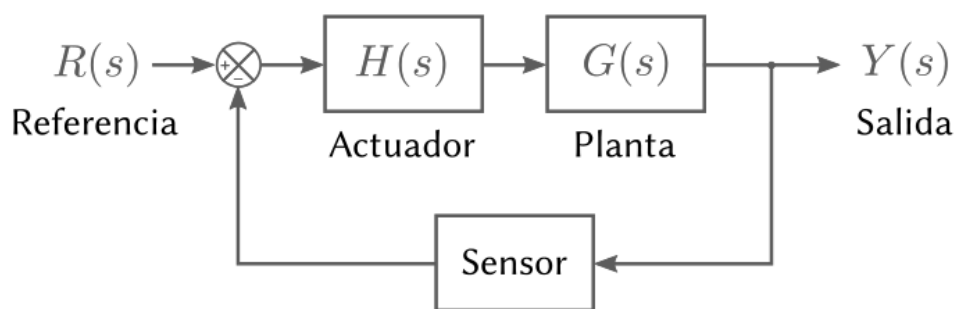
### 3. DISEÑO DEL CONTROL

El control es el principal objetivo de este proyecto. En los siguientes apartados se explicarán las etapas del diseño del control.

#### 3.1. CONTROL POR REALIMENTACIÓN DE ESTADOS

Una estrategia básica de control es la mostrada en la Figura 12. El PID es sin duda la estrategia de control más extendida en la industria por su simplicidad y eficacia a la hora de dar solución a la gran mayoría de los problemas de control que se plantean en la práctica. Entre las ventajas del PID se pueden mencionar el diseño con información limitada de la planta, la disponibilidad de procedimientos de ajuste automático, la robustez frente a errores de modelado y perturbaciones y la utilización de parámetros de diseño fácilmente interpretables y que permiten un reajuste simple del control.

Sin embargo, existen una serie de problemas de control con dinámicas especiales donde el control PID estándar no ofrece una solución completamente satisfactoria. Por ejemplo, presenta carencias significativas cuando se enfrenta a sistemas con retardos, a sistemas con ceros positivos, con doble integrador, poco amortiguados, inestables en lazo abierto, a sistemas no lineales o con varias variables con fuertes acoplamientos entre variables. La alternativa para estos casos de dinámica conflictiva puede plantearse a partir de estrategias de control completamente diferentes.



*Figura 12 Estructura en lazo cerrado de un PID*

Un control por realimentación de estados tiene varias ventajas respecto al PID. La primera es que se pueden controlar sistemas con varias entradas y varias salidas (MIMO). Además, el control en espacio de estados permite medir y obtener información de las variables de estado, y no solo de la salida del sistema, a diferencia del PID. Otra ventaja es que con el diseño en espacio de estados teóricamente se pueden posicionar los polos

dinámicos del sistema (autovalores de la matriz de estado) en los valores deseados, mediante el comando *place()* de Matlab.

Como se puede ver en la Figura 13, el diagrama de bloques responde a las siguientes ecuaciones en tiempo discreto:

$$u(t) = -K \cdot x(t) + K \cdot r(t) = K \cdot (r(t) - x(t)) = K \cdot e(t) \quad (3.1)$$

Donde K es la matriz de ganancias:  $K = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix}$ .

Las técnicas de control utilizadas en las primeras décadas del siglo XX, se caracterizan por su naturaleza analógica, pues todas las señales involucradas son continuas en tiempo y magnitud. Sin embargo, desde la llegada del microprocesador, los controles digitales se han convertido en la tecnología dominante. Un esquema sencillo de control se ha dibujado en la Figura 13.

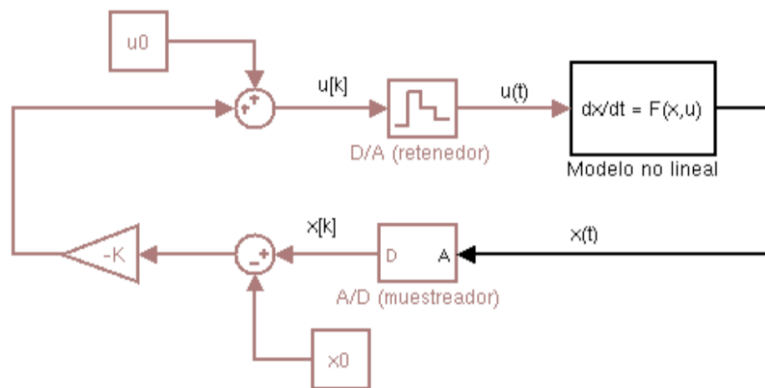


Figura 13: Control por realimentación de estados con retenedor y muestreador

La razón por la que se necesitan dos conversores (uno D/A y otro A/D), es que el diseño del control se realiza en tiempo discreto para modelos no lineales, pues resulta mucho más sencillo. Sin embargo, la planta está hecha en tiempo continuo.

Omitiendo los conversores, en la Figura 14 se muestra el diagrama de bloques resultante con las matrices calculadas anteriormente: A, B y C.



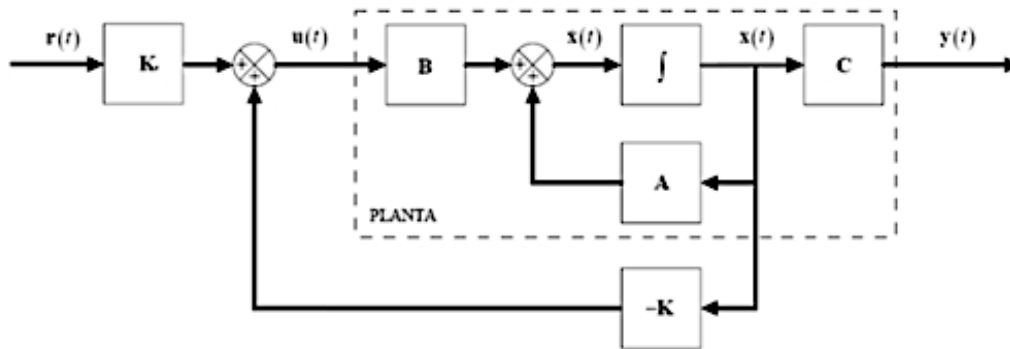


Figura 14 Diagrama de bloques de un control en espacio de estados

### 3.2. CONTROL EN CASCADA

La estructura de control que finalmente se va a utilizar es un control en cascada. La razón es que permite controlar dos variables al mismo tiempo, una dentro de otra, y utilizar el valor del mando de uno de los controles, como referencia para el otro. El esquema se muestra en la Figura 15.

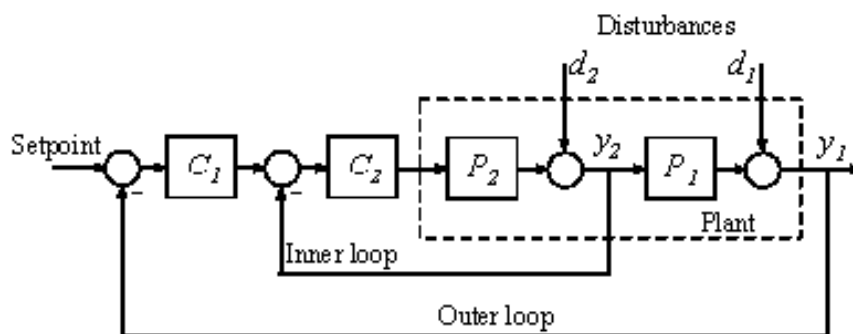


Figura 15 Esquema básico de un control en cascada

Dado que el objetivo final es mantener la posición constante, establecemos que el control externo sea el de posición. El control en cascada tiene la ventaja de que para un control externo (principal), puedes hacer uso de otro control auxiliar, el interno. En este caso, para el control de posición, utilizamos de referencia el valor del mando del control de corriente.

Cabe destacar que, a diferencia del control con la estructura de espacio de estados, el control en cascada cuenta con la medida o el valor de la referencia de corriente. Esto es importante porque nos permite añadir un saturador, con el objetivo de limitar la corriente que le llegará al electroimán, para que nunca supere el valor máximo que éste puede soportar.

Para pasar de la estructura de realimentación de estados a la estructura en cascada, es necesario adaptar las ganancias. La estructura en cascada se va a realizar de tal forma que el control externo (de posición) sea de tipo PID y el interno (de corriente) sea un proporcional. Esta estructura se muestra en la Figura 16.

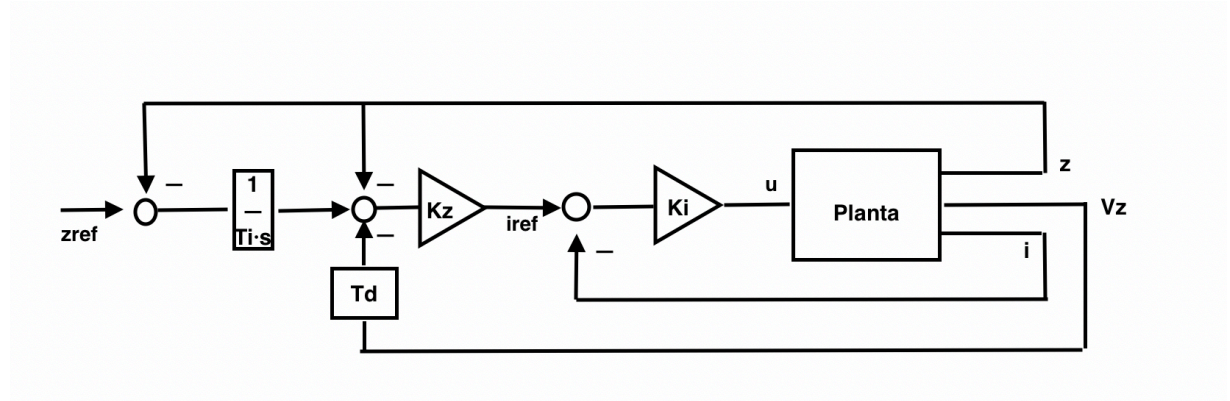


Figura 16 Control PID en cascada

En este caso, el mando resulta:

$$u(t) = k_z \cdot \left( k_i \cdot \left( \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \cdot V_z - z(t) \right) - i(t) \right) \quad (3.2)$$

La transformación de las ganancias del control por realimentación de estados al control en cascada, se realiza igualando el mando obtenido en ambos casos:

$$\begin{aligned} k_i &= \frac{k_2}{k_1} \\ k_z &= k_1 \\ T_d &= \frac{k_3}{k_2} \\ T_i &= \frac{-k_2}{k_i} \end{aligned}$$

La ponderación de la referencia es igual a la unidad ( $b = 1$ ), pues de otra forma no cuadrarían ambos casos.

## 4. ESTIMADOR DE ESTADO

El objetivo de un estimador de estado es, como su nombre indica, estimar los estados que a veces resultan difíciles de medir. Esta estimación se realiza teniendo en cuenta tanto los demás estados y salidas, como las entradas. Además, dependiendo de la confianza en la forma de medida de cada variable, se puede decidir cuál tener más en cuenta para estimar los estados necesarios. La Figura 17 representa lo que sería la estructura básica del estimador.

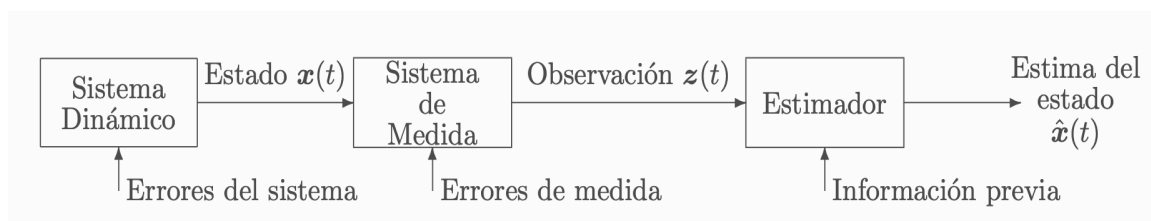


Figura 17 Estructura del filtro de Kalman

Teniendo en cuenta que la ecuación del proceso y la ecuación de la medida el funcionamiento del filtro de Kalman se resume en 5 sencillos pasos:

- 1) primero, se calcula el error de estimación a priori.
- 2) luego, el error de la estimación a posteriori.
- 3) se hallan las matrices de correlación de los errores de estima a priori y a posteriori.
- 4) Se evalúa el estado a posteriori, evaluando el residuo y calculando la ganancia del filtro de Kalman.
- 5) Minimizar la correlación del error a posteriori (ganancia de Kalman).

Básicamente, el filtro de Kalman tiene dos fases: predicción y corrección. Se trata de un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva y eficiente del método de mínimos cuadrados. Esto permite calcular un estimador lineal del estado siguiente con la información disponible del estado anterior, y posteriormente actualizar dicha estimación con la llegada de información adicional.

Además, mediante el Filtro de Kalman es posible determinar la fiabilidad de las ecuaciones y de las medidas tomadas por los sensores del sistema. Es decir, establecer para cada parámetro estimado si es más fiable el resultado por medio de ecuaciones o la propia medida de un sensor (si la hubiera).

En este caso, al ser un sistema no lineal, es necesario utilizar un Filtro Extendido de Kalman. Éste, linealiza las ecuaciones del filtro de Kalman normal, adaptándolas para sistemas no lineales.

El filtro de Kalman en el levitador es de gran utilidad, especialmente porque hay un estado que no se puede medir mediante los sensores: la velocidad del imán. Por ello, la mejor opción es estimarlo con un EKF, pues hallarla mediante la derivada de la posición será mucho más impreciso, pues acumularía el error que ya tiene en sí el sensor de posición.

## 5. IMPLANTACIÓN DEL CONTROL

### 5.1. SIMULACIONES

Antes de implantar el control diseñado en el sistema real, primero es importante que de un buen resultado en simulación. Para ello, se analizará la respuesta a un escalón en referencia de cada uno de los estados: distancia, corriente y velocidad. Esto se realizará teniendo en cuenta el punto de operación calculado en apartados anteriores.

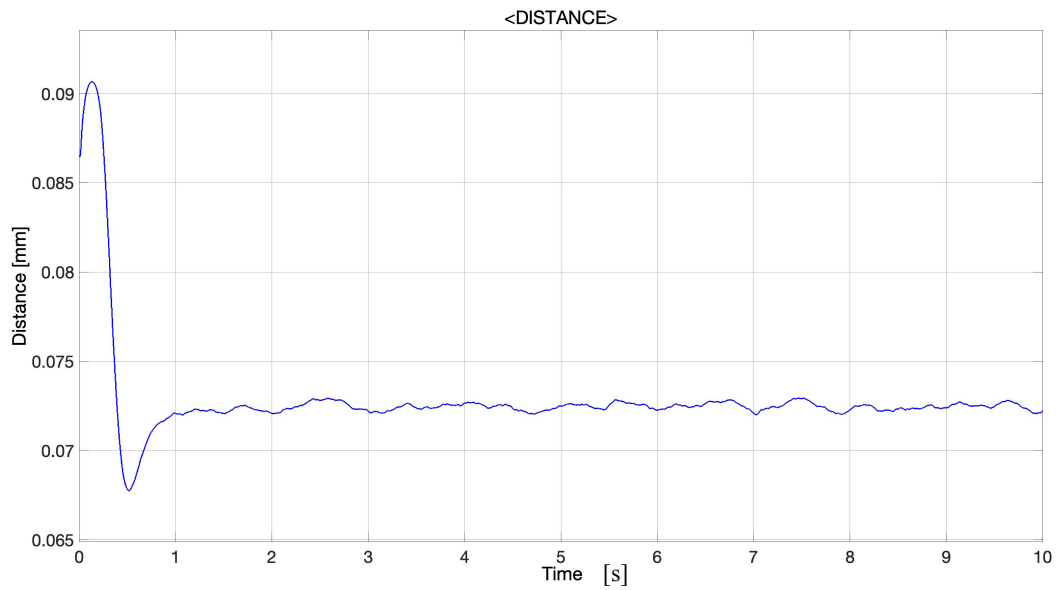
El escalón que se aplicará para analizar las respuestas es de 1,4cm en la variable posición, lo que automáticamente hará cambiar el resto, que tendrán que evolucionar para volver al punto de operación inicial:

$$X_0 = \begin{pmatrix} 1,017 \text{ A} \\ 7,247 \text{ cm} \\ 0 \text{ m/s} \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad U_0 = 5,27 \text{ V}$$

El ajuste de los parámetros del control ( $T_i$ ,  $T_d$ ,  $K_z$ ,  $K_i$ , los parámetros del EKF, etc) se realizará mediante un código elaborado en Matlab basado en un ajuste por mínimos cuadrados de forma que se minimice la diferencia de sus valores para que el resultado sea lo más cercano al punto de operación posible.

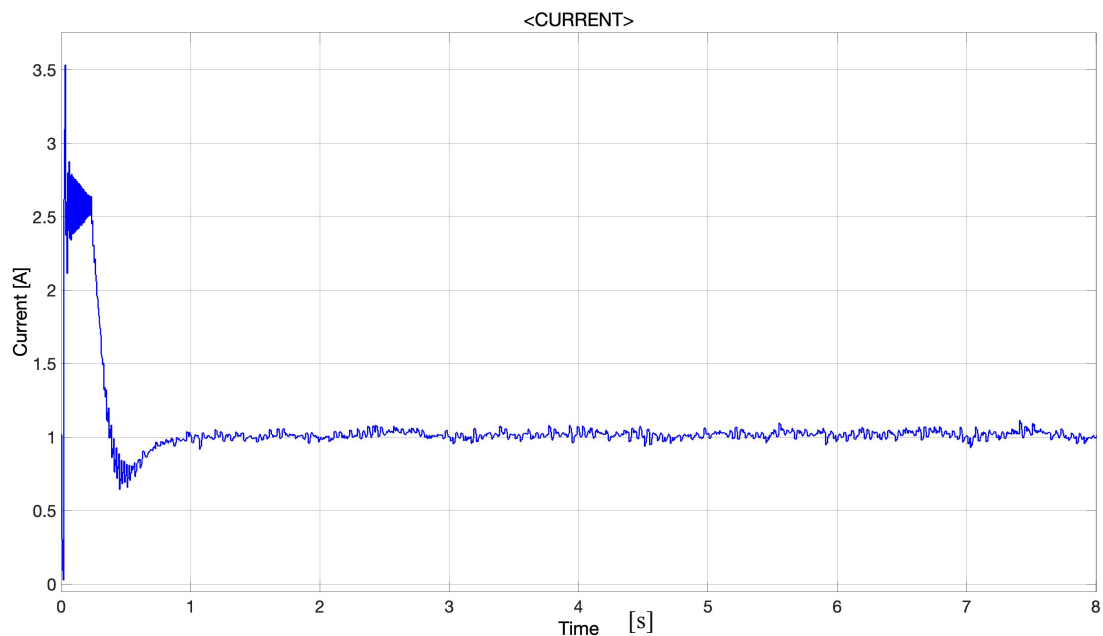
Una vez obtenidos los parámetros con mínimos cuadrados, se procede a simular con el programa en MatLab/Simulink.

Lo primero, se mira la respuesta al escalón de la distancia, mostrada en la Figura 18. Se puede observar que, partiendo del punto de operación a 7,24 cm y aplicando un escalón de 1'4 cm, el valor inicial será de 8,64 cm y el régimen permanente volverá al punto de operación.



*Figura 18 Respuesta a escalón de la variable posición*

La respuesta de la corriente se ha dibujado en la Figura 19, se observa una respuesta un poco brusca al principio del transitorio, debido al escalón de la posición, mientras que al final se estabiliza, con un valor en régimen permanente de aproximadamente 1 A.



*Figura 19 Respuesta de la corriente a un escalón en la posición*

Como es lógico, la velocidad del imán tiende a cero en simulación, pues trata de estabilizarse a una altura determinada (Figura 20). En el comienzo del transitorio hay una

ligera variación debido al escalón, pero más tarde, aunque con un poco de ruido, se estabiliza.

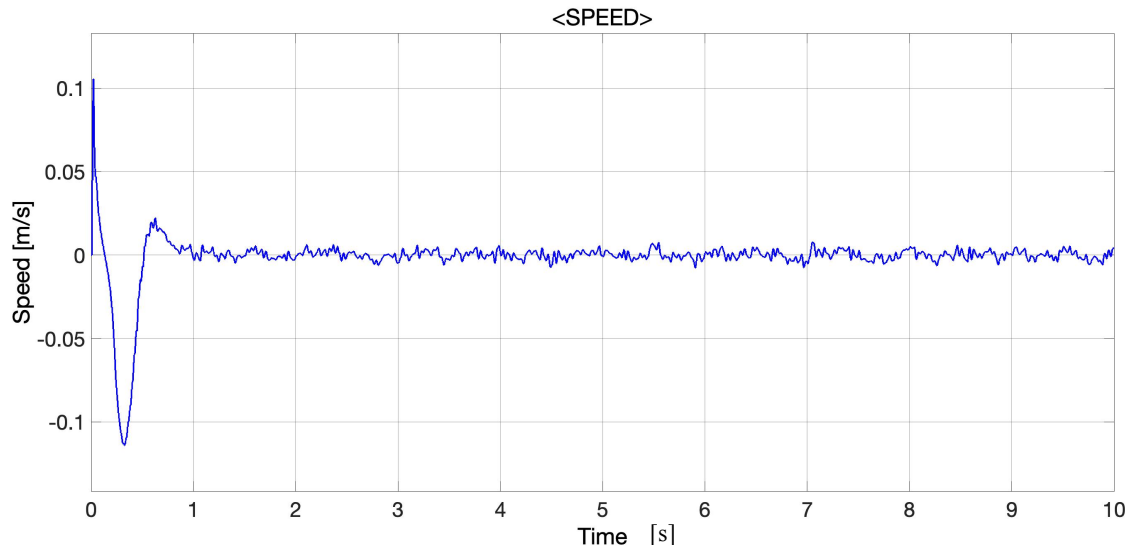


Figura 20 Respuesta de la velocidad a un escalón en la posición

La tensión aplicada a la bobina, también sufre una variación, para que la corriente aumente para aumentar la fuerza magnética sobre el objeto que levita. Más adelante en el transitorio, se vuelve más constante y cercana a los 5,27 V, que es su punto de operación (Figura 21).

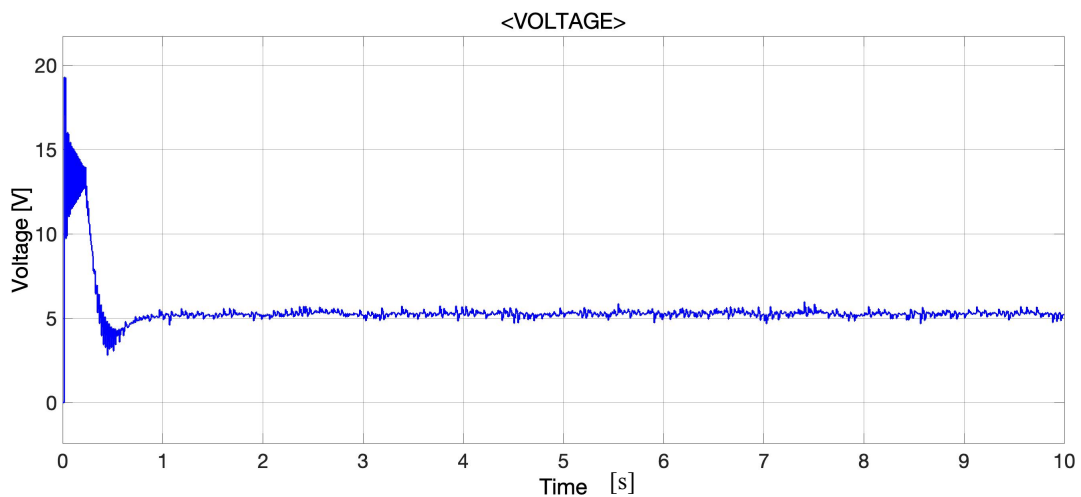
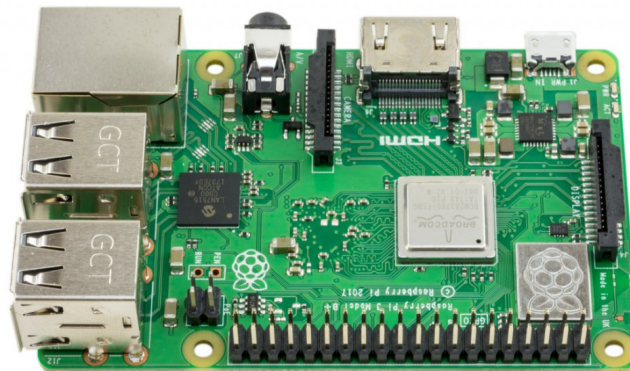


Figura 21 Respuesta del voltaje al escalón en la posición

## 5.2. MICROCONTROLADOR

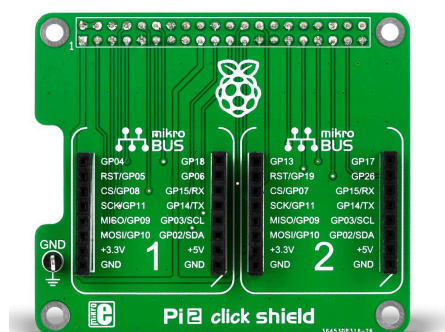
El microcontrolador utilizado para este proyecto es una Raspberry pi 3 model B+. Consta de un microprocesador Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 de 64-bit con 1.4 GHz (Figura 22). Este modelo consta de una CPU “acelerada” respecto a modelos anteriores, soporte WiFi de doble banda y también soporte Gigabit Ethernet. Además, dispone de cuatro puertos USB 2.0, el puerto RJ45 para conexiones Ethernet, la toma de auriculares, el conector HDMI, el puerto Micro USB para la alimentación o el ya clásico puerto GPIO.

Los datasheets de todos los componentes descritos a continuación se encuentran en el **Anexo 1**, al final del documento.



*Figura 22 Raspberry pi 3 Model B+*

En este proyecto, se hace necesaria la disposición de una tarjeta Shield como la de la Figura 23, para posibilitar la conexión del sensor de posición, el ADC y el generador de PWM.



*Figura 23 Pi 2 Click Shield para Raspberry pi*



### 5.3. CARGA

La carga que se va a levitar es un imán de neodimio en forma de disco (ver Figura 24), un material con cualidades perfectas para utilizarlo en aplicaciones magnéticas. Esto se debe a que posee una alta saturación magnética y tiene potencial de absorber grandes cantidades de energía magnética [15].



Figura 24 Imán de neodimio

### 5.4. SENSORES

#### Sensor de corriente por efecto Hall

Es una sonda que funciona mediante el efecto Hall con 3 pines (ver Figura 26): los polos positivo y negativo de la tensión (soporta  $\pm 15V$ ) y la salida de la corriente que se desea medir. Se conoce como efecto Hall a la aparición de un campo eléctrico por separación de cargas, en el interior de un conductor por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético con componente perpendicular al movimiento de las cargas.

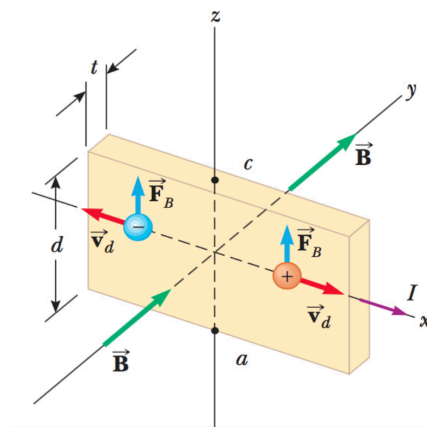


Figura 25: Esquema del funcionamiento del Efecto Hall

Para observar el efecto Hall, se aplica un campo magnético a un conductor que transporta corriente. Cuando  $I$  tiene la dirección  $x$  y  $B$  la dirección  $y$ , tal y como se muestra en la Figura 25, los portadores de cargas tanto positivas como negativas se desvían hacia arriba en el campo magnético. La tensión Hall se mide entre los puntos a y c [16].

Esta medición de la corriente se podría realizar también mediante un microcontrolador Arduino, el cual se ha implementado en controles de corriente en proyectos de levitación. Esto tiene el inconveniente de que el orden de magnitud de la corriente de salida es de mili-amperios, haciendo necesaria la utilización de algún componente que transforme esta corriente, por ejemplo, una Motor Shield [16].

El sensor de corriente se conecta mediante interfaz SPI, y necesita una resistencia *shunt* a la salida, pues la medida deseada es la tensión ( $V_{\text{medida}} = I_{\text{salida sonda}} \cdot R_{\text{shunt}}$ ). La resistencia escogida es de  $100\Omega$ .



Figura 26 Sensor de corriente de efecto Hall

Para poder llevar los  $\pm 15V$  a la sonda, es necesario un conversor DC/DC (véase la Figura 27) para transformar los 24V de la fuente de tensión a una tensión dual de  $\pm 15V$ . Este conversor es un conversor de 6W DC/DC, con salida  $\pm 15V$  y  $\pm 200mA$ .



Figura 27 Conversor DC/DC Traco Power 18-36V a  $\pm 15V$

### Sensor de posición

El LightRanger click (Figura 28) incorpora un módulo de detección mediante luz infrarroja de proximidad de tiempo de vuelo y luz ambiental. Este sensor se conecta mediante  $i^2C$  y mide el alcance absoluto de manera precisa hasta 100mm.



*Figura 28 Sensor de posición por efecto de la luz*

## 5.5. ACTUADORES

### Electroimán

El principal actuador del sistema es el electroimán. Éste, se encarga de variar la tensión de la bobina para cambiar el campo magnético y, con él, la fuerza magnética que ejerce sobre la carga. La nueva tensión que debe aplicar en cada momento le llega del control. Para variar el valor medio de la tensión aplicada a la bobina, es necesario utilizar un generador de pulsos (PWM), de tal forma que vaya variando el factor de servicio de la onda cuadrada y así, obtener la tensión deseada en cada momento.

El DC Motor 3 Click con procesador Toshiba TB6549FG (ver Figura 29) de MikroE, consiste en un generador de PWM con dos entradas y dos salidas, compatible con la Click Shield. La entrada se obtiene de la fuente de alimentación de 24V y la salida será entre 3,3-5V.



Figura 29 Generador de PWM (DC Motor 3 click)

La salida va directamente a los terminales de la bobina, aunque pasando por la sonda de efecto Hall para medir la corriente y utilizarla en el lazo interno del control. En la Figura 30, se muestra la señal medida con el osciloscopio del PWM generado para un factor de servicio de 0,2.

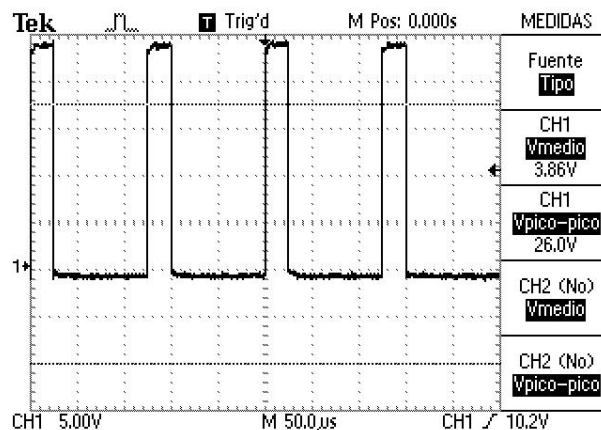


Figura 30: Señal de PWM para un factor de servicio de 0,2

Seguidamente, la medida de la intensidad de la sonda multiplicada por su correspondiente resistencia *shunt*, es enviada al conversor analógico digital (ADC) que, posteriormente, recibirá la Raspberry pi para seguir con el lazo de control.

El conversor analógico digital para registrar en la Raspberry pi la medida de la corriente a la salida de la sonda, con una precisión de 12 bits, está en la Figura 31. El ADC utilizado es uno de 4 canales, aunque sólo se utilizará uno de ellos.

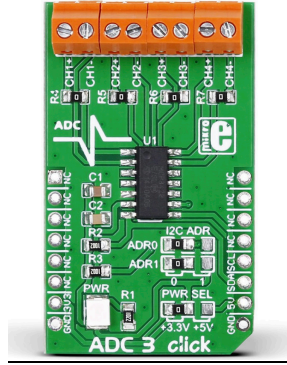


Figura 31 ADC 3 click con microchip MCP3428

La tensión medida por el ADC, se puede pasar a términos de corriente gracias a la medida de la intensidad de salida de la sonda ( $i_{sonda}$ ) que se multiplica por la resistencia a su salida ( $R_{shunt}$ ). Teniendo en cuenta que el cable da 5 vueltas a la sonda ( $N$ ) y ésta contiene una transformación de 1:1000 con su salida, se puede calcular la intensidad que circula por el cable, mediante la ecuación (5.2).

$$V_{ADC} = i_{sonda} \cdot R = I_{cable} \cdot N \cdot \frac{1}{1000} \cdot R_{shunt} \quad (5.1)$$

$$I_{cable} = \frac{1000 \cdot V_{ADC}}{N \cdot R_{shunt}} \quad (5.2)$$

## 5.6. ETAPA DE POTENCIA

Una fase de vital importancia en el proyecto es la etapa de potencia del levitador. Esta etapa determina todo el proceso de adaptación de tensiones y de conversiones analógico/digitales para que la Raspberry pi procese la información de los sensores.

La fuente de alimentación utilizada es de 24V DC. Esta fuente sirve de alimentación tanto para la Raspberry pi como para el generador de PWM. Para alimentar el microcontrolador, es necesario un conversor AC/DC, que además contenga un transformador de tensión (de 24V a 5V), véase la Figura 32.

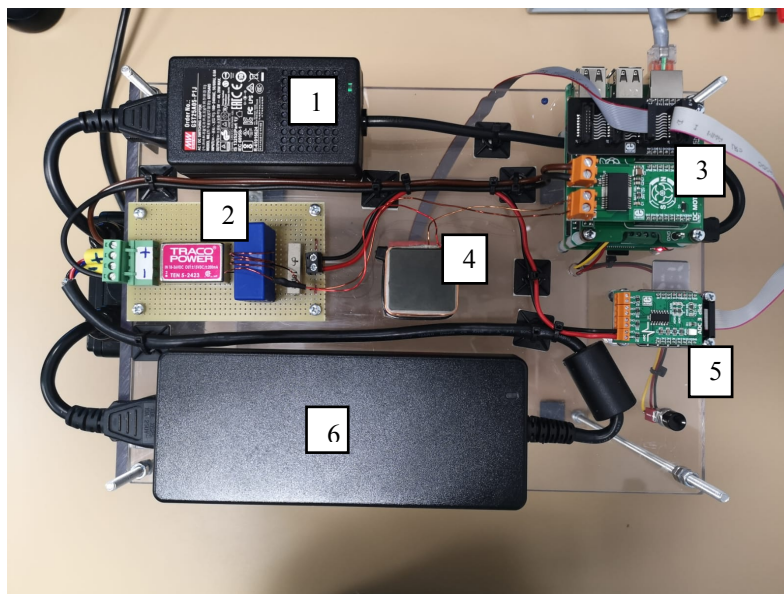


*Figura 32 Conversor AC/DC (Input: 100-240VAC; Output: 5V, 4A)*

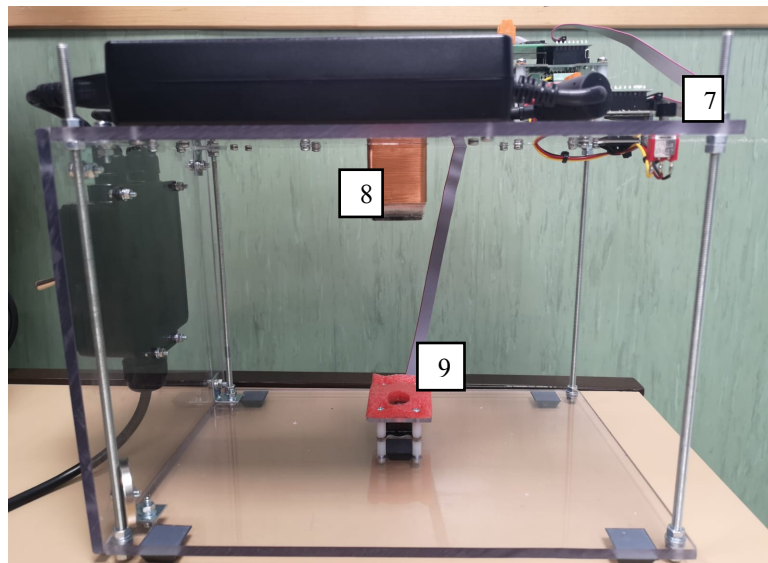
Para alimentar el generador de PWM se puede utilizar directamente la fuente de 24V, aunque, como se ha explicado en el apartado de sensores, es necesario un conversor DC/DC a la salida del Motor 3 Click, pues la sonda de corriente de efecto Hall necesita tensiones de alimentación de  $\pm 15V$ .

## 5.7. MONTAJE

El montaje físico de todas las componentes del proyecto responde a una estructura ordenada y sistemática, mostrada en las Figuras 33 y 34, donde se numeran y explican todas las partes.



*Figura 33 Montaje físico del levitador, vista desde arriba*



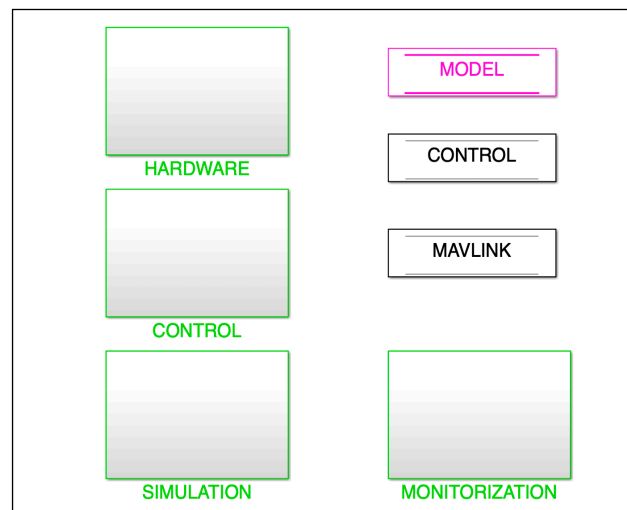
*Figura 34 Montaje del levitador, vista de la bobina y el sensor de posición*

- 1) Conversor AC/DC para alimentar el microprocesador
- 2) Circuito para medir corriente (convertor DC/DC, sonda efecto Hall y resistencia *shunt*)
- 3) Generador de PWM
- 4) Bobina (vista superior)
- 5) ADC
- 6) Fuente de alimentación 24V
- 7) Pulsador
- 8) Bobina (vista inferior)
- 9) Sensor de posición

## 6. SOFTWARE

### 6.1. HERRAMIENTA DE SIMULINK

Como ya se ha mencionado anteriormente, el desarrollo del software del proyecto se ha realizado mediante las herramientas de MatLab/Simulink, concretamente la versión 2018b. En cuanto a la estructura superior del software, el modelo de Simulink está en la Figura 35. Contiene cuatro bloques principales, Hardware, Control, Simulation y Monitorization.



*Figura 35 Estructura Simulink*

Los buses *MODEL*, *CONTROL* y *MAVLINK* son los encargados de mandar las señales, parámetros y salidas entre los distintos bloques. Su función no es más que la de transmitir la información entre los bloques.

Dentro del bloque de Hardware, están los bloques con los diagramas de los sensores (el de posición, el ADC que recibe la medida de la tensión, y el pulsador) y de los actuadores (el generador de PWM). Tanto el sensor de posición como el ADC están conectados con el microprocesador mediante comunicación i2C. El protocolo i2C tiene un funcionamiento mediante la designación de un Máster (en este caso la Raspberry pi) y varios esclavos, que serían el ADC y el sensor de posición. Para ello, es importante el bloque de comunicación de i2C y el generador de PWM de Simulink (Figuras 36 y 37).





Figura 36 Bloque de comunicación i2C



Figura 37 Bloque generador de PWM

El bloque de Control contiene la máquina de estados que lleva la secuencia del control (descrita en el apartado anterior) y una función llamada *Control Update* cuyo objetivo es actualizar el mando que se debe enviar al actuador para el control de posición, que en este caso es una tensión. También calcula la salida del EKF. Todos los bloques de funciones implementadas en Simulink se realizan mediante funciones de MatLab, como se muestra en la siguiente Figura 38.

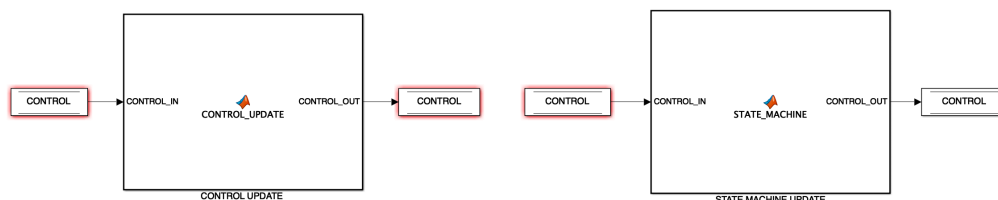


Figura 38 Estructura del bloque de Control de Simulink

El bloque de Simulación es el que contiene la planta del proyecto, desarrollada en los primeros apartados de este informe. La principal utilidad de esta estructura de bloques es que se pueden hacer simulaciones comentando el bloque de hardware, o implantación directa del control en el microprocesador comentando el bloque de simulación. Éste último, se utiliza para realizar todas las simulaciones sin afectar al sistema real, pudiendo incluso simular las medidas introduciendo ruido en ellas. Ver Figura 39.

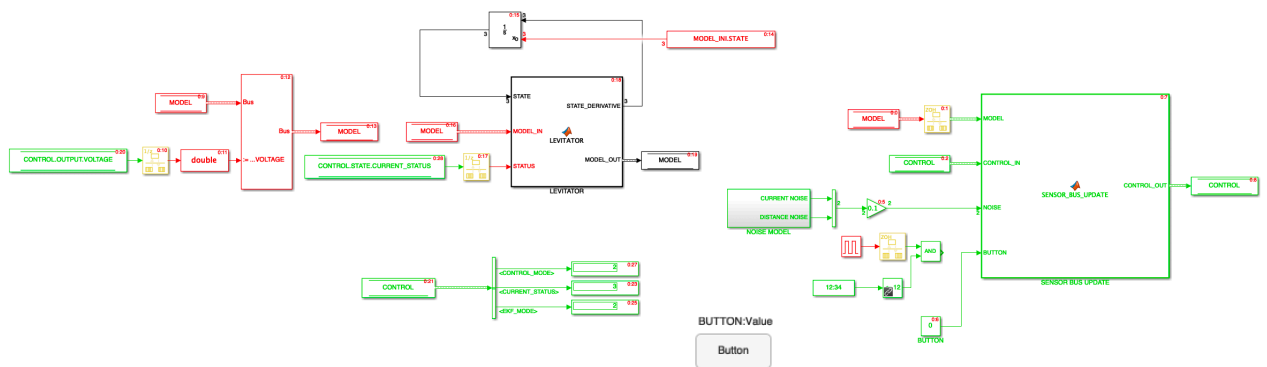


Figura 39: Esquema de Simulink del bloque de simulación

Por último, pero no menos importante, está el bloque de Monitorización (Figura 40), que sirve para poder ver la respuesta temporal en tiempo real de todas las entradas y salidas del sistema. Este bloque tiene varios sub-bloques, entre los cuales se encuentran los *Simulation scopes* y los *External scopes*. Los primeros son los que muestran los resultados de las simulaciones y los segundos, el resultado de implantar el control en hardware en tiempo real.

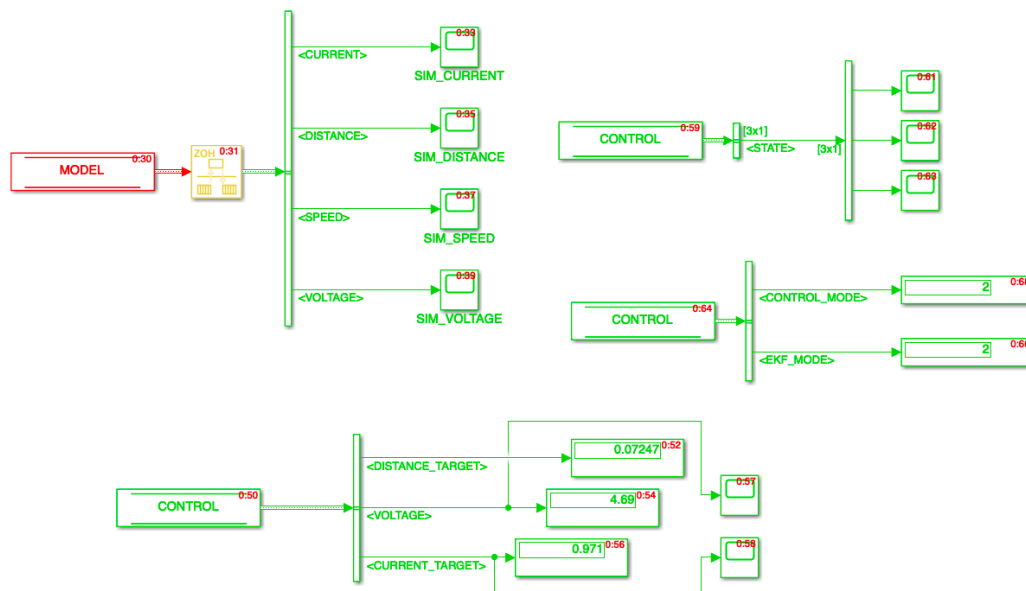


Figura 40: Monitorización de las simulaciones

Cabe destacar que, para la monitorización del control en modo externo, se ha realizado un cálculo de la fuerza resultante, es decir, de la resta entre el peso y la fuerza magnética ( $m \cdot g - K_m \cdot i_{medida} / z^4$ ), para vigilar en tiempo real en qué punto se anulaban.

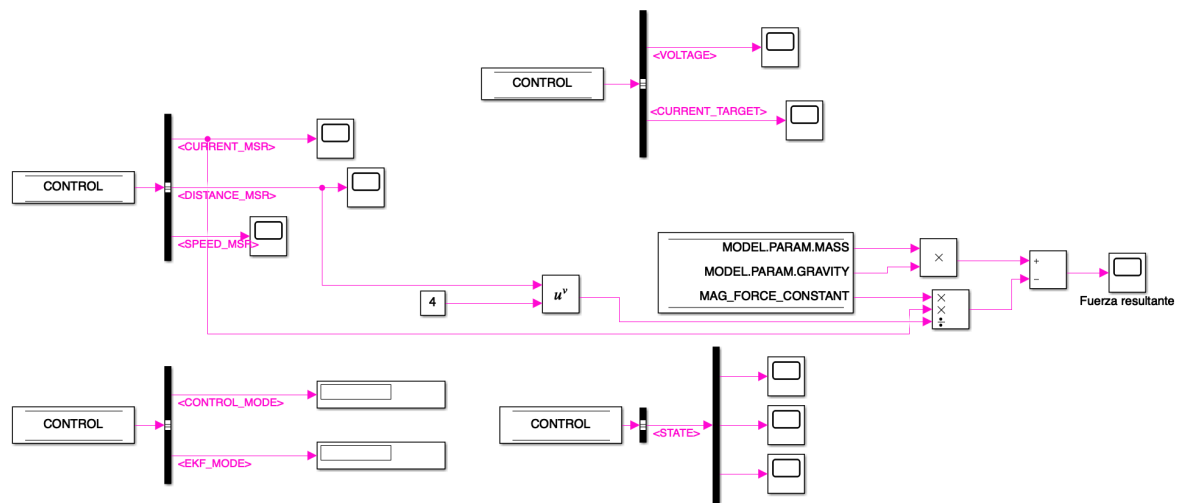
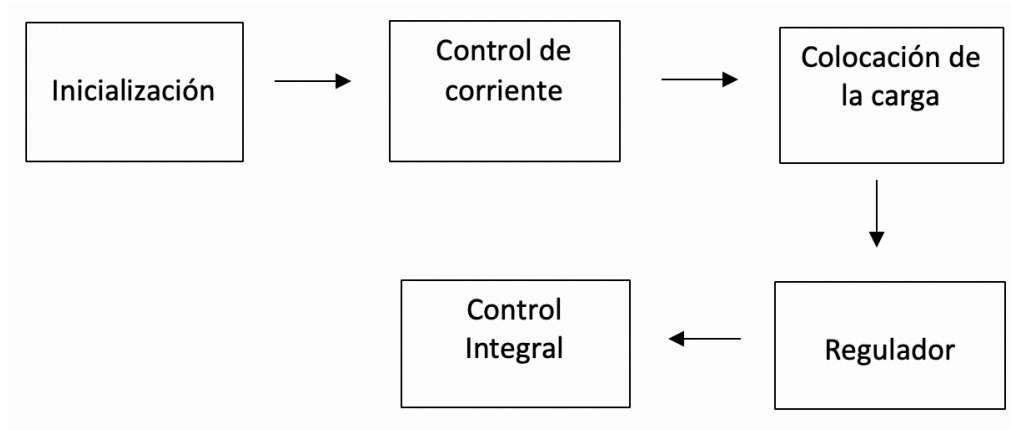


Figura 41: Monitorización en modo externo

Se puede observar, que en la monitorización en modo hardware (Figura 41), las gráficas se cogen del bus de control, mientras que, para ver la simulación, hace falta sacar gráficas del bus del modelo.

## 6.2. MÁQUINA DE ESTADOS

El proyecto consta de una máquina de estados que maneja el circuito de forma secuencial, es decir, que cada estado corresponde a una “fase” por la que tiene que pasar el levitador para, finalmente, controlar la posición del imán. El levitador consta de 5 estados: inicialización, control de corriente, colocación de la carga, regulador y control integral. A continuación, se explicará gráficamente en la Figura 42.



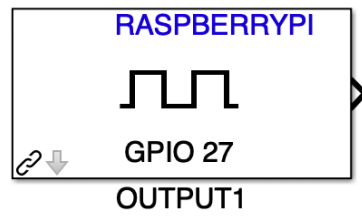
*Figura 42: Estructura de la máquina de estados*

Durante cada estado, se van regulando tanto la tensión de salida como la situación del control y del EKF. En el estado de inicialización, se pone a cero la tensión en la bobina, y no actúan ni el control ni el EKF. Después, se realiza el control de corriente, que corresponde al lazo interno del control en cascada, teniendo como referencia el punto de operación de corriente. Esto se realiza para hallar el mando necesario de tensión que hay que aplicar para posteriormente controlar la posición del imán. Ahora, se coloca la carga en el punto de operación, desde donde el EKF comienza a estimar los estados de posición, corriente y velocidad. Una vez el estimador ha convergido, se procede a regular con el control, pero sin acción integral.

El orden de los estados es importante, pues conviene aplicar primero un control sin la parte integral, pues mientras el usuario sujeta el imán, el control lee una diferencia de posición con el punto de operación. Esta diferencia, si se hace uso de un control integral, se iría acumulando, y por tanto, al soltar el imán se aplicaría un mando mucho mayor del necesario, pudiendo llegar a saturar el control, y por supuesto, no funcionaría el dispositivo.

Cuando ya se ha alcanzado la estabilidad al soltar la carga, se puede pasar al siguiente estado, el cual ya aplica el control en cascada completo.

Cabe destacar, que la transición entre los distintos estados se realiza mediante un pulsador conectado a la Raspberry pi mediante sus puertos GPIO (Figura 43). Aunque a partir del estado de inicialización, también hay requisitos de tiempo para pasar de estado.



*Figura 43 Conexión del pulsador mediante puerto GPIO27*

## 7. RESULTADOS

En este apartado se resumen los resultados en simulación y en tiempo real con sus correspondientes gráficas, además de explicarse un análisis económico del material y recursos utilizados.

### 7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los puntos que resumen los resultados del proyecto son:

- Se ha conseguido mejorar el diseño del hardware de proyectos anteriores: la medición de la corriente con la sonda efecto Hall, la nueva fuente de 24V, más moderna y robusta que anteriores y quizá el nuevo modelo de microprocesador.
- Se ha logrado diseñar un control estable en simulación, aunque quizá muy ruidoso y brusco para el funcionamiento del levitador.
- Se ha logrado una correcta implantación del control, pudiendo observar en tiempo real las mediciones de todos los sensores, con sus correctas estimaciones por parte del EKF.

A pesar de haber cumplido la mayoría de los objetivos propuestos, cabe destacar que no se logró mantener la posición del imán a una distancia constante de la bobina, seguramente debido a la obtención de un modelo sensiblemente más sencillo y aproximado de lo que es en realidad el sistema del levitador.

De todas formas, se puede demostrar el funcionamiento del control de corriente, comparándolo con el hallado previamente en simulaciones. El regulador de posición no llegó a funcionar, debido a la falta de potencia del sistema, pues no fue capaz de dar la fuerza necesaria para sostener el imán. Se puede observar en la Figura 44 ambos flancos de la corriente. El primero corresponde al paso del primer estado (inicialización) al estado de control de corriente, en el cual alcanza el punto de operación ( $\approx 1\text{A}$ ). El segundo flanco muestra el paso al estado del regulador, donde aumenta sensiblemente la corriente, aunque fracasando en superar la fuerza del peso del imán.

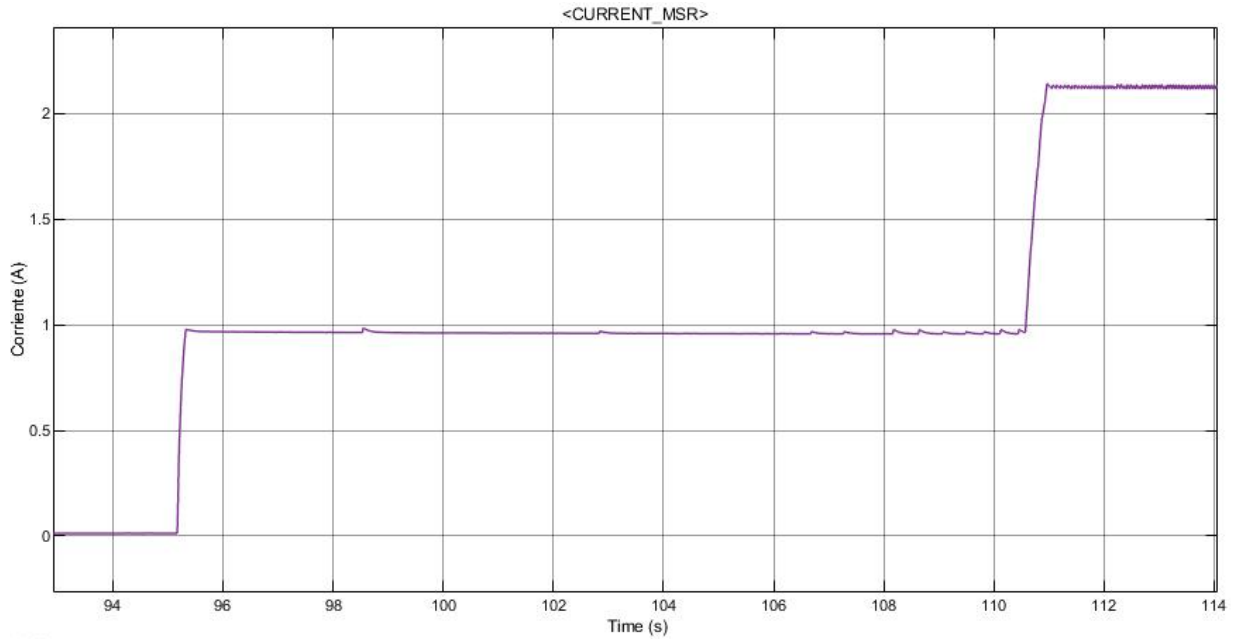


Figura 44: Respuesta de la medida de corriente durante el control interno de corriente

En cuanto al modelo propuesto, se han encontrado otros posibles modelos más complejos, que quizá se adapten mejor al sistema no lineal de este proyecto. Por ejemplo, en el Centro de Investigación y estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México D.F., la ecuación de la fuerza magnética viene dada por la derivada espacial de la co-energía magnética de la bobina. Además, el modelo tiene en cuenta la variación del valor de la inductancia de la bobina con respecto a la distancia al electroimán [18]. Al final, el valor de la fuerza electromagnética que actúa sobre el imán es:

$$F_m = \frac{-L_r}{2a} \cdot i^2 \cdot e^{\frac{-x}{a}} \quad (7.1)$$

## 7.2. ANÁLISIS ECONÓMICO

El coste de los componentes, herramientas y mano de obra utilizados en el proyecto se resume a continuación en las siguientes tablas.

### Componentes principales

| Componente                             | Precio (€) |
|----------------------------------------|------------|
| <b>Raspberry pi 3 model B+</b>         | 38,82      |
| <b>Pi 2 Click Shield</b>               | 7,13       |
| <b>Motor 3 Click (generador PWM)</b>   | 16,94      |
| <b>ADC 3 Click</b>                     | 19,61      |
| <b>Sensor de posición mediante IR</b>  | 19,99      |
| <b>Conversor AC/DC (24V-5V)</b>        | 27,10      |
| <b>Conversor DC/DC (24V-±15V)</b>      | 24,85      |
| <b>Fuente de alimentación 24V DC</b>   | 104,45     |
| <b>Sonda corriente por efecto Hall</b> | 21,16      |
| <b>Bobina con hilo de cobre</b>        | 11,93      |
| <b>Protoboard</b>                      | 0,50       |

*Tabla 7.1 Costes de las componentes principales*

### Equipo y herramientas

| Componente                       | Precio (€) |
|----------------------------------|------------|
| <b>Ordenador</b>                 | 499,00     |
| <b>Soldador</b>                  | 7,48       |
| <b>Osciloscopio de 2 canales</b> | 456,00     |
| <b>Multímetro</b>                | 19,70      |
| <b>Otras herramientas</b>        | 49,00      |

*Tabla 7.2 Costes del equipo y herramientas*



### Mano de obra

| Tarea                             | Horas | €/hora |
|-----------------------------------|-------|--------|
| <b>Montaje del hardware</b>       | 3     | 20,00  |
| <b>Diseño del control</b>         | 50    | 40,00  |
| <b>Simulaciones y pruebas</b>     | 300   | 60,00  |
| <b>Documentación del proyecto</b> | 50    | 40,00  |

*Tabla 7.3 Costes mano de obra*

### Software

| Herramienta            | Precio (€) |
|------------------------|------------|
| <b>MatLab/Simulink</b> | 125,00     |

*Tabla 7.4 Costes software*

### Presupuesto general

| Concepto                       | Coste (€)        |
|--------------------------------|------------------|
| <b>Componentes principales</b> | 292,48           |
| <b>Equipo y herramientas</b>   | 1031,18          |
| <b>Mano de obra</b>            | 22.060,00        |
| <b>Software</b>                | 125              |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>23.508,66</b> |

*Tabla 7.5 Presupuesto general del proyecto*

## 8. CONCLUSIONES

### 8.1. APORTACIONES

Para concluir el proyecto, cabe destacar la aportación de un nuevo control, en realimentación de estados adaptado a un control en cascada, con un hardware moderno y robusto capaz de hacer levitar el imán. Quizá podría servir en el ámbito de la docencia para futuras generaciones.

Para futuros proyectos, se debería estudiar el modelo con más detalle. Además, cabe la posibilidad de utilizar otro tipo de imán, quizá más pequeño o de otro material, pues la carga utilizada en este proyecto tiene un imán demasiado potente, por lo que la fuerza del imán domina claramente a la que ejerce el electroimán (manipulable).

### 8.2. FUTUROS DESARROLLOS

Para futuros desarrollos siguiendo la línea de la levitación, una propuesta es la utilización de un imán con menos superficie, ya que en este proyecto una de las dificultades fue lidiar con el “efecto bordes”, reflejado en la Figura 45, del campo magnético producido, dada la superioridad de la superficie del imán con respecto al electroimán. Este efecto hace que el imán tienda a girarse al circular intensidad por la bobina.

Otra medida para solucionar este problema, es reducir drásticamente la distancia de entrehierro, para que las líneas de campo magnético sean perpendiculares al imán, minimizando así el “efecto bordes”.

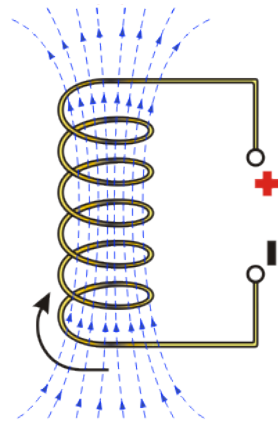


Figura 45: Efecto bordes de un campo magnético producido por un solenoide

También, se teoriza sobre la posibilidad de implantar un levitador donde el imán esté situado en el interior del solenoide, como en la Figura 46. Ciertamente, que las líneas de campo magnético en un punto interior de un solenoide son más débiles, aunque se anulan los efectos de las líneas inclinadas de campo, siendo éste perpendicular al imán en toda su superficie [18].

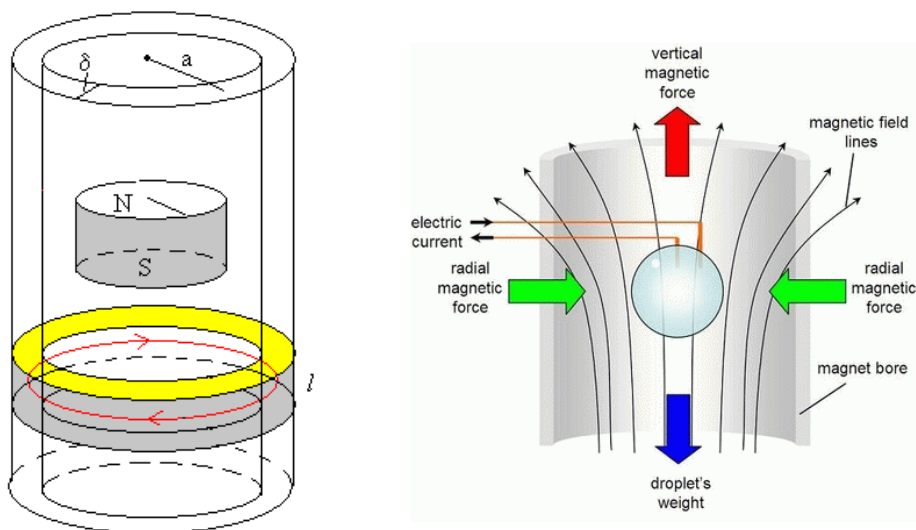


Figura 46: Levitación en el interior de un solenoide

## 9. REFERENCIAS

- [1] P. S. Bas, «Diseño y construcción de un levitador magnético. Trabajo de Fin de Grado. ETSI-ICAI, Universidad Pontificia Comillas,» 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11531/21660>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [2] A. M. H. Sanchez y F. A. E. Hernandez, «Aplicación y comparación de distintas leyes de control a un sistema de levitación magnética,» Proyecto de Ingeniería Computacional, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2004.
- [3] G. Perren, «Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética,» Universidad Nacional del Rosario, 2003. [En línea]. Available: <https://www.yumpu.com/es/document/view/12710988/estudio-de-las-aplicaciones-practicas-de-la-levitacion-magnetica->. [Último acceso: Julio 2019].
- [4] P. Zhao, J. Xie, F. Gu, N. Sharmin, P. Hall y J. Fu, «Separation of mixed waste plastics via magnetic levitation,» Waste Management, Elsevier, 2018.
- [5] L. Hyung-Woo, K. Ki-Chan y J. Lee, «Review of Maglev Train Technologies,» vol. 42, IEEE Transactions on Magnetics, 2006.
- [6] H.-S. Han y D.-S. Kim, «Magnetic Levitation,» de *Maglev Technology and Applications*, vol. 13, Springer.
- [7] SpaceX, «Hyperloop Alpha,» 2013. [En línea]. Available: [https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha.pdf](https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf). [Último acceso: Febrero 2019].
- [8] A. Beléndez, «La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell,» *La Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 30, n° 2, pp. 2601.1-2601.20, 2008.
- [9] T.H.Wong, «Design of a Magnetic Levitation Control System - An undergraduate Project,» *IEEE Transactions on Education*, vol. E29, n° 4, pp. 196-200, November 1986.
- [10] K. Vineet, B. Nakra y A. Mittal, «A Review on Classical and Fuzzy PID Controllers,» *International Journal of Intelligent Control and Systems*, vol. 16, n° 3, pp. 170-181, 2011.
- [11] R. P. Moreno, «Evolución Histórica de la Ingeniería de Control,» 1999. [En línea]. Available: <http://automata.cps.unizar.es/regulacionautomatica/historia.PDF>. [Último acceso: March 2019].
- [12] M. Romasanta, «Estudio y aplicación del Filtro de Kalman en fusión de sensores UAVs,» Trabajo de Fin de Grado, ETSI-Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.

- [13] J. C. Milena, R. M. Fernandez Canti, S. Zarza Sanchez y T. Caisaguano Vásquez , «Prácticas de Control presenciales y remotas con levitador magnético,» Barcelona, 2011.
- [14] N. Z. a. T. L. M. Sotnikova, «Control Systems Analysis and Design Labs with Educational Plants,» *Elsevier*, vol. 45, nº 11, pp. 212-217, 2012.
- [15] «Blog sobre Innovación y Tecnología,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.i2bc.es/utilidades-de-los-iman-es-de-neodimio/>. [Último acceso: Junio 2019].
- [16] J. S. Garcia Hernandez, G. A. Garzon Diaz y J. A. Torres Lasso, «Levitación Magnética mediante múltiples bobinas. Trabajo de Fin de Grado,» Universidad de San Buenaventura, Bogotá, 2015.
- [17] J. P. B. Marne, «Trabajo de Fin de Grado: Diseño, estudio y construcción de un levitador magnético con Arduino, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona,» Barcelona, 2016.
- [18] P. C. Francisco, «Control de un sistema de levitación magnética con compensación de redes neuronales,» Centro de Investigación y estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2009.
- [19] L. Zyga, «Spinning Water Droplets Could Provide Insights into Black Holes, Atomic Nuclei,» *Phys Org.*, 15 December 2008. [En línea]. Available: <https://phys.org/news/2008-12-droplets-insights-black-holesatomic.html>. [Último acceso: July 2019].

## ANEXO 1

Raspberry pi 3 model B+

<https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>

Pi 2 Click Shield

<https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click-shields/pi-2-shield/pi-2-click-shield-schematic-v100.pdf>

Sonda de corriente por Efecto Hall

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/0030/0900766b800304b6.pdf>

Conversor DC/DC

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/16ee/0900766b816eeba4.pdf>

Light Ranger Click

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/15a7/0900766b815a7a1c.pdf>

Motor 3 Click

Microchip Toshiba TB6549FG

<https://download.mikroe.com/documents/add-on-boards/click/dc-motor-3/dc-motor-3-click-schematic.pdf>

ADC 3 Click

Microchip MCP3428

Conversor AC/DC

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/14f3/0900766b814f3a0a.pdf>

Fuente alimentación 24V

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1327/0900766b81327f9c.pdf>