

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERCO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



Diseño y construcción del prototipo de un banco de pruebas de levitación magnética para CubeSats

Emilio André Luchsinger Bertolotto

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Ing. Sheila Lascano Farak

Profesor Correferente: PhD. Rodrigo Cassineli Palharini

Noviembre 2021

Resumen

Por medio del trabajo expuesto en la presente memoria, se realizó el diseño de detalles de un banco de pruebas de levitación magnética, para ser utilizado durante el desarrollo de nanosatélites “CubeSat”. El diseño fue calculado utilizando simulaciones por elementos finitos, y se fabricó un prototipo a escala 1:10, con el cual se probaron los diferentes sistemas de sensores y control, por medio de pruebas empíricas, obteniendo resultados que indican la viabilidad del funcionamiento de un banco de pruebas a escala real, teniendo en cuenta de algunas mejoras necesarias para asegurar un funcionamiento óptimo.

Abstract

In the preset work, the design of a magnetic test bench was carried out to test and simulate a CubeSat under microgravity conditions. The design was established using finite elements simulations and testes with a 1:10 scale prototype that was manufactured. The position sensor and control system were tested with said prototype trough empirical tests. The results obtained showed the plausibility of upscaling the prototype to work with real size CubeSats, considering some improvements to ensure a reliable performance.

Glosario

- ANSYS Discovery AIM: Programa de diseño, con capacidades de simulación de fenómenos físicos.
- AWG: *American Wire Gauge* es un sistema de estandarización para definir el diámetro de cables conductores.
- Bit: Unidad de medida de cantidad de información.
- CubeSat: Tipo de satélite miniatura, compuesto de uno o más módulos cúbicos de 10 cm x 10 cm x 10 cm.
- Electroimán: Imán artificial que consta de un núcleo de hierro dulce rodeado por una bobina por la que pasa una corriente eléctrica.
- Gauss: Unidad de inducción magnética en el sistema cegesimal.
- Imán permanente: Un imán permanente es material que puede proporcionar flujo magnético cuando se magnetiza con un campo magnético aplicado y su capacidad de magnetismo se caracteriza por dos parámetros clave: remanencia y coercitividad.
- LDR: *Light-dependent resistor* es una resistencia, la cual varía según la intensidad lumínica que recibe.
- LED: *Light emitting diode* es un semiconductor capaz de emitir luz cuando fluye corriente a través de él.
- Levitar: Elevarse en el espacio sin intervención de agentes físicos conocidos.
- Neodimio: Elemento químico, el cual en combinación con hierro y boro son utilizados para fabricar imanes permanentes.
- Obstrucción: Impedimento para el paso del haz de luz.
- PID: Controlador Proporcional-Integral-Derivativo de lazo cerrado.
- PTFE: Politetrafluoroetileno, más conocido como teflón. Es un polímero utilizado para diversas aplicaciones.
- PWM: *Pulse width modulation* es un método de reducir la

potencia promedio entregada por una señal eléctrica, entregando pulsos de una duración determinada.

- Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa.
- Setpoint: Valor específico que se espera mantener o se desea alcanzar.
- Superalloy: Aleación compuesta de níquel, hierro y molibdeno, que tiene una gran permeabilidad magnética y de amplia aplicación en núcleos magnéticos.
- T-Slot: Sistema de construcción estructural, en el cual se utilizan vigas cuadradas o rectangulares de aluminio, con ranuras en forma de T.

Tabla de contenido

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Glosario.....	iii
Tabla de contenido.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	ix
Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Objetivo principal.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. Capítulo 1.....	3
1.1. Estado del arte.....	3
1.2. Marco teórico – Sistema de control PID.....	5
2. Capítulo 2 – Diseño conceptual.....	7
2.1. Definición del problema.....	7
2.2. Descripción del banco de pruebas.....	7
2.3. Listado de atributos.....	8
2.4. Análisis funcional.....	9
Árbol de funciones.....	9
Diagrama de caja negra.....	10
Diagrama de caja transparente.....	11
2.5. Listado de requerimientos.....	12
2.6. Carta morfológica.....	13
2.7. Selección de conceptos.....	14
Bocetos.....	14
Matriz de selección.....	20
2.8. Selección de materiales.....	21
Estructura.....	21
Electroimán.....	22
Cableado y conexiones.....	22
2.9. Arquitectura de producto.....	23
2.10. Diseño preliminar.....	23

3.	Capítulo 3 – Diseño de detalles.....	28
3.1.	Estructura	29
3.2.	Anclajes.....	30
3.3.	Electroimán	31
3.4.	Sensor de posición	34
3.5.	Filtro de Kalman	36
3.6.	Sistema de control.....	38
4.	Capítulo 4 – Prototipo y Resultados	46
4.1.	Prototipo.....	46
	Fuente de poder.....	47
	Sensor de posición	48
	Electroimán	55
4.2.	Planos.....	57
5.	Conclusión y recomendaciones.....	61
	Referencias.....	62

Lista de Figuras

Figura 1: Lazo de control PID.	5
Figura 2: Esquema de componentes que conforman el banco de pruebas	8
Figura 3: Árbol de funciones para el banco de pruebas de levitación magnética.	10
Figura 4: Diagrama de caja negra, indicando flujos de entrada y salida al sistema.	11
Figura 5: Diagrama de caja transparente.....	11
Figura 6: Boceto 1.....	14
Figura 7: Boceto 2.....	16
Figura 8: Boceto 3.....	17
Figura 9: Imagen referencial de la estructura del banco de pruebas de levitación magnética.	23
Figura 10: Estructura del banco de pruebas con dimensiones preliminares.	24
Figura 11: Concepto de montaje electroimán.	25
Figura 12: Aislación de vibraciones y ajuste en la base de la estructura.	25
Figura 13: Electroimán, dimensiones referenciales.	26
Figura 14: Sensor de posición, concepto.	27
Figura 15: Imagen del diseño final y layout del equipo.....	28
Figura 16: Anclaje anti-vibraciones.....	30
Figura 17: Representación simplificada electroimán.....	33
Figura 18: Esquema explicativo del sensor de posición en vista superior y lateral.	35
Figura 19: Estructura de montaje sensor de posición.....	36
Figura 20: Diagrama de sistema de levitación. v: tensión en la bobina; R: resistencia de la bobina; L: inductancia de la bobina; i: corriente en la bobina; d: distancia.....	39
Figura 21: Circuito sistema control y actuador.....	41
Figura 22: Bloque de control PID Simulink.	42
Figura 23: Respuesta de controlador luego de la sintonización.....	43
Figura 24: Simulación de control PID con perturbaciones en el sistema.....	44
Figura 25: Vista ampliada entre 0,249 y 0,253 segundos de la simulación.	45
Figura 26: Electroimán atrayendo un imán permanente.	47
Figura 27: Fuente de poder.	48
Figura 28: Sensor de posición prototipo.	48
Figura 29: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. LDR 1 MOhm.....	49
Figura 30: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. LDR 10 MOhm.....	50
Figura 31: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. 4,7 kOhm descarga.....	50
Figura 32: Oscilación péndulo simple $l = 50$ [mm].	52
Figura 33: Oscilación péndulo simple $l = 200$ [mm].	52
Figura 34: Oscilación péndulo simple $l = 800$ [mm].	52
Figura 35: Ampliación de pulso, péndulo $l = 50$ [mm]......	53
Figura 36: Comparativo de señal filtrada y original. Señal original multiplicada por 10 y graficado en escala logarítmica.....	54
Figura 37: Detalle de comparativo del efecto del filtro de Kalman aplicado.	54
Figura 38: Electroimán prototipo.....	56

Figura 39: Imagen referencial de plano de estructura y conjunto.	57
Figura 40: Imagen referencial de plano de electroimán.	58
Figura 41: Imagen referencial de plano del soporte electroimán.	58
Figura 42: Imagen referencial de plano del soporte de la estructura.	59
Figura 43: Imagen referencial de plano del soporte para el CubeSat.	59
Figura 44: Imagen referencial de plano de la estructura para el sensor de posición.	60

Lista de Tablas

Tabla 1: Listado de atributos de diseño.	9
Tabla 2: Listado de requerimientos básicos.	12
Tabla 3: Carta morfológica de componentes	13
Tabla 4: Especificación técnica concepto 1	15
Tabla 5: Especificación técnica concepto 2	16
Tabla 6: Especificación técnica concepto 3	18
Tabla 7: Matriz de selección de conceptos	20
Tabla 8: Listado de partes, posiciones principales.	29
Tabla 9: Resultados de simulación EF electroimán.	32
Tabla 10: Valores numéricos de las cantidades físicas utilizadas en el diseño.	40
Tabla 11: Resultados de sintonización controlador PID en MatLab Simulink.	43

Introducción

Por medio de la iniciativa de lanzamientos de pequeños satélites, conocidos como CubeSats, la NASA ha abierto la posibilidad a diferentes organizaciones e instituciones, como universidades, para lograr el lanzamiento de sus propios CubeSats. [1]

Al igual que en otros países del mundo, el interés por la carrera espacial ha ido en aumento, permitiendo el desarrollo de nanosatélites de fabricación nacional, como por ejemplo el CubeSat SUCHAI, fabricado en la Universidad de Chile, el que fue lanzado al espacio durante el año 2017. [2]

A partir de esta posibilidad, es que en la universidad se ha creado un equipo de trabajo con el fin de promover y desarrollar la carrera espacial chilena. USM CubeSat Team ya trabaja en el diseño de un nanosatélite, por lo que el diseño de un banco de pruebas, para simular condiciones similares de microgravedad a las que estarán sometidos estos satélites una vez que sean lanzados al espacio será un gran aporte para el desarrollo del equipo.

Objetivos

Objetivo principal

Diseñar y construir prototipo de banco de pruebas de levitación magnética.

Objetivos específicos

- Construir electroimán para levitación.
- Implementar sistema de control de levitación.
- Implementar sistema de control de estabilidad durante la levitación.

1. Capítulo 1

1.1.Estado del arte

La levitación magnética es un método por el cual un objeto es suspendido sin el uso de soportes, solo con campos magnéticos. Las fuerzas magnéticas son utilizadas para contrarrestar los efectos de la aceleración de gravedad, y cualquier otra aceleración como vibraciones. [3]

En general, la levitación magnética puede ser clasificada en dos tipos, sistemas de atracción electromagnética y sistemas de repulsión electrodinámica. Los sistemas de atracción requieren del uso de electroimanes para mantener una separación constante entre dos objetos, ajustando constantemente la corriente que fluye por la bobina. Por lo que es indispensable contar con un lazo de control cerrado para estabilizar la levitación [4].

La levitación magnética es un fenómeno que ha sido ampliamente estudiado y ha tenido gran relevancia en la industria del transporte, formando parte del desarrollo que los trenes de alta velocidad han experimentado para poder superar los límites físicos de las ruedas y los rieles [4].

En el caso de un tren, es posible reemplazar dos de sus principales componentes, las ruedas y la suspensión, utilizando un sistema de levitación magnética, el cual por medio de campos magnéticos es capaz de generar la fuerza necesaria para cumplir ambas funciones, sin contacto entre el riel y el tren [4].

Los sistemas de levitación magnética han tenido un gran avance gracias al desarrollo de los trenes de alta velocidad, pero no solo se utilizan en este ámbito. También se utiliza en el área biomédica, en la manufactura de circuitos integrados de sistemas de fotolitografía, para medir dimensiones con resolución subatómica, entre muchas otras [5]. Dentro de los variados usos que se le ha dado a la levitación magnética, sin duda destaca la utilidad que entrega a la industria aeroespacial, ya que permite desarrollar sistemas sin soportes, suspendidos en el aire, contrarrestando los

efectos de la gravedad y permitiendo una suspensión libre de fricción. Si se combina un sistema de las características antes mencionadas con una cámara de ultra alto vacío, es posible conseguir cero fricción sobre el objeto, alcanzando condiciones similares a las que se han observado en el espacio [6].

Un banco de pruebas de levitación magnética está pensado para realizar ensayos y caracterización de propulsores *electrospray* como un sistema completo. Como también la medición de la propulsión en el orden de micro Newtons [7]. Un prototipo del banco de pruebas fue desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), liderado por F. M. Hicks, con el fin de lograr la caracterización de los sistemas de propulsión para nanosatélites, desarrollados en la universidad del mismo nombre. La idea es levitar un CubeSat utilizando un campo magnético, idealmente dentro de una cámara de vacío. Mientras el CubeSat se encuentre levitando en vacío, podrá rotar libremente alrededor del eje, teniendo solo un grado de libertad [7]. De esta forma es posible analizar el comportamiento de los propulsores y la electrónica del nanosatélite.

Para ello, la levitación se logra utilizando un actuador electromagnético controlado por un algoritmo y un imán permanente adosado al CubeSat. Los otros 5 grados de libertad serán restringidos en cierta medida por la fuerza magnética que alineará los dipolos. Además, al aislar el sistema en una cámara de vacío es posible realizar otras mediciones, como la carga de la estructura producto de los propulsores, el comportamiento térmico e incluso el consumo de combustible, el que puede ser obtenido de manera indirecta haciendo una correlación con la corriente necesaria para levitar el nanosatélite [7]. Con el objetivo de simular de manera más fidedigna las condiciones y el comportamiento del CubeSat una vez que sea puesto en órbita.

La carrera espacial en Chile, y especialmente en las universidades chilenas, ha avanzado de forma pausada y con bastantes dificultades desde su inicio. Sin embargo, hace ya algunos años, ha comenzado a crecer el desarrollo y la investigación en esta área, incluso logrando llegar al espacio con un nanosatélite creado en la Universidad de Chile [8]. El nanosatélite tiene por nombre SUCHAI I, y fue lanzado al espacio exitosamente en junio de 2017 [9], dando un gran paso en la carrera espacial chilena,

de la cual nuestra universidad también se ha hecho partícipe, a través del USM CubeSat team, el cual destacó en su participación en la competencia *CubeDesign Virtual*, organizada por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil [10].

1.2.Marco teórico – Sistema de control PID

Un sistema de control es un algoritmo que permite modificar la señal que gobierna un a un sistema en función de un punto de operación previamente definido y el comportamiento real del sistema.

El sistema de control PID, es un sistema de lazo cerrado, lo que significa que el comportamiento del sistema será medido y con esta variable se alimentará el controlador para realizar los ajustes necesarios. El lazo de control se muestra a continuación.

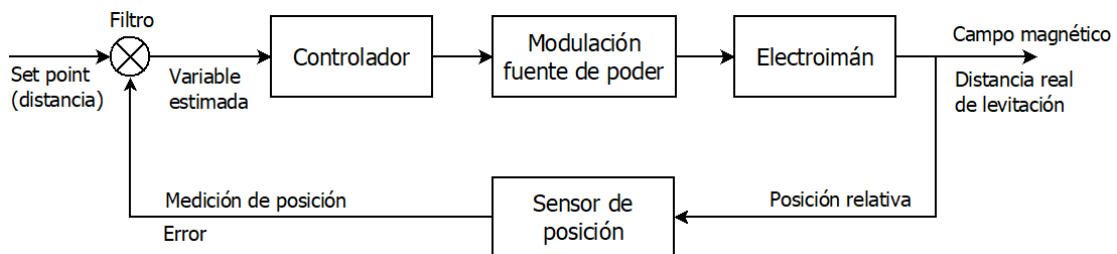


Figura 1: Lazo de control PID.

PID significa Proporcional, Integral, Derivativo. Estos tres elementos corresponden a los elementos básicos del controlador PID, en el cual cada elemento realiza una operación diferente que tendrá un efecto particular en el funcionamiento del sistema.

En el controlador PID los elementos son obtenidos de una combinación de los comandos del sistema y la retroalimentación que generan las mediciones de los parámetros a controlar [16].

En este sistema de control es posible utilizar cada elemento por separado, o una combinación entre ellos, según sea conveniente para la aplicación en específico. El control proporcional es el elemento más simple y se encarga de multiplicar el error de

la señal por una constante determinada [16]. En otras palabras, el elemento proporcional es un ajuste al error instantáneo.

El control integral es utilizado para entregar precisión a largo plazo al sistema utilizando el comportamiento anterior del sistema y usualmente se utiliza en conjunto al elemento proporcional, ya que por sí solo disminuye la estabilidad del sistema [16].

Finalmente, el control derivativo se utiliza para estabilizar el sistema reaccionando a la rapidez de cambio de las variables controladas. Este elemento es de mucha utilidad, pero también puede causar grandes problemas si no se configura correctamente, generando inestabilidad. Es sensible a irregularidades en los datos medidos, ruido y oscilaciones de alta frecuencia [16].

2. Capítulo 2 – Diseño conceptual

2.1. Definición del problema

El diseño de un CubeSat plantea grandes desafíos, ya que las condiciones a las cuales estará sometido en el espacio son muy diferentes a las presentes en la tierra. Por esto, existe la necesidad de contar con un banco de pruebas que permita simular algunas de las condiciones espaciales, como la ausencia de aceleración de gravedad.

Para cubrir esta necesidad, se diseñará un banco de pruebas de levitación magnética, con el que será posible contrarrestar la aceleración de gravedad que actúa sobre el nanosatélite y suspenderlo en el aire solo utilizando fuerzas electromagnéticas.

2.2. Descripción del banco de pruebas

Los componentes principales del banco de pruebas son su estructura, el electroimán, el sensor de posición vertical y el sistema de control de levitación. Además, se han identificado otros componentes de gran importancia, como la fuente de poder y el imán permanente. En la siguiente figura se muestra un esquema de los principales componentes del equipo.

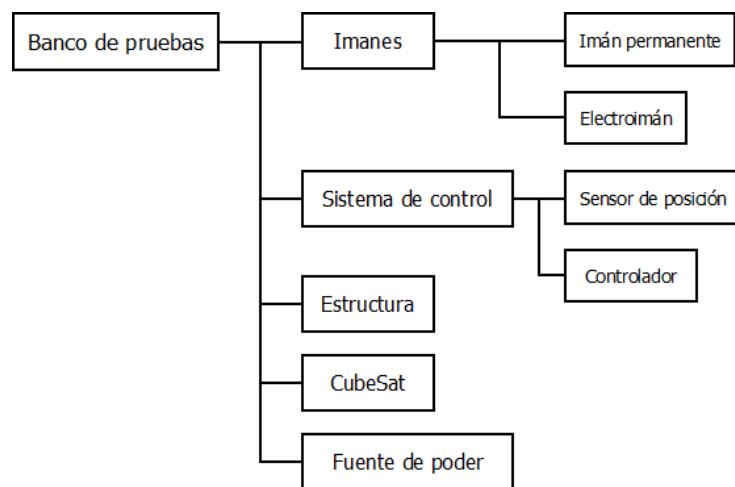


Figura 2: Esquema de componentes que conforman el banco de pruebas

La estructura deberá ser fabricada en un material rígido, capaz de soportar al electroimán en una posición vertical, por lo que además debe ser estable y evitar la transmisión de vibraciones desde el medio externo.

Por su parte, el electroimán deberá ser de forma cilíndrica, con un núcleo de material ferromagnético. Además, debe ser capaz de generar un campo magnético lo suficientemente potente para alcanzar la fuerza de atracción requerida, utilizando la menor corriente posible.

El sensor de posición será utilizado para controlar la cantidad de corriente suministrada al electroimán, para así poder mantener una separación constante entre el electroimán y el imán permanente. Preferentemente deberá ser de simple construcción y configuración. Y deberá poseer la sensibilidad necesaria para reaccionar oportunamente.

A continuación, se describen los requerimientos del banco de pruebas con mayor detalle en la siguiente sección.

2.3. Listado de atributos

A partir de un análisis de los requerimientos anteriores se plantea un listado de atributos del banco de prueba, el cual se presenta en la Tabla 1. En el listado de atributos del producto se han diferenciado los objetivos de diseño (O), las funciones que debe cumplir (F) y las restricciones principales (R).

Tabla 1: Listado de atributos de diseño.

Clasificación	Atributo
O	Apto para operación en vacío
O	Configuración / calibración simple
O	Código de control adaptable / modificable
O	Estructura estable
O	Circuito de control aislado eléctricamente
O	Posible incluir más módulos de medición
O	Minimizar riesgo de atrapamiento (mano - imán)
F	Levitar CubeSat
F	Aislar vibraciones del medio
F	Mantener posición estable
R	Tamaño máximo de 1,5m en cualquier dirección
R	Peso mínimo de levitación 2kg

Es pertinente mencionar que la función principal es la de levitar un CubeSat, lo que será posible lograr al cumplir con las funciones secundarias y los objetivos de diseño. Las restricciones dimensionales corresponden a limitaciones de la cámara de vacío en donde deberá operar el banco de pruebas.

2.4. Análisis funcional

A continuación, se realizará un análisis de las principales funciones requeridas, utilizando herramientas como el árbol de funciones, y los diagramas de caja negra y caja transparente. De esta forma, se logrará una mejor comprensión de la interacción de dichas funciones durante el funcionamiento del equipo.

Árbol de funciones

Se organizan las funciones y subfunciones del producto en un diagrama, para poder visualizar la jerarquía y dependencias que existen entre ellas. Se muestra el diagrama a continuación:

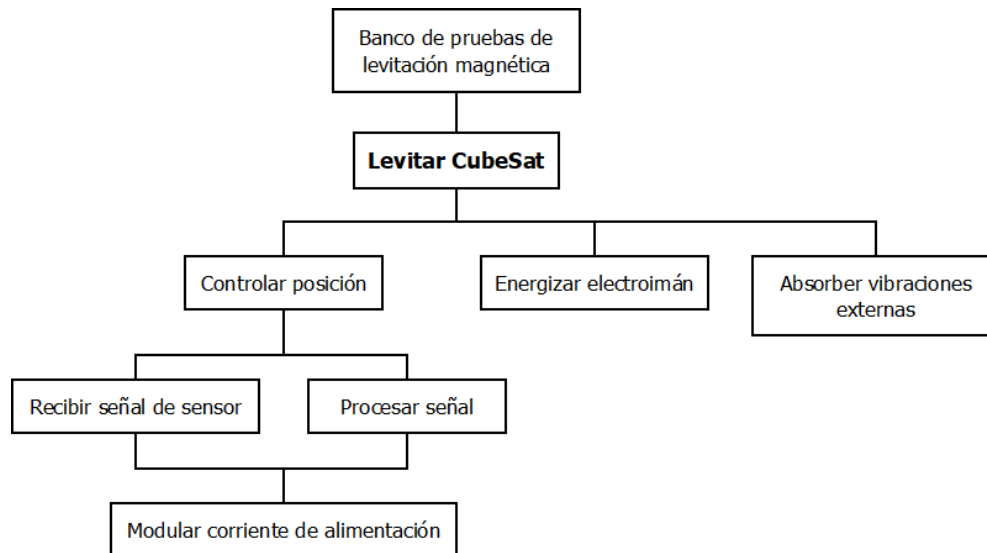


Figura 3: Árbol de funciones para el banco de pruebas de levitación magnética.

De este diagrama se puede notar que la función principal es levitar un CubeSat, pero, existen algunas subfunciones importantes para poder lograr el funcionamiento del sistema.

Diagrama de caja negra

Por medio del diagrama de caja negra será posible identificar los flujos de entrada y salida del sistema. Los principales flujos serán la energía eléctrica suministrada por la fuente de poder y la señal que reciben los sensores de posición que, en este caso, será la intensidad lumínica que incide sobre el sensor. Por otra parte, la principal salida será la energía electromagnética producida por el electroimán y la posición relativa del objeto que levita.

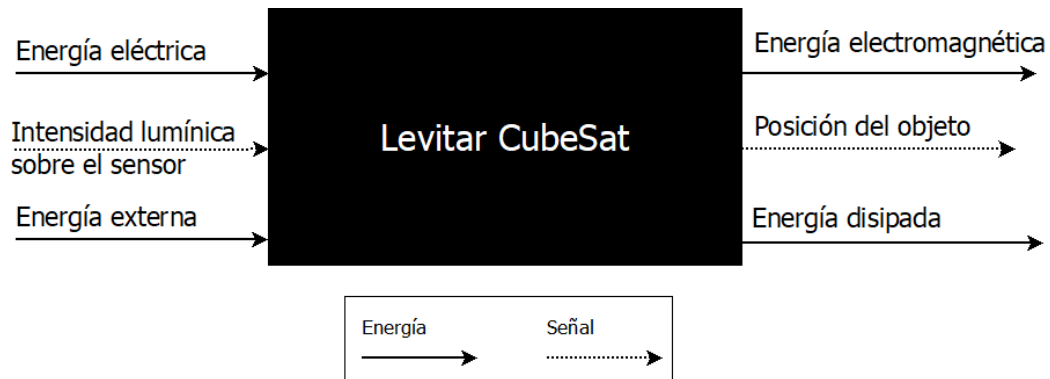


Figura 4: Diagrama de caja negra, indicando flujos de entrada y salida al sistema.

Diagrama de caja transparente

Al hacer el diagrama de caja transparente es posible evidenciar la interacción que existirá entre los flujos antes mencionados y las funciones y subfunciones del sistema. Esto permitirá, conocer los flujos internos del sistema, mostrando cómo las funciones y subfunciones afectan las entradas, para llegar a la producción de la energía electromagnética.

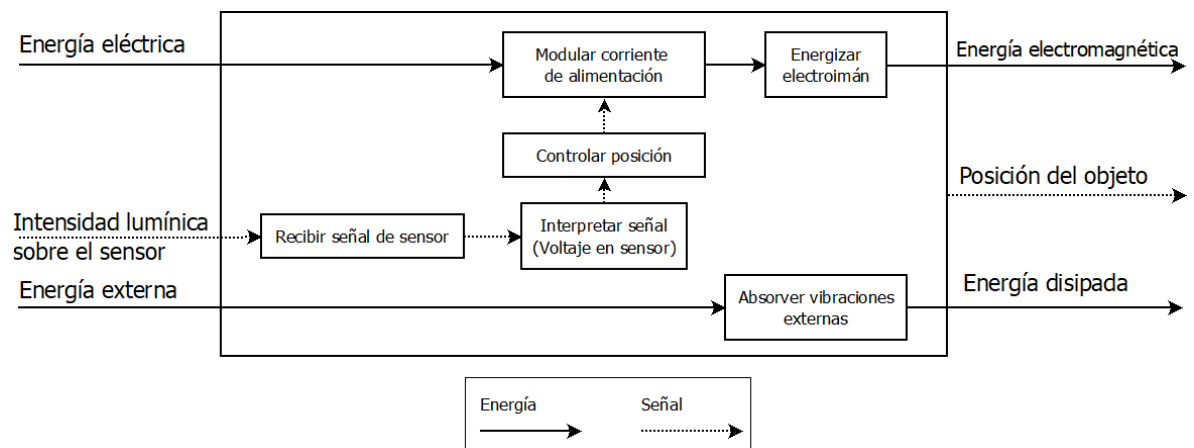


Figura 5: Diagrama de caja transparente.

2.5.Listado de requerimientos

A continuación, se presenta un listado con los requerimientos específicos del banco de pruebas, clasificados según componente.

Tabla 2: Listado de requerimientos básicos.

Requerimiento	Especificación
Tamaño de CubeSat a ensayar	CubeSat de 1 módulo, 10x10 cm
Atracción mínima de 15N	Capaz de atraer al imán permanente y aparato de montaje para mantener una separación máxima de 10 mm.
Orientación, $\pm 10^\circ$ en cada plano vertical a la estructura.	Debe ser posible ajustar la orientación del electroimán
Núcleo de acero magnético.	Material magnético, permite una atracción al imán permanente incluso con el electroimán apagado
Anti-Vibraciones	Aislación de vibraciones externas
Dimensión del miembro más largo menor a 1,5m	Tamaño no mayor a la cámara de vacío
Corriente = 1 [A] Voltaje = 12 [V]	Tensión y corriente mínimas de operación de la fuente de poder.
Apto para vacío $1e-7$ Torr	Materiales de baja emisión de gases
Densidad de flujo magnético > 5000 Gauss	Densidad de flujo magnético mínimo del imán permanente. Indicador de la fuerza del imán.
Ajustable en posición vertical respecto a la estructura ± 25 mm	Posición ajustable para calibrar
Montaje en estructura apta para vacío	Estructura de aluminio o material apto para el vacío
Resolución del control de levitación de al menos $50 \mu m$	Necesario para mantener el control de levitación

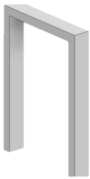
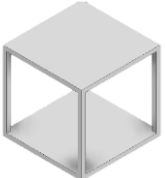
A partir del listado de especificaciones anterior, se derivan las principales variables de ingeniería utilizadas en el diseño:

- Dimensiones de la estructura: 1400 milímetros de altura
- Potencia de la fuente de poder: 30 Watt como mínimo
- Materiales de construcción: Aluminio
- Fuerza del electroimán: 20 N
- Resolución del sistema de control: 50 μ m eje vertical

2.6. Carta morfológica

Al utilizar esta herramienta, es posible explorar diferentes soluciones a una problemática, y explorar combinaciones de estas para llegar a la solución que resuelva de mejor forma las necesidades establecidas. La siguiente carta morfológica será enfocada en a los componentes que desarrollarán las subfunciones anteriormente descritas.

Tabla 3: Carta morfológica de componentes

Componente	Función	Opción A	Opción B	Opción C
Estructura	Soportar elementos	Pórtico 	Pórtico tres puntos 	Cubo 
Sensor posición - emisor	Emitir señal	Infrarrojo	Luz puntual Monocromática	Luz difusa Monocromática
Sensor posición - receptor	Recibir señal	LDR	Fototransistor	Fotodiodo
Control	Controlar posición	Arduino	Chip personalizado	Raspberry PI
Fuente de poder	Proporcionar potencia	Batería	AC	
Aislación al exterior	Aislar vibraciones	Elemento metálico	Elastómero	

2.7. Selección de conceptos

Bocetos

A continuación, se muestran 3 bocetos en los cuales figuran diferentes configuraciones de los 6 componentes principales identificados para este diseño:

Boceto 1: está compuesto por una estructura en forma de cubo (1), la cual lleva instalado el sensor de posición (2) en dos de las aristas de la estructura. La estructura se encuentra aislada de perturbaciones externas por medio de soportes (3). El CubeSat (4) tendrá una posición central dentro de la estructura cuando el banco de pruebas se encuentre en operación. El electroimán (5) se encuentra posicionado en la parte inferior de la estructura, logrando la levitación del CubeSat, al generar un campo magnético que repelerá al imán permanente (6) instalado en el CubeSat.

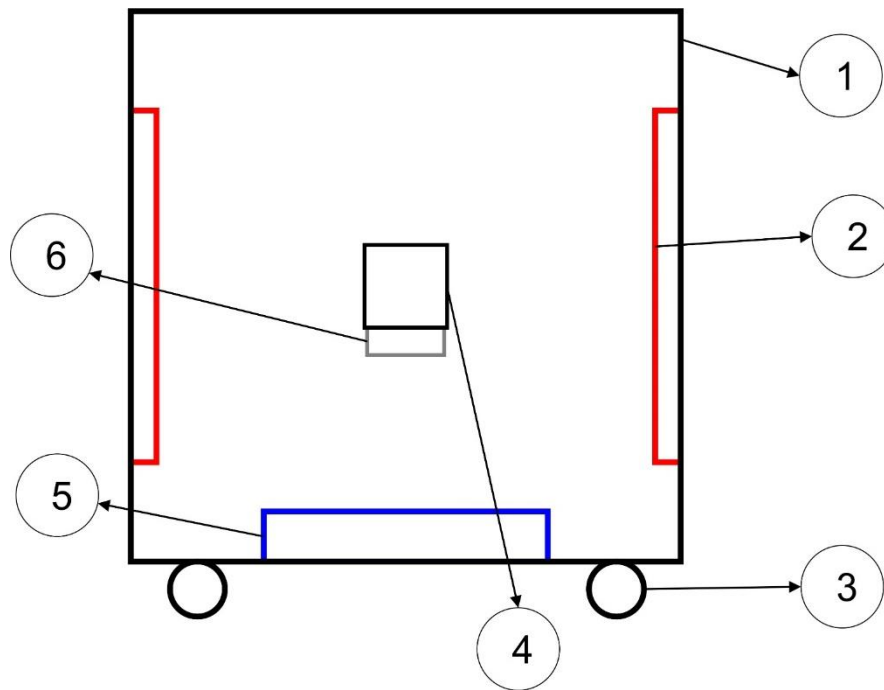


Figura 6: Boceto 1

Ficha técnica concepto 1:

Tabla 4: Especificación técnica concepto 1

Atributo	Especificación
Dimensiones (L x A x H)	500 x 500 x 500 [mm]
Material estructura	Aluminio
Forma estructura	2 placas, con perfiles en las aristas del cubo
CubeSat a ensayar	1 módulo (100 x100 x 100 [mm])
Apoyo a piso	Aislación de vibraciones en cuatro puntos
Material de aisladores	Elastómero
Sistema de levitación	Por repulsión magnética
Electroimán	1, ubicado en la base de la estructura
Fuerza de repulsión	30 [N] a plena carga
Imán permanente	Instalado en la base del CubeSat
Sensor de posición	4 barras, ubicados en las aristas

Boceto 2: está compuesto por una estructura en forma de cubo (1), con una mayor longitud que en el boceto 1, la cual lleva instalado el sensor de posición (2) en dos de las aristas de la estructura. La estructura se encuentra aislada de perturbaciones externas por medio de soportes (3). El CubeSat (4) tendrá una posición central dentro de la estructura cuando el banco de pruebas se encuentre en operación. El concepto cuenta con dos electroimanes (5), que se encuentran posicionados en la parte inferior y superior de la estructura, logrando la levitación del CubeSat, al generar un campo magnético que repelerá y atraerá al imán permanente (6) instalado en el CubeSat. Esta combinación permitirá disminuir el tamaño necesario de los electroimanes, distribuyendo la carga entre los dos.

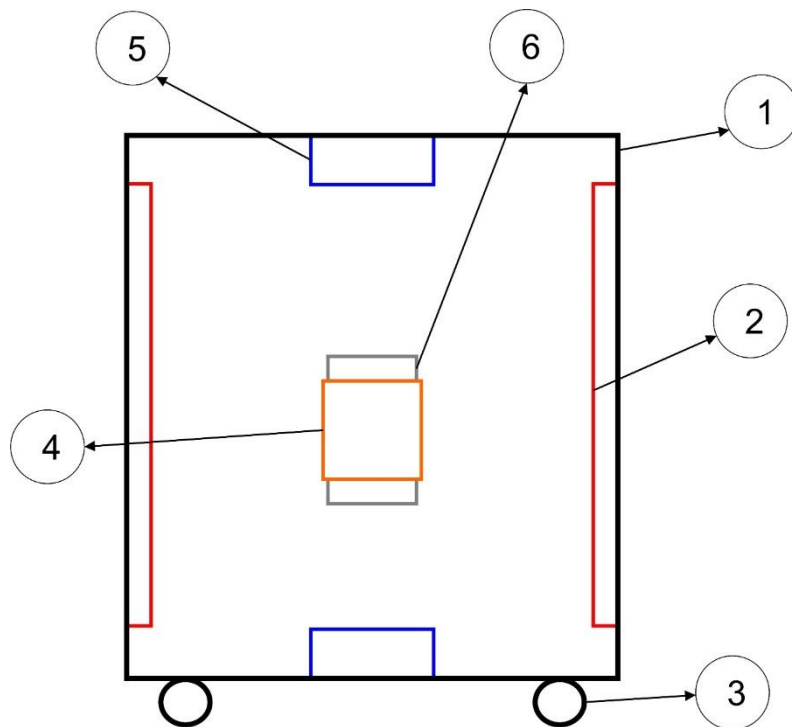


Figura 7: Boceto 2.

Ficha técnica concepto 2:

Tabla 5: Especificación técnica concepto 2

Atributo	Especificación
Dimensiones (L x A x H)	500 x 500 x 1000 [mm]
Material estructura	Aluminio
Forma estructura	2 placas, con perfiles en las aristas del cubo
CubeSat a ensayar	Hasta 2 módulos (100 x 100 x 200 [mm])
Apoyo a piso	Aislación de vibraciones en cuatro puntos
Material de aisladores	Resorte de acero
Sistema de levitación	Combinado, atracción y repulsión
Electroimán	2 instalados en caras opuestas
Fuerza de repulsión	20 [N] a plena carga
Fuerza de repulsión	20 [N] a plena carga
Imán permanente	2 en caras opuestas del CubeSat
Sensor de posición	4 barras, ubicadas en las aristas

Boceto 3: está compuesto por una estructura de portal (1), que cuenta con tres puntos de apoyo para entregar mayor estabilidad. El sensor de posición (2) será instalado en un marco central sobre la estructura. El equipo se encuentra aislado de vibraciones externas por medio de soportes (3). El CubeSat (4) tendrá una posición central dentro de la estructura cuando el banco de pruebas se encuentre en operación. El electroimán (5) se encuentra posicionado en la parte superior de la estructura, logrando la levitación del CubeSat, al generar un campo magnético que atraerá al imán permanente (6) instalado en el CubeSat por medio de un eje.

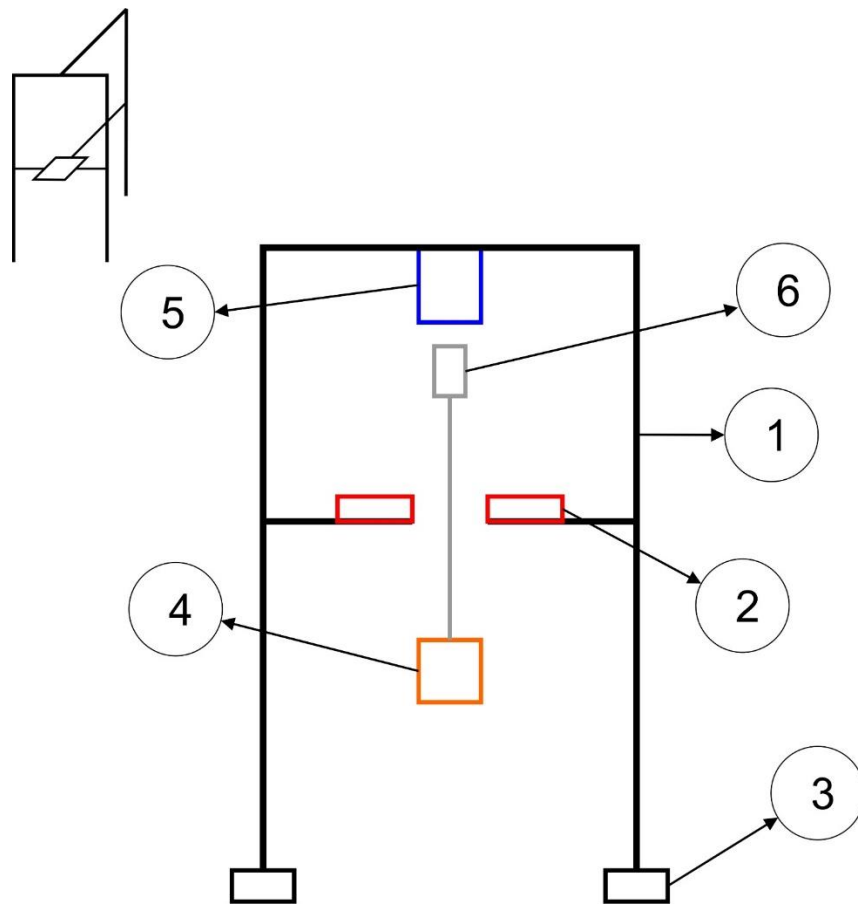


Figura 8: Boceto 3

Ficha técnica concepto 3:

Tabla 6: Especificación técnica concepto 3

Atributo	Especificación
Dimensiones (L x A x H)	700 x 1000 x 1400 [mm]
Material estructura	Aluminio
Forma estructura	Arco con apoyo en tres puntos
CubeSat a ensayar	1 módulo (100 x100 x 100 [mm])
Apoyo a piso	Aislación de vibraciones en tres puntos
Material de aisladores	Resorte de acero
Sistema de levitación	Por atracción magnética
Electroimán	1, instalado en la parte superior de la estructura
Fuerza de atracción	25 [N] a plena carga
Imán permanente	Conectado con una barra al CubeSat
Sensor de posición	2, ubicados en la zona media de la estructura

Al analizar las posibles combinaciones, es posible observar lo siguiente:

- La estructura de pórtico (A) puede ser inestable y la estructura cúbica (C) representa una mayor complejidad de construcción, aunque una plataforma más estable y con más espacio disponible. La opción más adecuada es el pórtico de tres puntos (B), ya que puede ser construida con perfiles comerciales y entrega suficiente estabilidad, y acceso al interior de la estructura.
- Para el emisor del sensor de posición se identifica como mejor opción la luz difusa monocromática (C), ya que permitirá un mayor recorrido de operación para el sensor, un ajuste más sencillo y habrá una retroalimentación inmediata sobre el funcionamiento, a diferencia del infrarrojo, que no es visible sin elementos externos.

- Para el receptor del sensor de posición la opción más adecuada es el fotorresistor (LDR – A), ya que es posible obtener información continua de este sensor, a diferencia de las otras opciones, que entregan información binaria.
- Para el control de los sensores y electroimán se utilizará la plataforma Arduino (A), ya que permite una resolución adecuada de los sensores y personalización del programa de control. También se podría utilizar la plataforma Raspberry, según la preferencia del desarrollador. El caso de un chip personalizado es bueno considerarlo una vez que exista un producto definitivo, ya que se puede integrar y mejorar partes del circuito en un solo producto dedicado al control del banco de pruebas.
- La fuente de poder será de alimentación desde la red AC (B), ya que de esta forma es posible asegurar una tensión y corriente estable. Lo que puede ser de mayor complejidad al utilizar una batería, la cual además necesita ser cargada, lo que hace más compleja la operación del producto.
- Para la aislación de vibraciones se utilizará un elemento metálico (A), ya que, si bien un elastómero probablemente pueda absorber mejor las vibraciones, también es probable que pierda sus propiedades al ser utilizarlo en vacío.

Matriz de selección

Con el uso de la matriz de selección que se muestra a continuación en la Tabla 7, fue posible definir que el concepto que más adecuado para cumplir con los atributos requeridos es el número 3, destacando principalmente en tener una estructura de mayor acceso, lo que permite realizar configuraciones del equipo de forma más simple. Además, ofrece gran espacio para incluir nuevos sensores, y al estar soportado solo en tres puntos no existe riesgo de inestabilidad en la estructura.

Tabla 7: Matriz de selección de conceptos

Atributo	Peso	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3	
		Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
Apto para operar en vacío	5	3	15	4	20	5	25
Configuración / calibración simple	5	3	15	2	10	4	20
Código de control adaptable / modificable	5	5	25	3	15	5	25
Estructura estable	20	4	80	3	60	5	100
Circuito de control aislado eléctricamente	5	5	25	5	25	5	25
Posible incluir más módulos de medición (modular)	10	3	30	4	40	5	50
Minimizar riesgo de atrapamiento (mano - imán)	10	4	40	3	30	5	50
Aislar vibraciones del medio	10	4	40	3	30	4	40
Mantener posición estable	10	3	30	4	40	4	40
Tamaño máximo de 1,5m en cualquier dirección	5	5	25	5	25	5	25
Peso mínimo de levitación 2kg	15	4	60	5	75	5	75
Puntaje total		385		360		475	
Selección		2		3		1	

2.8. Selección de materiales

La selección de materiales será muy importante en el desarrollo del banco de pruebas, ya que existen condiciones de operación que limitarán la cantidad de materiales adecuados, como el funcionamiento en una cámara de vacío. Además, la selección será influenciada por los materiales disponibles en el comercio y no solo por sus características.

Estructura

Como se mencionó anteriormente, los materiales deben ser aptos para operar en una cámara de alto vacío, lo que implica que los materiales deben tener una baja presión de vapor, lo que asegura poder mantener una atmósfera limpia y permitirá mantener la presión de vacío durante el tiempo de operación.

Dentro de los materiales más utilizados en aplicaciones de alto vacío y ultra vacío se destaca el acero inoxidable 304, ya que tiene buenas propiedades mecánicas, es resistente a la corrosión y tiene una baja presión de vapor, lo que implica que puede incluso ser utilizado a altas temperaturas y en vacío, sin incluir gases en la atmósfera [11]. Por otra parte, este material tiene un precio elevado y menor maquinabilidad que el acero al carbono. Además, es más complejo adquirir perfiles que permitan construir una arquitectura modular.

Dadas las condiciones de operación, las cuales no contemplan altas temperaturas, ya que se trabajará a temperatura ambiente, el aluminio se considera una buena opción, ya que a pesar de tener una presión de vapor relativamente alta, es apto para operar un ultra alto vacío a temperatura ambiente [11]. Además, es un material económico, y existe una gran cantidad de perfiles comerciales, que permiten realizar ensamblajes y modificar la estructura según los requerimientos de cada ensayo, sin la necesidad de utilizar soldadura o modificaciones importantes a la estructura.

Electroimán

El electroimán es un componente fundamental para el banco de pruebas que se compone del bobinado y un núcleo. Este componente estará sometido a una mayor temperatura de operación que el resto, producto de la corriente que circulará por el bobinado.

Para este caso, el cobre es la opción más adecuada, ya que proporciona excelentes propiedades de conductividad eléctrica y es fácil de encontrar en el mercado en diversos formatos. Además, tiene un buen comportamiento al ser sometido a altas presiones de vacío [11].

En cuanto al núcleo del electroimán, usualmente se utilizan chapas de hierro, ya que proporciona buenas propiedades electromagnéticas, minimizando las pérdidas por histéresis. Dada la forma de solenoide que tendrá el electroimán, utilizar chapas metálicas será de gran complejidad, por lo que sería posible considerar otros materiales que proporcionen buenas propiedades electromagnéticas, como el Supermalloy [12]. Sin embargo, este tipo de materiales son muy complejos de conseguir, por lo que la opción más viable es utilizar un núcleo de acero, ya que, a pesar de no tener propiedades magnéticas tan excepcionales, es suficiente para la aplicación deseada. Además, cumple con los requerimientos de poder ser utilizado en alto vacío.

Cableado y conexiones

El cableado puede ser sin problemas de cobre, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, la soldadura blanda de estaño y plomo debe ser evitada, ya que puede provocar problemas al ser utilizada en vacío. Se deberán preferir los terminales con conexiones permanentes [13]. Por esto mismo, los circuitos deberán fuera de la cámara de vacío.

2.9.Arquitectura de producto

El banco de pruebas será configurado a partir de una arquitectura modular, ya que de esta forma será posible agregar funciones o modificar las existentes, lo que resulta muy conveniente, dada la cantidad de pruebas que es necesario realizar con un CubeSat. La modularidad será considerada en torno a las funciones del banco de pruebas, estableciendo una modularidad *tipo ranura*, lo que permitirá integrar nuevos módulos de medición sobre la misma estructura del levitados.

Para este desarrollo en particular solo se trabajará sobre el módulo del sensor de posición para controlar la levitación, pero se tendrá en consideración la posibilidad de incorporar módulos de medición. Para esto se utilizarán perfiles de aluminio ranurado (Ranura T), lo que permite modificar y adicionar módulos de forma simple, cumpliendo los requerimientos antes establecidos.

2.10. Diseño preliminar

El concepto que se trabajará será construido con perfiles de aluminio ranurado, considerando la estructura antes discutida y diferentes niveles para poder incorporar los diferentes sistemas de medición. Además, se deberá considerar un eje estándar para poder suspender el CubeSat a probar.



Figura 9: Imagen referencial de la estructura del banco de pruebas de levitación magnética.

A continuación, se muestra un plano con dimensiones generales preliminares. El perfil de aluminio considerado tiene dimensión de 20 x 60 mm.

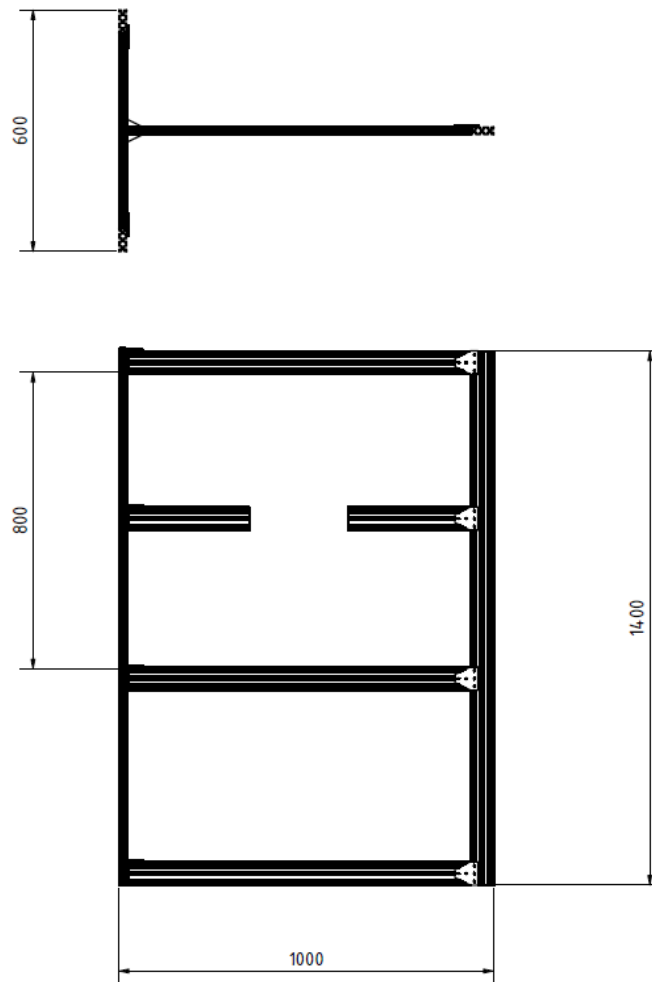


Figura 10: Estructura del banco de pruebas con dimensiones preliminares.

Como es posible observar, en la parte central de la estructura hay un espacio en donde se posicionará el CubeSat y tres pisos para incorporar el sensor de posición y otros sistemas de medición según sea necesario.

El electroimán estará montado en la parte superior por medio de una placa con ajuste por pernos, de tal forma que sea posible modificar la orientación de este de forma independiente a la estructura. Se muestra concepto en la siguiente imagen.

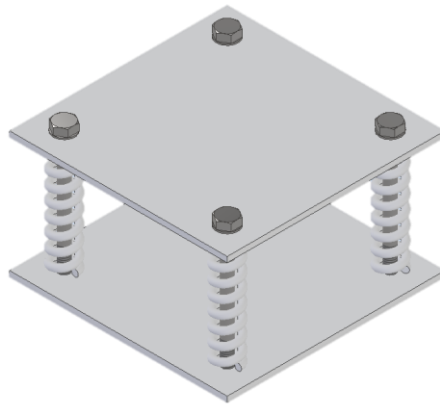


Figura 11: Concepto de montaje electroimán.

Para lograr la función de aislar al equipo de vibraciones externas se utilizará un cable de acero para unir la base y la estructura, ya que como se mencionó en la sección de selección de materiales, los elastómeros no son aptos para el trabajo en vacío. A continuación, se muestra un ejemplo del sistema implementado en el banco de pruebas desarrollado en el MIT [7].

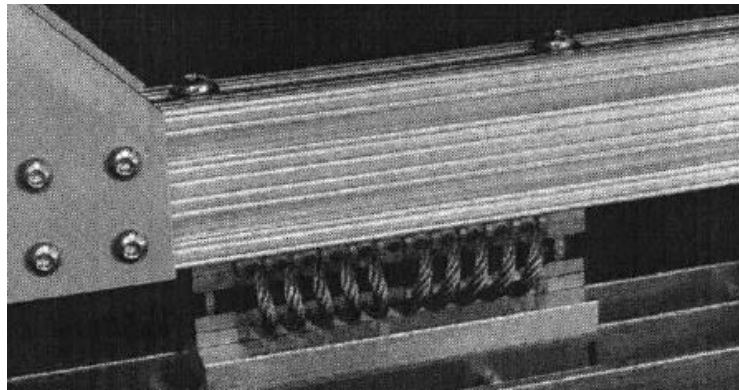


Figura 12: Aislación de vibraciones y ajuste en la base de la estructura.

El electroimán será fabricado utilizando una barra de acero al carbono como núcleo y el bobinado estará hecho con cable de cobre esmaltado. Dados los requerimientos específicos del producto, el electroimán deberá ser fabricado. Las dimensiones específicas de cada parte serán calculadas posteriormente en el diseño de detalles.

A continuación, se muestra una imagen de la forma que tendrá el electroimán, con dimensiones aproximadas de 120 mm de largo y 20 mm de diámetro en el núcleo.

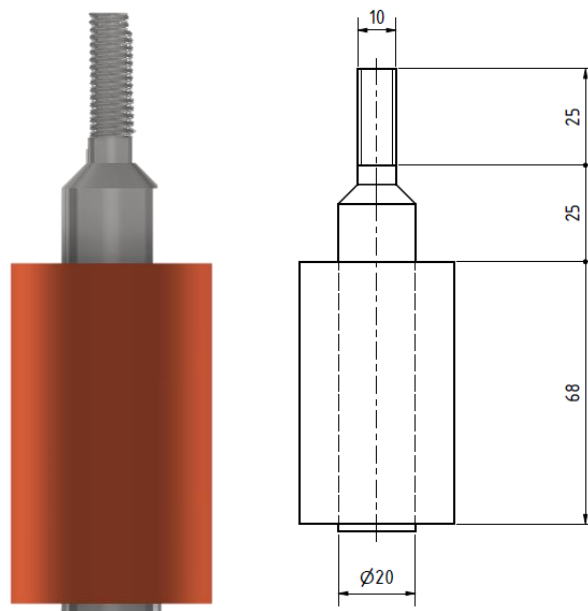


Figura 13: Electroimán, dimensiones referenciales.

El anclaje a la placa de montaje antes mencionada se hará atornillando el núcleo del electroimán directamente a la placa de montaje, por lo que será necesario considerar el roscado del extremo del núcleo y la incorporación de un orificio roscado con la suficiente superficie para lograr un buen agarre en la placa.

La estructura para el sensor de posición será fabricada en PTFE (Teflón), ya que es fácil de mecanizar, lo que permite obtener excelente precisión durante la fabricación, es un buen aislante eléctrico, es de costo relativamente bajo, y presenta un buen comportamiento en vacío, dada su baja presión de vapor [11].

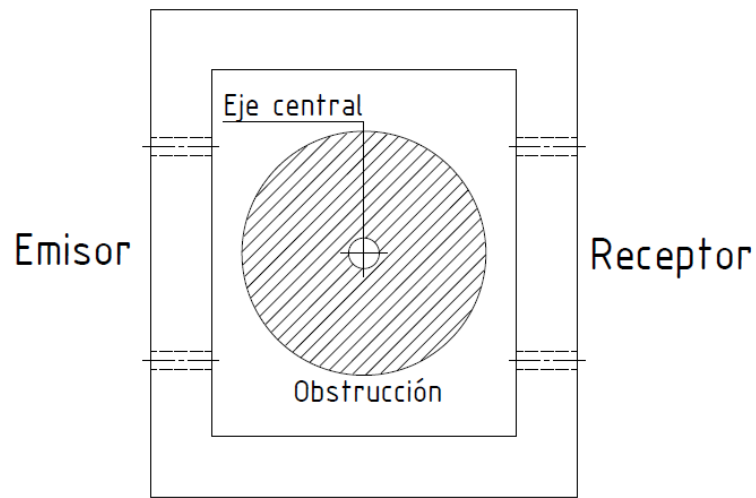


Figura 14: Sensor de posición, concepto.

El sensor de posición será de forma rectangular como se ve en la figura, y será montado sobre la estructura que se mostró anteriormente. A un costado de la estructura del sensor serán instalados los receptores y al otro los emisores del sensor, los que serán obstruidos por un obstáculo que estará montado sobre el eje central del elemento a levitar.

3. Capítulo 3 – Diseño de detalles

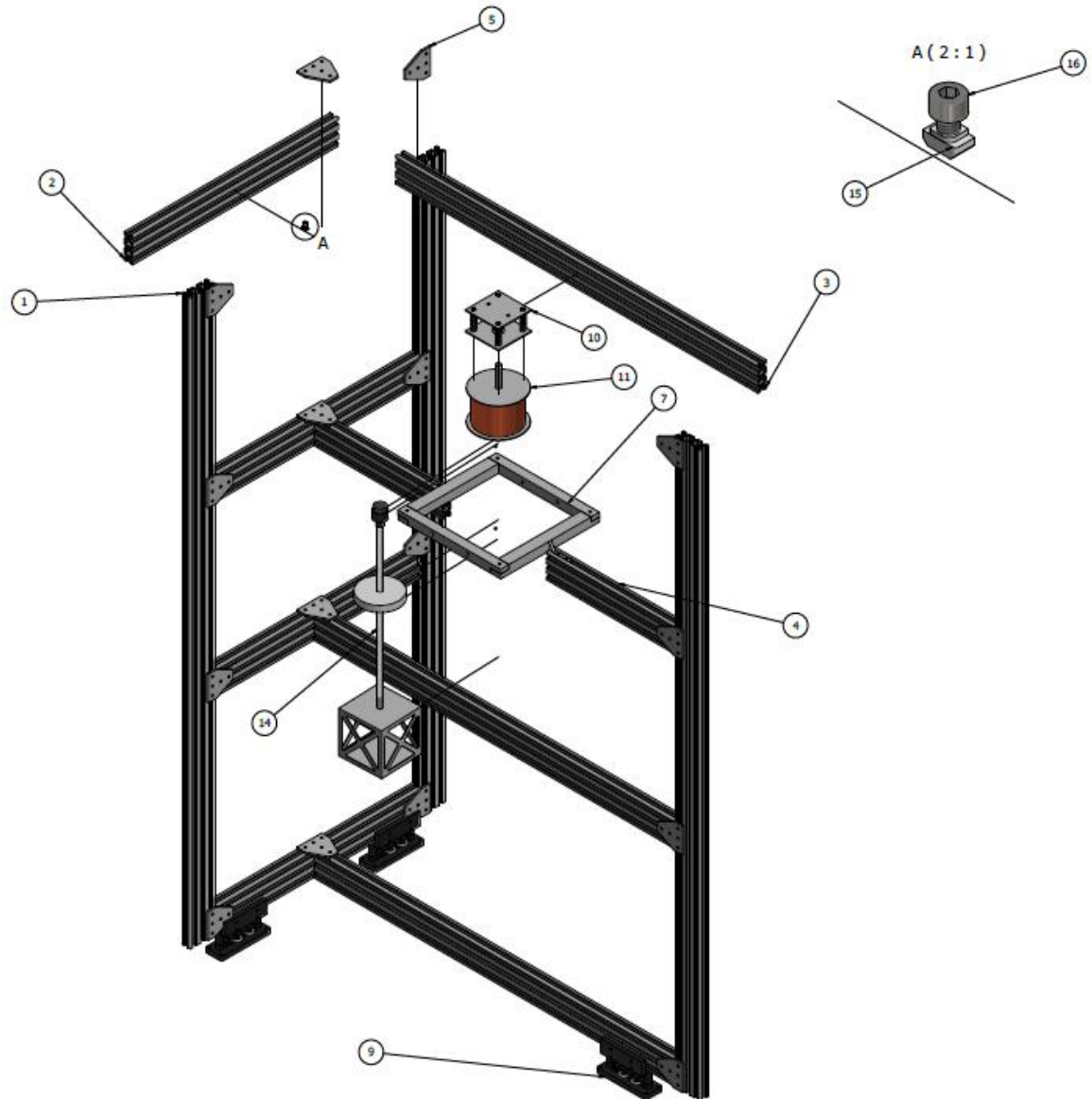


Figura 15: Imagen del diseño final y layout del equipo.

A continuación, se describirá cada parte del diseño mostrado en la Figura 15. Los planos con el detalle de cada parte estarán disponibles como un archivo separado, según la lista dispuesta en apartado 4.2.

Tabla 8: Listado de partes, posiciones principales.

Identificador	Descripción
1	Perfil Aluminio V-Slot 20 x 60 mm
2	Perfil Aluminio V-Slot 20 x 60 mm
3	Perfil Aluminio V-Slot 20 x 60 mm
4	Perfil Aluminio V-Slot 20 x 60 mm
5	Plancha de unión 90°
7	Sensor de posición
9	Soporte anti-vibraciones
10	Soporte electroimán
11	Electroimán
14	Soporte CubeSat
15	Tuerca T M5
16	Perno hexagonal M5 x 5 mm

3.1. Estructura

La estructura será construida a partir de perfiles ranurados de aluminio de 20 X 60 milímetros. Esto permitirá asegurar las dimensiones y evitar deformaciones que podrían ocurrir al hacer una estructura soldada. Por ejemplo, las conexiones serán hechas utilizando pernos Parker cabeza plana M5 (98 unidades), tuercas T y placas perforadas, las cuales son específicamente diseñadas para trabajar con los perfiles ranurados. Este tipo de construcción, además, permite flexibilidad en caso de necesitar instalar un nuevo módulo en la estructura.

La construcción tendrá forma de T y contará con tres puntos de apoyo al suelo. Tendrá tres niveles, que proporcionarán rigidez a la estructura y permitirán el montaje de diferentes instrumentos de medición. Las medidas generales serán 620 mm de ancho y 1300 mm de altura, sin considerar los soportes. El resto de las dimensiones pueden ser vistas en los planos que se presentan más adelante.

3.2. Anclajes

Para anclar la estructura al piso o base de la cámara de vacío se utilizarán tres anclajes capaces de absorber vibraciones externas. Los anclajes se mecanizarán de PTFE y constará de 5 partes, para facilitar el mecanizado. La absorción de las vibraciones se logrará con un cable de acero de 1/4", el que será tejido entre las partes del anclaje. Se muestra una imagen a continuación.

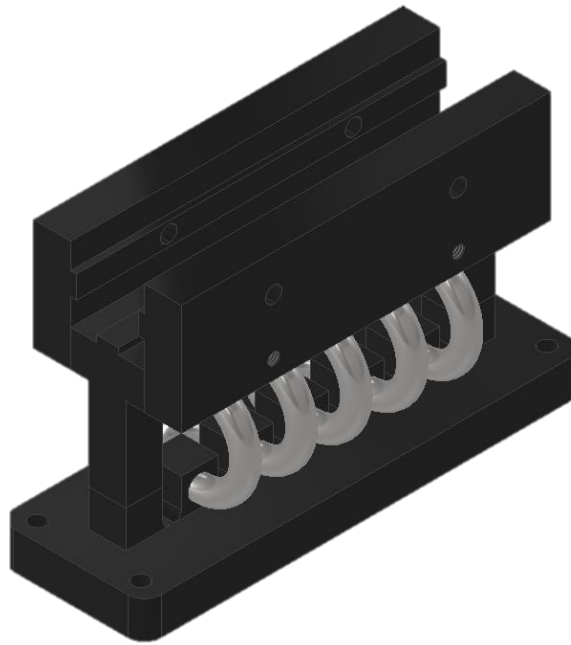


Figura 16: Anclaje anti-vibraciones.

Como es posible observar, la parte superior está formada por tres secciones, y será ensamblada con pernos, para facilitar la instalación y el mecanizado, permitiendo mecanizar cada parte por separado, con geometrías más simples que mecanizar el conjunto completo. Las mordazas superiores serán conectadas directamente al perfil de aluminio, utilizando 4 tuercas T M5, y por consecuencia, 4 pernos M5 Parker cabeza plana.

3.3. Electroimán

Dada la complejidad de cálculo que implica un sistema en el que interactúa un electroimán con un imán permanente, y las numerosas aproximaciones que se deben hacer, es conveniente analizar las dimensiones del electroimán por medio de una simulación computacional empleando el método de elementos finitos, lo que entrega un resultado más cercano al comportamiento real del circuito magnético.

La simulación fue realizada con el programa ANSYS Discovery AIM, licencia de uso estudiantil.

Primero, será necesario tener en cuenta las variables principales de diseño y cómo afectarán a la variable de interés, la fuerza de atracción del electroimán. Las más influyentes serán la sección transversal del núcleo, el número de espiras de la bobina, la corriente de alimentación, la distancia entre el electroimán y el imán permanente y los materiales utilizados (permeabilidad magnética).

Para la simulación se consideraron algunos parámetros constantes, como la dimensión del imán permanente, igual a un disco de 24 mm de diámetro y 24 mm de alto, de aproximadamente 6000 Gauss. Una distancia de 10 mm entre el electroimán y el imán permanente, y una longitud del solenoide igual a 68 mm, con núcleo de 100 mm de largo. El número de espiras en el solenoide, el diámetro del núcleo y la corriente de alimentación fueron modificados durante el ensayo.

El material utilizado para las espiras es cobre, para el núcleo del electroimán acero al carbono A36, y el imán permanente, neodimio NdFe35. El medio considerado fue aire, ya que corresponde a la primera instancia de pruebas y la situación más desfavorable.

Como se menciona anteriormente, la distancia entre el electroimán y el imán permanente se consideró constante, e igual a 10 mm, por otra parte, la corriente aplicada al electroimán fue seleccionada de forma discreta, y se utilizaron los siguientes valores de 1,0 y 0,5 Amperes, en base a la experiencia presentada por Hicks

[7]. Además, se ensayaron 4 casos diferentes, variando el número de espiras entre 2000 y 2500 para tres diámetros de núcleo, 20, 22 y 24 milímetros.

Finalmente, se obtuvo la fuerza de atracción sobre el imán permanente, lo que permitió seleccionar el número de espiras adecuado, y el diámetro del núcleo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el ensayo con un núcleo de 20 milímetros de diámetro, ya que es el que más se acerca a las necesidades. Además, cabe mencionar que, al aumentar el diámetro, la fuerza de atracción se ve favorecida, dado el aumento de sección del núcleo.

Tabla 9: Resultados de simulación EF electroimán.

Vueltas [u]	Corriente [A]	Fuerza [N]
2500	1	28
2000	1	25
2500	0,5	20
2000	0,5	12

Recordando, el requerimiento de fuerza de atracción es de al menos 15 N. Para asegurar un funcionamiento adecuado, es prudente considerar un factor de seguridad de al menos 1,5, de esta forma, el sistema podrá reaccionar ante un aumento en la distancia de separación entre los elementos y funcionará de forma más segura.

Dicho esto, se considera que 2500 vueltas y un núcleo de 20 mm de diámetro son suficientes para lograr el objetivo, sin producir un calentamiento excesivo del bobinado, al poder operar a una menor corriente que el caso de 2000 vueltas.

Cabe destacar que los resultados obtenidos son aproximados, ya que no se consideran los efectos de la temperatura, perturbaciones externas, imperfecciones en los campos magnéticos, diferencia en las propiedades de los materiales y fuerzas en diferentes direcciones a la estudiada, entre otros. Además, la simulación no contempla el diámetro del cable, dada la complejidad que esto significa para el mallado de la

geometría, por lo que se considera un diámetro adecuado 18 AWG, ya que entrega una adecuada resistencia para poder fabricar el bobinado y una resistencia eléctrica menor que 35 Ohm. 1000 metros de cable, minimizando el consumo de potencia y generación de calor. Se requerirán aproximadamente 450 metros de cable y el diámetro final de la bobina será de 94 mm.

A continuación, la figura 17 muestra una imagen simplificada del electroimán, al cual se le incorporarán dos discos en los extremos de la bobina para facilitar la fabricación de esta.

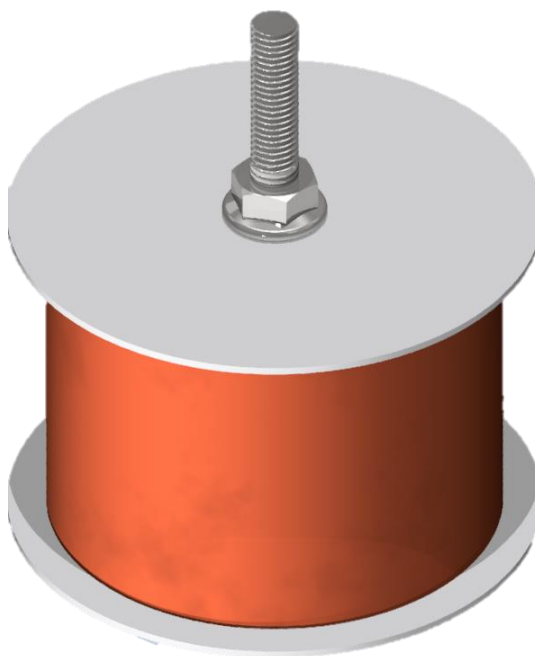
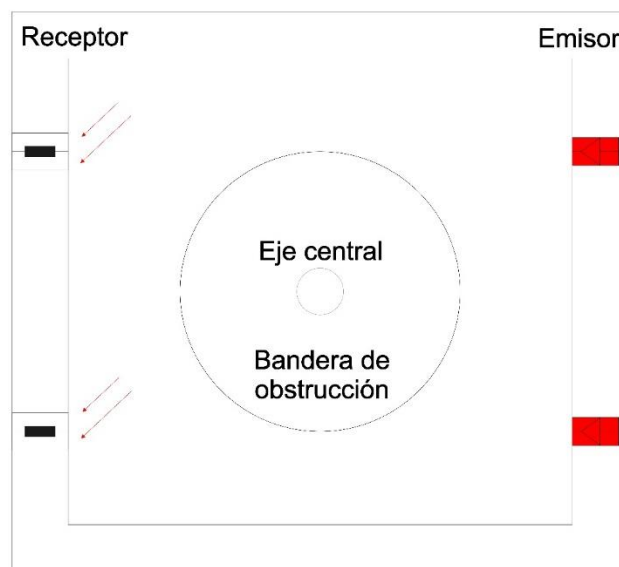


Figura 17: Representación simplificada electroimán.

3.4.Sensor de posición

El sensor de posición debe ser capaz de captar pequeños movimientos del CubeSat en el eje vertical sin interferir con este de ninguna forma. El objetivo de este sensor es poder detectar los cambios de posición del imán permanente respecto al electroimán, y entregar la información necesaria al controlador para que dicha distancia se mantenga constante. Para captar el movimiento se utilizó un sensor de compuerta, el cual funciona parcialmente obstruido por una bandera instalada en el eje que soporta al nano satélite. Este sensor cuenta con dos fotorresistores (LDR) de 10 MOhm y dos láser de color rojo de 650 nm enfrentados entre sí. Los sensores serán ubicados al mismo nivel, en ambos costados del eje central, de esta forma será posible obtener una medición más precisa y evitar desviaciones producto de un eventual balanceo del eje.

Vista superior



Vista lateral

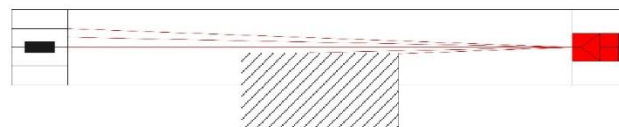


Figura 18: Esquema explicativo del sensor de posición en vista superior y lateral.

El sensor es alimentado por una fuente de corriente continua de 3,3 Volts, la cual mantiene una iluminación constante desde los láser hacia las fotorresistencias, las cuales están sujetas a una referencia de 5 Volts. Es posible cambiar la tensión de alimentación según resulte conveniente, pero se deberán considerar las limitaciones impuestas por el voltaje máximo de operación del láser y el cambio en el rango de operación de la fotorresistencia, lo que afectará la posterior calibración del controlador.

El sensor funciona manteniendo una interferencia parcial sobre ambos LDR, los cuales cambiarán su resistencia según la cantidad de luz que reciben. A mayor intensidad, menor será su resistencia, por lo que la caída tensión a través del elemento también disminuirá. Este cambio de tensión será utilizado como señal analógica, la cual deberá ser procesada y filtrada para luego utilizarla como entrada al sistema de control.

A continuación, se muestra una imagen de la estructura sobre la cual se instalarán los elementos del sensor de posición, la que como se mencionó anteriormente será mecanizada a partir de una pieza de politetrafluoroetileno (PTFE), también conocido como teflón. El diseño consta de cuatro partes, las que deberán ser ensambladas por medio de pernos M6. La forma y disposición de las perforaciones fue pensada de modo que el mecanizado sea lo menos complejo posible, y el montaje a la estructura principal utilizará el mismo sistema de anclaje T-Slot que se consideró para los perfiles. Las dimensiones generales son de 240 x 250 mm. Se entregarán más detalles respecto a las medidas al momento de presentar los planos de todo el equipo.

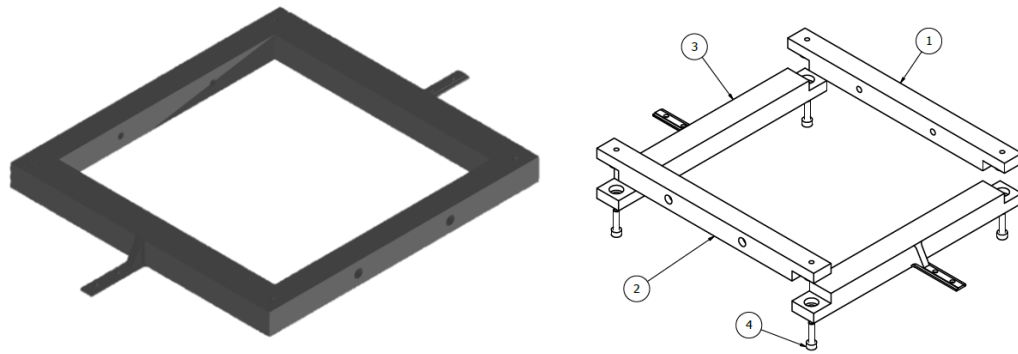


Figura 19: Estructura de montaje sensor de posición.

3.5. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo óptimo recursivo de procesamiento de datos, que entrega una estimación de un valor incorporando toda la información que se le entregue. Dicho algoritmo procesará todas las mediciones disponibles, sin importar la precisión de estas, para calcular el valor de la variable de interés, utilizando el conocimiento del sistema y mediciones dinámicas, la descripción estadística del ruido del sistema, mediciones e incertidumbre del modelo dinámico, y cualquier información sobre las condiciones iniciales de la variable de interés [14].

Utilizar este filtro para procesar las señales del sensor de posición resulta muy conveniente, ya que permitirá combinar las dos señales recibidas, además de estimar una variable más confiable, al tener en cuenta las variaciones producidas por el ruido ambiental y de la fuente de poder.

La implementación de este filtro se hará directamente en la plataforma Arduino, ya que es posible utilizar librerías disponibles y personalizarlas según los requerimientos específicos del sensor.

3.6. Sistema de control

En primer lugar, es necesario analizar las variables que afectarán el comportamiento del sistema, para construir el modelo a controlar. El sistema de levitación está compuesto de una fuerza electromagnética de atracción (F_m) que puede ser descrita por medio de la siguiente ecuación [15]:

$$F_m(t) = \frac{L \cdot i(t)^2}{2d^2} \quad (1)$$

Donde L corresponde a la inductancia del electroimán y d a la distancia entre el solenoide y el objeto atraído. Luego, el movimiento del cuerpo estará descrito de la siguiente forma:

$$m\ddot{d} = mg - F_m(t) \quad (2)$$

Con m igual a la masa del objeto a mantener en suspensión, $\ddot{d}$ igual a la aceleración del cuerpo y g la aceleración de gravedad. Además, el voltaje entre los terminales del electroimán puede ser expresado como se muestra en la ecuación (3), de esta forma completando en sistema de ecuaciones para el modelo de levitación no lineal.

$$i = k \cdot u \quad (3)$$

Donde k corresponde a una constante dependiente del electroimán y u a la tensión en la bobina. En la Figura 20 se muestra el diagrama del sistema de levitación y las variables de las que depende. Notar que con la ecuación (2) es posible obtener el estado estacionario del sistema, donde con la corriente i_0 se mantiene la posición del CubeSat d_0 .

$$i_0 = \sqrt{\frac{2mg}{L}} d_0 \quad (4)$$

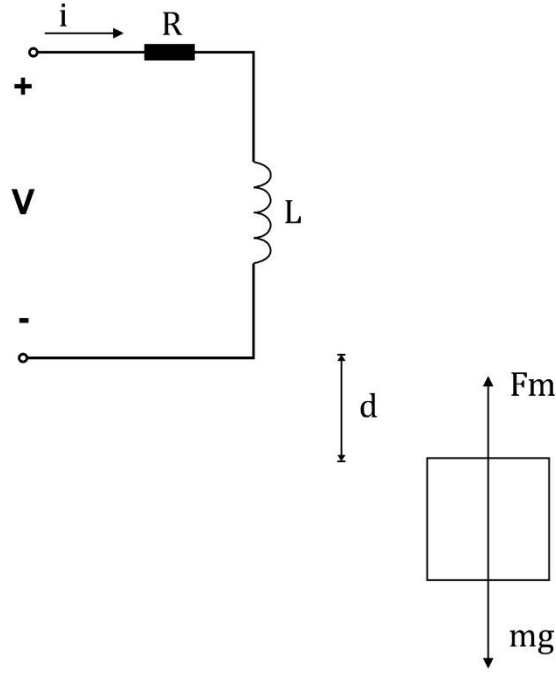


Figura 20: Diagrama de sistema de levitación. v : tensión en la bobina; R : resistencia de la bobina; L : inductancia de la bobina; i : corriente en la bobina; d : distancia

Para completar el modelo, es necesario considerar posibles perturbaciones que sufrirá el sistema durante la operación, por lo que es conveniente variables como sigue:

$$\hat{d}(t) = \Delta d(t) - d_0 \quad (5)$$

$$\hat{i}(t) = \Delta i(t) - i_0 \quad (6)$$

Reescribiendo la ecuación dinámica (2), con $K_f = \frac{L}{2}$ se obtiene

$$m \frac{d^2 \hat{d}}{dt^2} = mg - K_f \left(\frac{\hat{i} + i_0}{\hat{d} + d_0} \right)^2 \quad (7)$$

Linealizando en torno a los puntos de equilibrio se obtiene,

$$\frac{d^2 \hat{d}}{dt^2} = \frac{1}{m} \left[\frac{\partial}{\partial \hat{d}} \left(mg - K_f \left(\frac{\hat{i} + i_0}{\hat{d} + d_0} \right)^2 \right) \right]_{(\hat{d}=0, \hat{i}=0)} \hat{d} + \frac{\partial}{\partial \hat{i}} \left(mg - K_f \left(\frac{\hat{i} + i_0}{\hat{d} + d_0} \right)^2 \right) \bigg|_{\hat{d}=0, \hat{i}=0} \hat{i} \quad (8)$$

De forma equivalente,

$$\frac{d^2\hat{d}}{dt^2} = \frac{2K_f \cdot i_0^2}{d_0^3 \cdot m} \hat{d} - \frac{2K_f \cdot i_0}{d_0^2 \cdot m} \hat{i} \quad (9)$$

Finalmente, aplicando la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia,

$$G_m(s) = \frac{\hat{D}(s)}{\hat{I}(s)} = -\frac{a}{s^2 - b} \quad (10)$$

Donde, $\hat{D}(s) = \mathcal{L}[\hat{d}(t)]$, $\hat{I}(s) = \mathcal{L}[\hat{i}(t)]$, y

$$a = \frac{2K_f \cdot i_0}{d_0^2 \cdot m}, \quad b = \frac{2K_f \cdot i_0^2}{d_0^3 \cdot m} \quad (11)$$

Los valores de diseño se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Valores numéricos de las cantidades físicas utilizadas en el diseño.

Cantidad física	Símbolo	Valor numérico	Unidades
Inductancia electroimán	L	5	Henry
Resistencia electroimán	R_l	16	Ohm
Constante de fuerza	K_f	2,5	$\frac{Nmm^2}{A^2}$
Aceleración de gravedad	g	9793,89	$\frac{mm}{s^2}$
Masa del CubeSat	m	2	Kg

Para lograr una levitación controlada, es necesario controlar dichas variables utilizando un método predecible, que sea capaz de reaccionar al constante cambio. Por lo que se utilizará un sistema de control PID, que proporciona la habilidad de ajustar la respuesta del sistema de acuerdo con las mediciones obtenidas en tiempo real.

El sistema será gobernado por la siguiente relación, en la cual es posible distinguir la parte proporcional, luego la integral y finalmente la derivativa:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

En la cual $u(t)$ corresponde a la señal que entrega el controlador K_p , K_i y K_d corresponden a las constantes de ganancia proporcional, integral y derivativa respectivamente, y por finalmente, $e(t)$ corresponde al error, el cual se obtiene restando el setpoint (SP) con la variable del proceso (PV) que, para este caso particular, será la posición del CubeSat respecto al sensor de posición.

$$e(t) = SP - PV(t) \quad (13)$$

Para el control de levitación se utilizó un Arduino Nano, en combinación a un circuito de modulación para alimentar al electroimán. El circuito se detalla en la siguiente imagen.

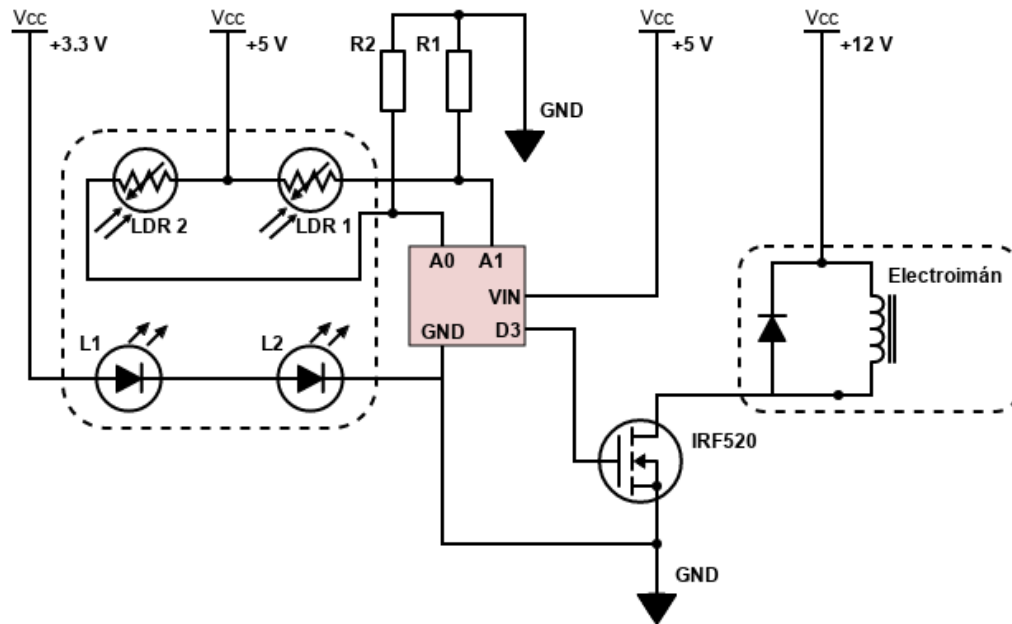


Figura 21: Circuito sistema control y actuador.

Como es posible observar, la alimentación del sensor y del procesador fue realizada con 5 Volts, y la alimentación del electroimán con 12 Volts. L1 y L2 son láser rojo, R1

y R2 las resistencias de descarga, de valor 4,7 kOhm, LDR1 y LDR2 corresponden a los fotorresistores de 10 MOhm y el rectángulo de color al procesador Nano, en donde solo se indican las conexiones utilizadas.

El principio de funcionamiento del sistema sigue la lógica presentada en el árbol de funciones. Por lo que el procesador recibe la señal proveniente del sensor de posición, filtra la señal aplicando el filtro de Kalman, alimenta el algoritmo del controlador PID, del cual se desprende una señal PWM que modula la alimentación al electroimán, por medio de un MOSFET. Esto es logrado por medio del código adjunto en el anexo 1, en el cual se incluyó una secuencia de calibración, para fijar el *setpoint* del sistema.

La sintonización del controlador será estudiada por medio de un modelo construido en MatLab Simulink en el cual se considera el controlador PID, la función de transferencia descrita anteriormente con la ecuación (10) y una perturbación al sistema para observar la reacción del controlador. Se muestra una imagen del bloque de control a continuación.

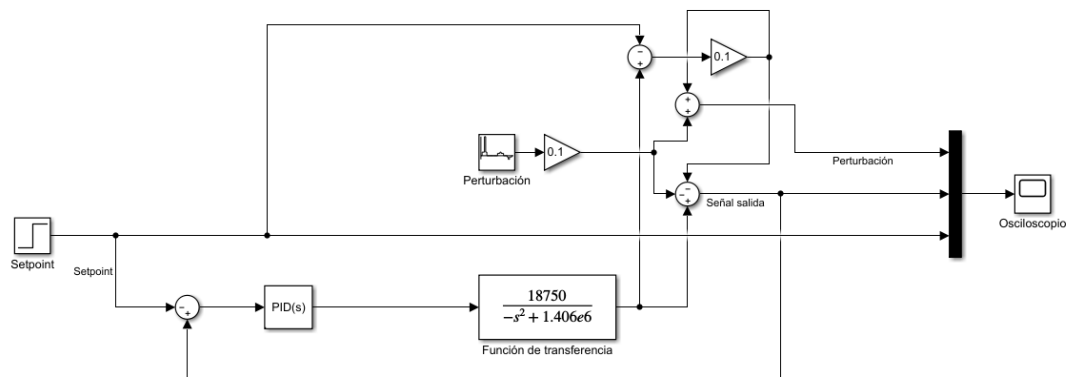


Figura 22: Bloque de control PID Simulink.

Luego de realizar una sintonización en Simulink, se logró definir los siguientes ordenes de magnitud para las ganancias: $K_i = 10^4$, $K_p = 10^7$, $K_d = 10^0$. Con estos parámetros se obtuvo lo siguiente:

Tabla 11: Resultados de sintonización controlador PID en MatLab Simulink.

Tiempo de subida	$2,59 \cdot 10^{-9}$ segundos
Tiempo de estabilización	0,00028 segundos
Exceso	14%
Lazo cerrado	Estable

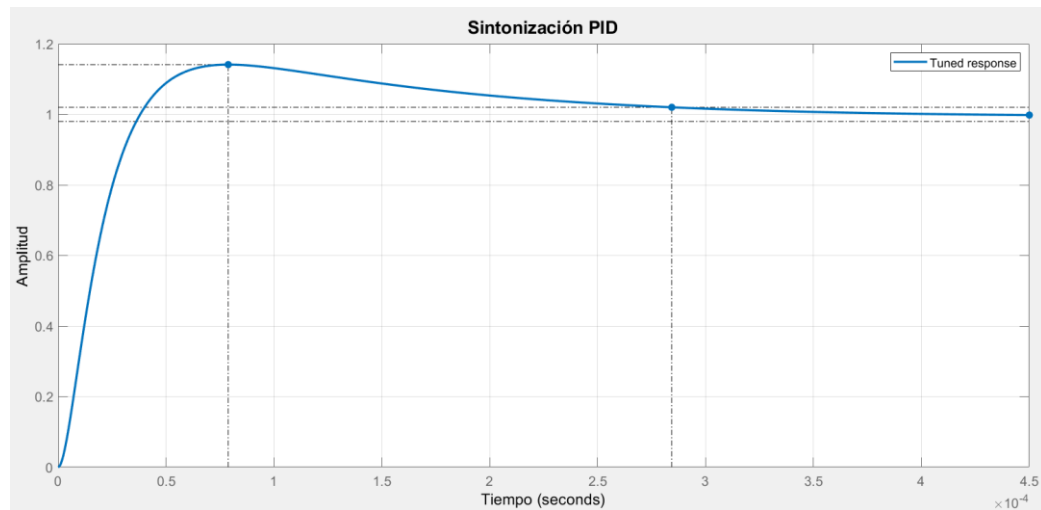


Figura 23: Respuesta de controlador luego de la sintonización.

Finalmente, se probó el control utilizando el bloque antes mencionado en la Figura 22, en el cual se incluye una perturbación al sistema graficado en amarillo en la Figura 24, para observar la reacción del control ante tales desviaciones.

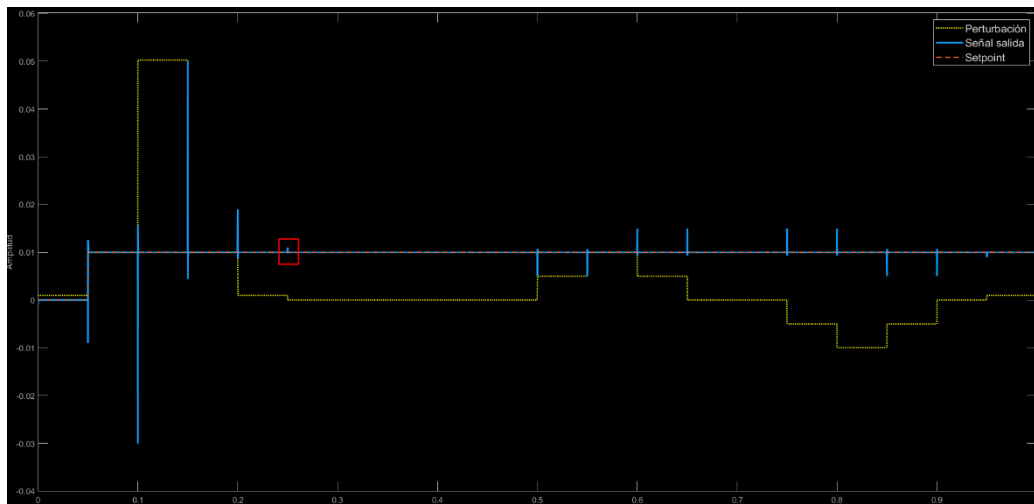


Figura 24: Simulación de control PID con perturbaciones en el sistema.

Como es posible observar, las correcciones a la señal de salida, mostrada en azul, son muy efectivas, manteniendo al sistema en su punto de operación, a pesar de la constante aplicación de esta fuerza externa.

En la Figura 25 es posible observar una ampliación de la señal de salida, con lo que es evidente la agilidad del controlador. Este aumento corresponde al recuadro rojo indicado en la Figura 24. En esta imagen se muestra la reacción del controlador ante una perturbación instantánea de amplitud -0,5, logrando estabilizar la señal de salida en $6 \cdot 10^{-4}$ segundos, alcanzando un valor máximo de $1,1 \cdot 10^{-2}$, equivalente a un aumento del 10% sobre el valor objetivo.

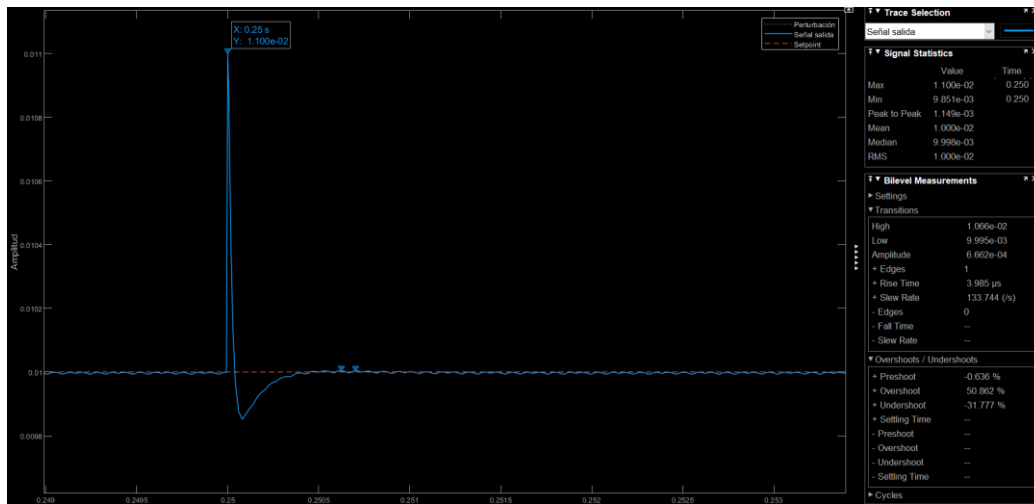


Figura 25: Vista ampliada entre 0,249 y 0,253 segundos de la simulación.

Es importante destacar que los datos para la sintonización del PID son sólo válidos para las variables definidas en la Tabla 10. En caso de cambiar alguno de estos valores será necesario ajustar la función de transferencia y ajustar los parámetros del controlador PID.

4. Capítulo 4 – Prototipo y Resultados

En el presente capítulo se mostrará la construcción del prototipo del equipo y los diferentes sistemas que lo componen, además de los resultados obtenidos durante diferentes pruebas.

Cabe mencionar que dada la situación generada por la pandemia de COVID-19 no fue posible acceder a todos los recursos esperados, como herramientas, laboratorios, etc. Por lo que el prototipo fue construido a escala, enfocado en el desarrollo de cada sistema por separado, logrando resultados exitosos para cada uno, sin embargo, no fue posible obtener una levitación estable, producto de la baja precisión de piezas clave para lograr este objetivo.

4.1. Prototipo

El prototipo consta de 3 partes principales: el electroimán, sensor de posición y sistema de control. Además, la estructura fue modificada levemente para simplificar la construcción.

Para el electroimán se utilizó como núcleo un espárrago M8 de acero el cual se atornilló posteriormente a la estructura (Figura 26). La bobina se enrolló de forma manual utilizando cable de cobre esmaltado 22 AWG, obteniendo un solenoide de 600 vueltas.

Para el sensor de posición se utilizó una resistencia fotoeléctrica y un láser rojo como fuente lumínica, tal como se propuso para el diseño del producto. La principal diferencia con el diseño a escala real es que solo se consideró un par emisor receptor, con el fin de simplificar las pruebas. A pesar de esto, los resultados obtenidos para un par de sensores son válidos para el comportamiento esperado al utilizar dos pares, ya que la finalidad de incluir un segundo par es obtener una lectura más representativa del estado del CubeSat al levitar.

A continuación, se detallarán las partes y elementos utilizados en el prototipo, aparte de las ya mencionadas anteriormente, en conjunto con los resultados obtenidos.



Figura 26: Electroimán atrayendo un imán permanente.

Fuente de poder

Para energizar el sistema se utilizó una fuente de poder de 350 W de potencia (Figura 27), la cual cuenta con alimentación de 5 V y 12 V. La menor tensión se utilizó para alimentar el sistema de control y sensores. Los 12 Volt fueron utilizados para energizar el electroimán.

Cabe mencionar que producto de que la fuente se alimenta de la red domiciliaria, se transmite un leve ruido al sensor, como se verá más adelante, lo que fue mitigado utilizando un filtro antes de utilizar la señal.

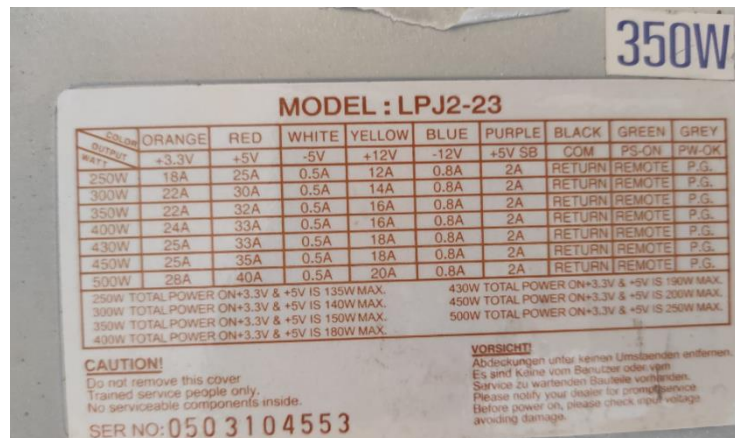


Figura 27: Fuente de poder.

Sensor de posición

Como se mencionó anteriormente, el sensor de posición se construyó utilizando una fotorresistencia (LDR) de 10 MOhm y un láser rojo, dispuestos uno frente al otro, de tal forma que el haz de luz proveniente del láser incida directamente sobre el LDR. El esquema de conexión será detallado más adelante, junto a las conexiones del sistema de control.

Para probar la efectividad de la propuesta para el sensor de posición se realizaron una serie de pruebas las cuales se detallan a continuación.

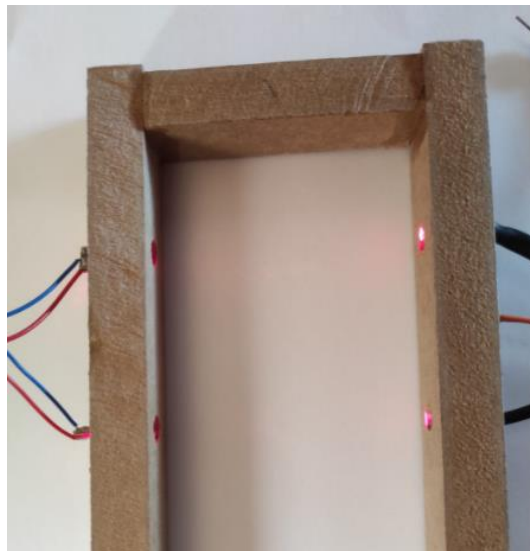


Figura 28: Sensor de posición prototipo.

Prueba de sensibilidad

Para determinar la mejor combinación de elementos a utilizar en el sensor se realizaron ensayos variando la resistencia del foto resistor (1 y 10 MOhm) y la resistencia de descarga. Los ensayos fueron realizados oscilando un péndulo de 100 mm de longitud de tal forma que se interrumpa el haz de luz de forma periódica. De lo que se obtuvieron los siguientes gráficos.

Para el primer ensayo se utilizó un LDR de 1 MOhm, resistencia de descarga de 1 kOhm y alimentación de 5 Volts.

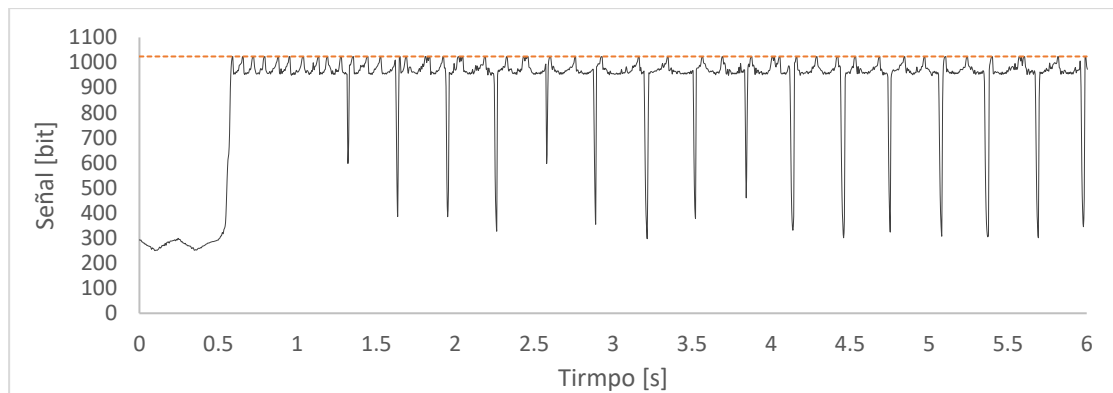


Figura 29: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. LDR 1 MOhm.

Como es posible observar en la gráfica de tiempo vs señal del sensor (Figura 29), el máximo se encuentra cercano a los 1024 bits, lo cual es deseable, ya que de esta forma se utilizará todo el rango disponible. Esto ocurre cuando el sensor se encuentra completamente iluminado. Para el caso de las interrupciones, el sensor alcanza valores hasta los 300 bits aproximadamente, lo que indica que el rango no se está utilizando por completo (rango de 0 a 1024).

Dado este resultado, se modifica el LDR, cambiándolo por uno de mayor valor. Con el LDR de 10 MOhm, 1 kOhm en resistor de descarga y 5 Volt de alimentación se obtuvo lo siguiente.

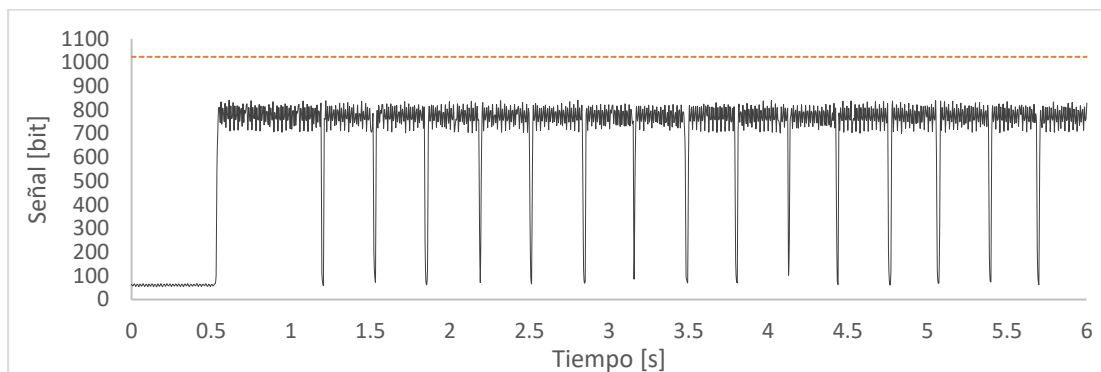


Figura 30: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. LDR 10 MOhm.

Al contrario del ensayo anterior, los valores obtenidos para el mínimo se acercan a 0, pero los valores máximos se encuentran alrededor de los 800 bits, lo que nuevamente limita el rango útil del sensor. Para mejorar esta condición se modifica la resistencia de descarga, aumentándola de 1 kOhm a 4,7 kOhm, con lo que se obtuvo el siguiente resultado.

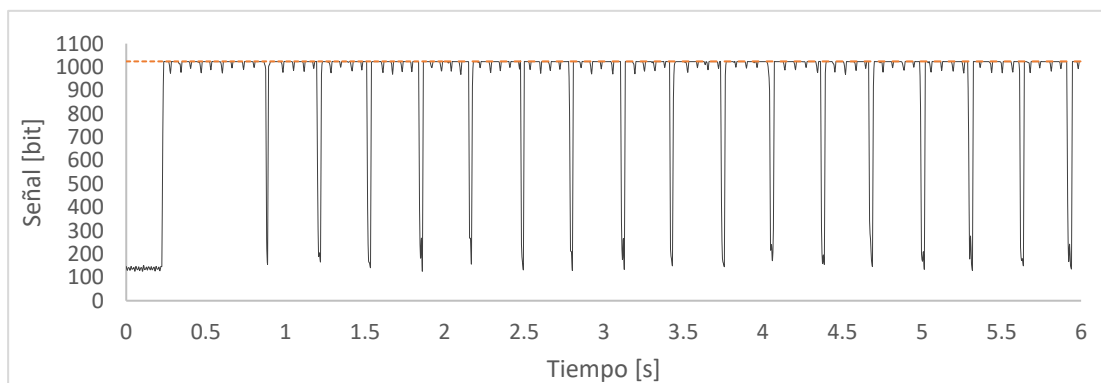


Figura 31: Señal de sensor durante 6 segundo con interrupciones periódicas. Línea de referencia punteada 1024 bits. 4,7 kOhm descarga.

Al observar la Figura 31 queda en evidencia el aumento del rango de trabajo, alcanzando un máximo y un mínimo muy cercanos al rango legible para el procesador del Arduino, que varía entre 1024 y 0 bits, o 5 y 0 Volts.

Para disminuir el mínimo, sería necesario disminuir la iluminación ambiental. Además, es necesario notar que los valores obtenidos son válidos para condiciones

similares a las de las pruebas realizadas, y en caso de haber cambios drásticos será necesario utilizar valores diferentes a los propuestos.

Por otra parte, es posible notar en los tres ensayos la presencia de ruido en la señal. Esto será mitigado utilizando un filtro digital, como se verá más adelante y puede ser mejorado utilizando conexiones soldadas.

A partir de estos resultados fue posible seleccionar la combinación adecuada de variables. Fotorresistor de 10 MOhm, resistencia de descarga 4,7 kOhm y tensión de alimentación de +5 V. Como se mencionó anteriormente, las condiciones ambientales de iluminación pueden requerir un ajuste en las variables del sensor. Se recomienda ajustar la resistencia de descarga para modificar el límite superior de medición.

Prueba velocidad de detección

Para esta prueba se utilizó un péndulo variando su largo entre 50, 200 y 800 mm, el cual se hizo oscilar de forma tal que al alcanzar su máxima velocidad corte el haz de luz del sensor. Con esta prueba fue posible observar la capacidad del sensor para detectar los cambios de iluminación incidente a diferentes velocidades del objeto.

Las velocidades de cada péndulo se muestran a continuación, las cuales fueron obtenidas utilizando la ecuación de péndulo simple para pequeñas oscilaciones.

$$v_{50} = l \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} = 0,05 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{0,05}} = 0,7 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$v_{200} = 0,2 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{0,2}} = 1,4 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$v_{800} = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{0,8}} = 2,8 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Las velocidades calculadas corresponden a una aproximación y son válidas para los primeros instantes de oscilación, debido a la pérdida de energía que sufre el péndulo,

sin embargo, sirven como referencia. Los resultados se muestran a continuación, desde la Figura 32 hasta la Figura 34.

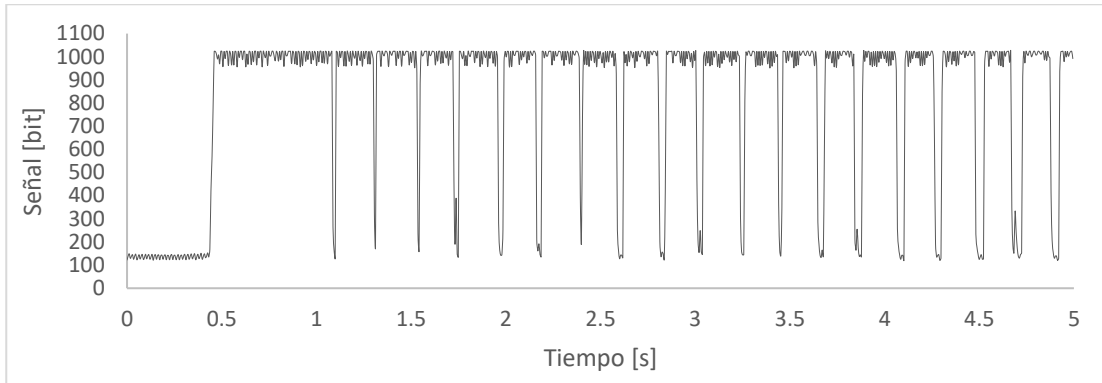


Figura 32: Oscilación péndulo simple $l = 50$ [mm].

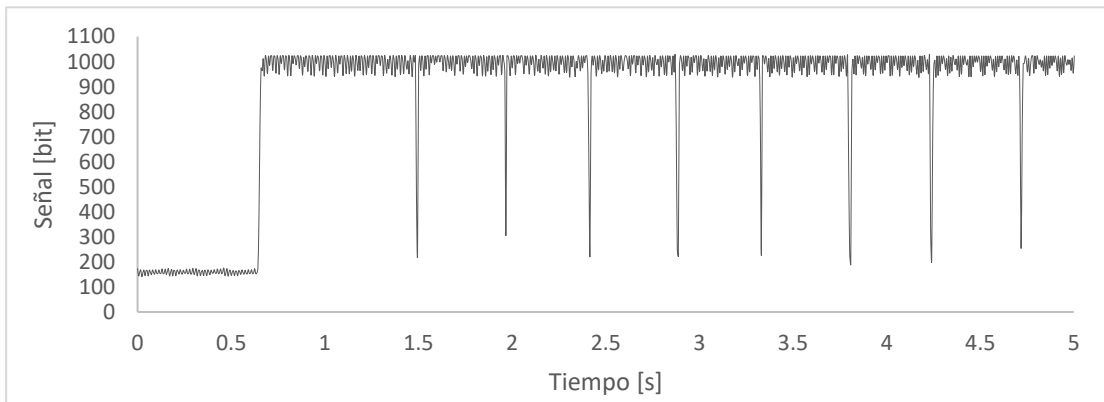


Figura 33: Oscilación péndulo simple $l = 200$ [mm].

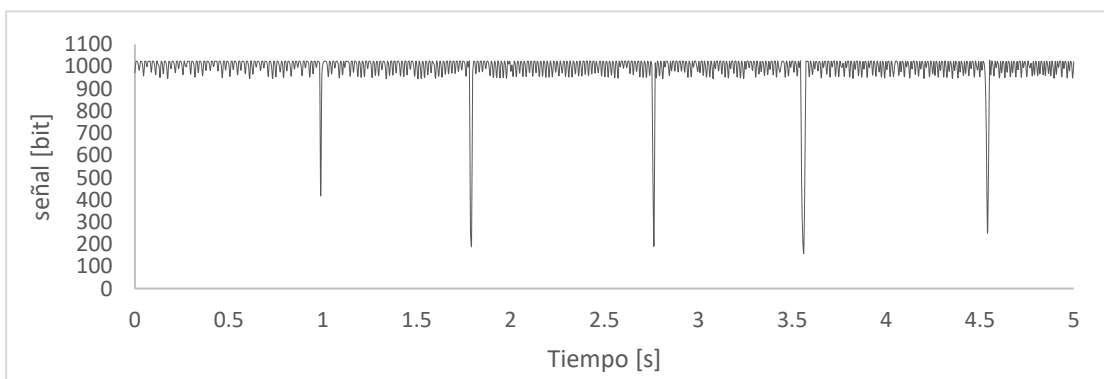


Figura 34: Oscilación péndulo simple $l = 800$ [mm].

Como es posible observar, a medida que aumenta la longitud del péndulo, así lo hizo también el periodo de la oscilación y la velocidad. A pesar del aumento de velocidad, no es posible notar pérdida de información en la señal.

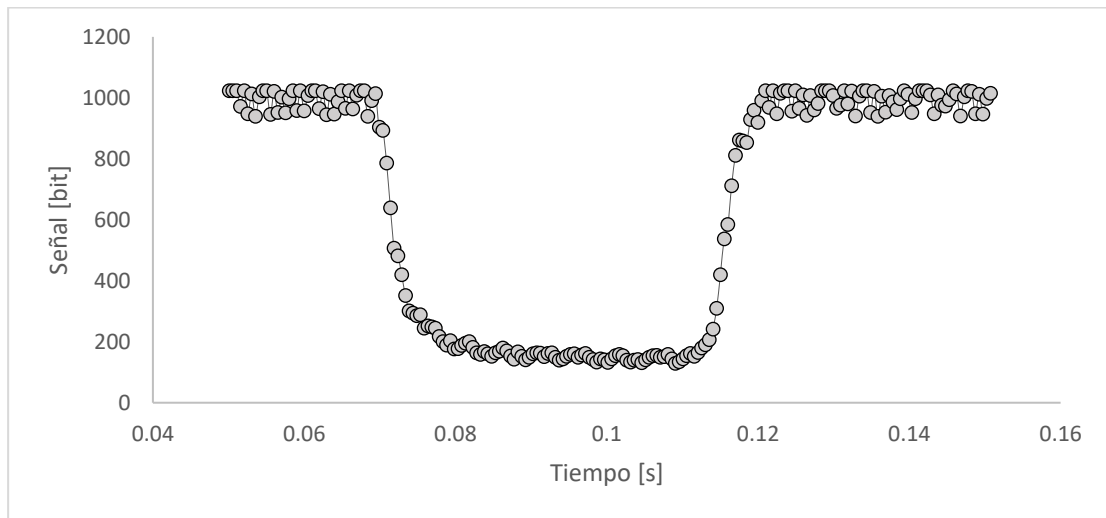


Figura 35: Ampliación de pulso, péndulo $l = 50$ [mm].

Dada la condición de operación del levitador, calculado a partir de un balance de energía, es poco probable que la velocidad de desplazamiento del CubeSat supere 1 metro por segundo, por lo que el punto de operación más similar es cuando el largo del péndulo es igual a 50 mm. Como es posible observar en la Figura 35, el sensor es capaz de medir una gran cantidad de veces mientras se encuentra obstruido durante aproximadamente 0,05 segundos. La Figura 35 corresponde a una ampliación de uno de los pulsos de la Figura 32 a la mayor tasa de transmisión posible (115200 bps).

Prueba de filtro digital (filtro de Kalman)

Dado el ruido detectado en la señal del sensor durante las pruebas anteriores y la necesidad de combinar la señal de ambos receptores, se implementó un filtro de Kalman, el cual de forma digital es capaz de obtener una señal estimada, eliminando la mayor parte del ruido presente en la señal original. Al aplicar el filtro se obtuvieron los siguientes resultados.

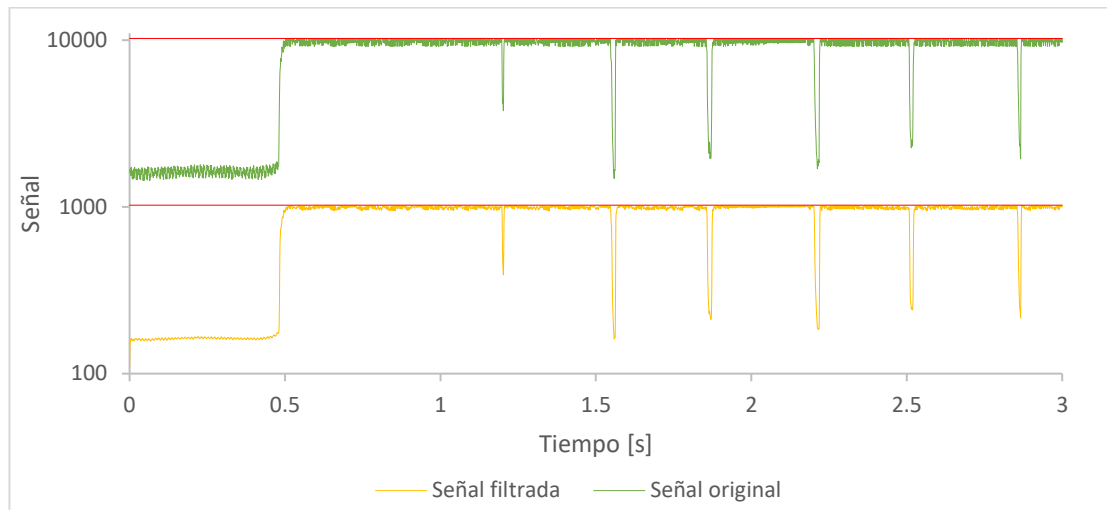


Figura 36: Comparativo de señal filtrada y original. Señal original multiplicada por 10 y graficado en escala logarítmica.

Como es posible observar en la Figura 36, la señal filtrada presenta notablemente menos ruido que la original, resultando en una lectura más apropiada y estable, sin perder el detalle de los pulsos inducidos. Cabe mencionar, que la medición de ambos casos fue realizada al mismo tiempo, tomando el dato original y el filtrado. Además, con el fin de evidenciar la diferencia, se multiplicó por un factor de 10 la señal original y se graficó en escala logarítmica. Un mayor detalle del efecto del filtro se muestra a continuación.

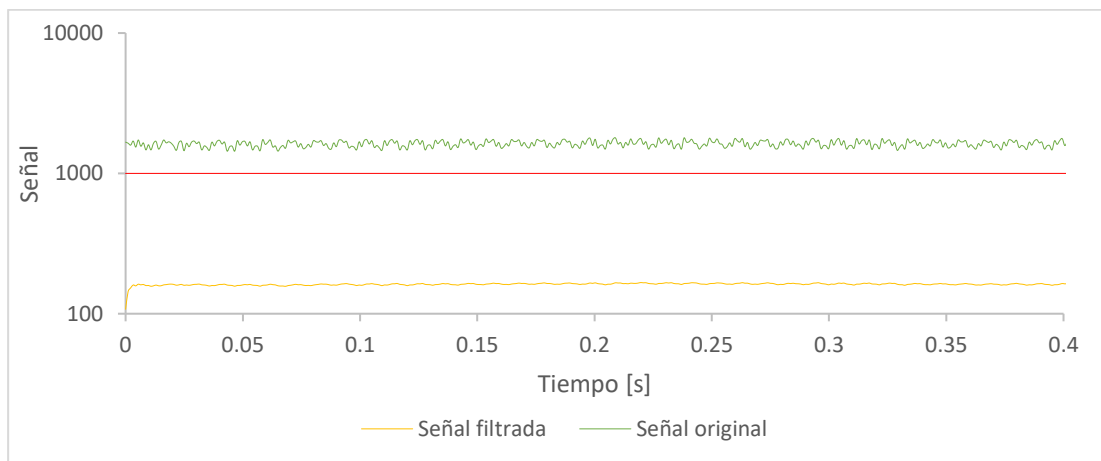


Figura 37: Detalle de comparativo del efecto del filtro de Kalman aplicado.

Es importante tener en cuenta que los parámetros de control del filtro utilizado son modificables y según estos será la señal que se obtenga. Es necesario lograr un balance entre el peso relativo que se le asigna a la medición, estimación y ruido, ya que es posible obtener una curva muy suave, pero a la vez generar una pérdida de sensibilidad cuando se presentan cambios repentinos, lo que no es deseable. Parámetros, encontrados de forma experimental:

- Incertidumbre medición: 5
- Incertidumbre estimación: 2
- Ruido: 0,1

Finalmente, la resolución del sensor estará limitada por la resolución del procesador, por lo que al utilizar un procesador ATMEL Mega328 la máxima resolución posible es de 10 bits, lo que significa que el procesador será capaz de discriminar variaciones de tensión desde 0.0048828125 Volts, es decir, 1024 divisiones en el rango de trabajo de 0 a 5 Volts.

Electroimán

El electroimán fue construido con cable de cobre esmaltado 22 AWG. La bobina tiene aproximadamente 30 metros de cable, lo que significa aproximadamente 360 vueltas y está enrollada sobre un perno M8 de acero al carbono.



Figura 38: Electroimán prototipo.

Dado el número de espiras, dimensiones y material del actuador es posible obtener de forma teórica la fuerza de atracción del electroimán. Considerando lo siguiente: Longitud (l): 35mm; Vueltas (N): 360; Área del núcleo (S): 50,27 [mm²]; Permeabilidad (μ_0): $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]; Distancia (d): 10 [mm]; Corriente (I): 5 [A].

$$F = \frac{(N \cdot I)^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{2d^2} = 0,02 \text{ [N]}$$

Con esto, la fuerza de atracción del actuador es igual a 0,02 [N], a 10 mm de distancia. Claramente estos valores son de referencia y es posible modificarlos variando tanto la distancia entre el electroimán y el imán permanente y la corriente de alimentación. Por otra parte, el cálculo anterior solo considera la fuerza de atracción del electroimán a una pieza ferromagnética, no a un imán. Lo que significa que la fuerza de atracción entre ambas partes será mayor y dependerá además del valor de potencia del imán permanente utilizado.

4.2. Planos

A continuación, se enumerarán los planos con el detalle de cada parte del equipo. Se indicará una pequeña imagen referencial para acceder al archivo completo, dado el tamaño de cada plano.

- [Conjunto completo](#)

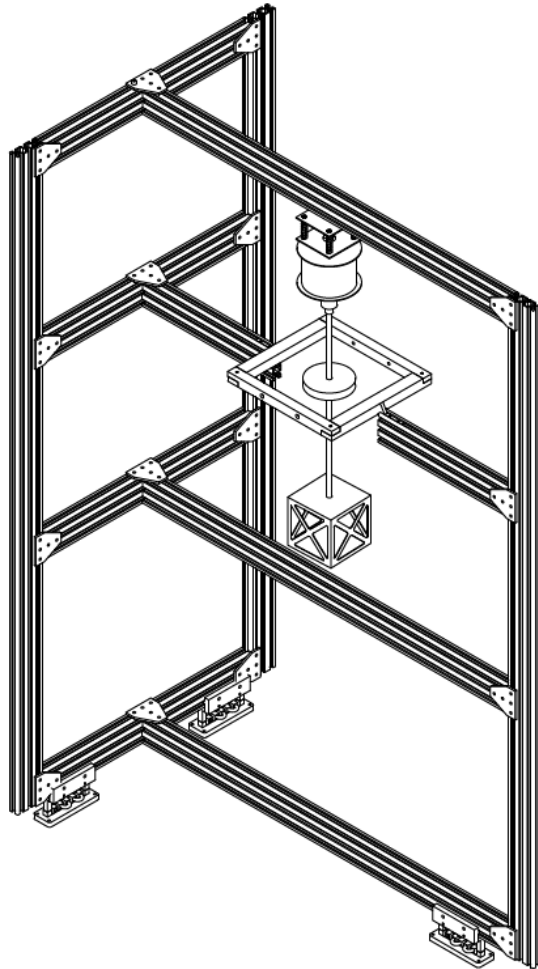


Figura 39: Imagen referencial de plano de estructura y conjunto.

- [Electroimán](#)

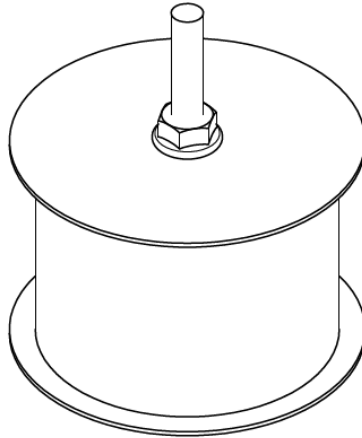


Figura 40: Imagen referencial de plano de electroimán.

- [Soporte electroimán](#)

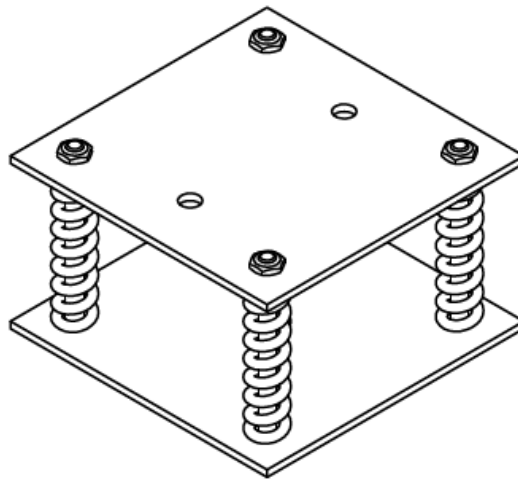


Figura 41: Imagen referencial de plano del soporte electroimán.

- [Soporte base de estructura](#)

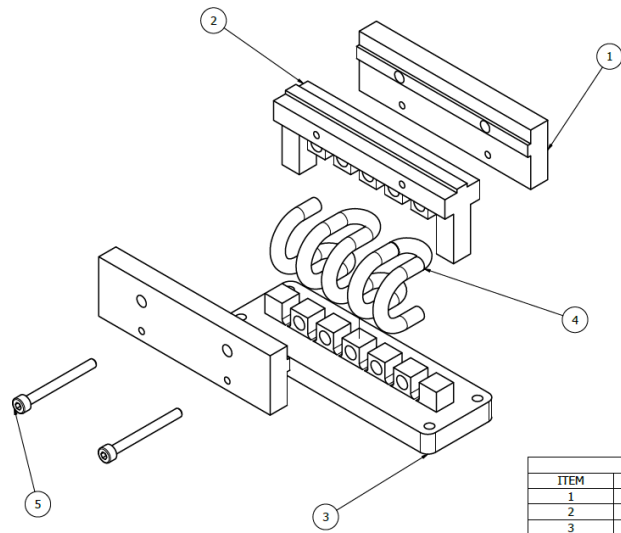


Figura 42: Imagen referencial de plano del soporte de la estructura.

- [Soporte CubeSat](#)

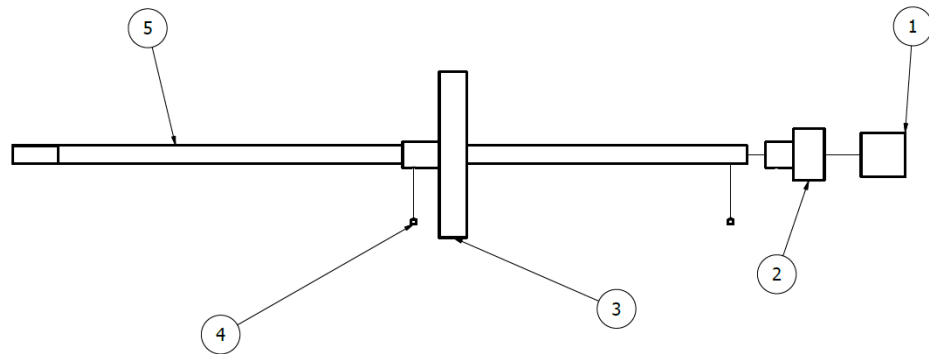


Figura 43: Imagen referencial de plano del soporte para el CubeSat.

- [Sensor de posición](#)

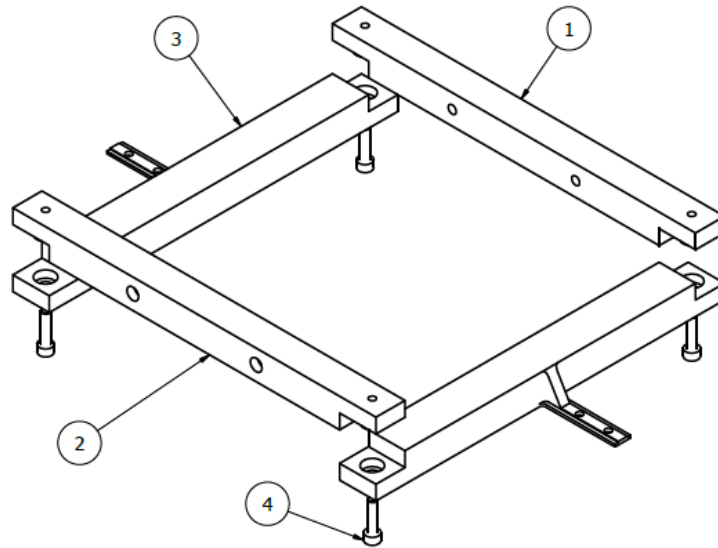


Figura 44: Imagen referencial de plano de la estructura para el sensor de posición.

5. Conclusión y recomendaciones

La levitación magnética es un recurso de gran utilidad para la simulación de condiciones de cero fricción, pero, representa un gran desafío de diseño. A pesar de esto, fue posible lograr un diseño de detalles del banco de prueba y la construcción de un prototipo a escala, permitiendo simular los principales elementos del sistema con una combinación de pruebas simples y simulaciones computacionales.

Como parte de este prototipo a escala se fabricó un electroimán funcional, manteniendo una operación estable y capaz de atraer objetos livianos sin dificultad, con un sistema de control asociado, regulado por un sensor de posición, el cual también fue diseñado y construido con elementos de electrónica básica, incluyendo también en el desarrollo la implementación de un filtro digital, para proporcionar una señal más estable.

Se desarrolló un sistema de control PID para mantener la levitación, el cual presentó dificultades para alcanzar gran precisión en la fabricación de los componentes, lo que debe ser considerado para próximas iteraciones del banco de pruebas. Dada esta dificultad, no fue posible ajustar adecuadamente el controlador para sostener la levitación de forma estable. Sin embargo, fue posible validar el sistema de control a través de una simulación del sistema dinámico, logrando establecer un comportamiento estable y predecible en el tiempo.

Se recomienda que para próximas iteraciones se considere mecanizar las piezas que conformarán la estructura, para alcanzar la precisión requerida, como también utilizar sensores de posición con mayor área, para aumentar el rango de lectura de éste. Por medio de la combinación de estas modificaciones, se cree que es posible conseguir un mejor comportamiento del prototipo, para luego poder llevarlo a escala real.

Referencias

- [1] S. Jackson, "About CubeSat Launch Initiative," 2017. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/content/about-cubesat-launch-initiative>. [Accessed: 16-Dec-2019].
- [2] "Chile lanza su primer satélite desde la India - Noticias Infoespacial América." [Online]. Available: <http://www.infoespacial.com/latam/noticias.php?noticia=4314&=1>. [Accessed: 20-Jun-2021].
- [3] *Introduction to Engineering Physics - S. MOHAN - Google Books.* .
- [4] H.-S. Han and D.-S. Kim, *Magnetic Levitation*, vol. 13, no. 3. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016.
- [5] H. Yaghoubi, "The Most Important Maglev Applications," *J. Eng.*, vol. 2013, no. 6, pp. 1–19, 2013.
- [6] E. Grossman and I. Gouzman, "Space environment effects on polymers in low earth orbit," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 208, no. 1–4, pp. 48–57, 2003.
- [7] F. M. Hicks, "Characterization on a magnetically levitated testbed for electrospray propulsion systems," *MIT Masters Thesis*, pp. 1–82, 2014.
- [8] C. Montes, "La carrera espacial chilena," *Diario La Tercera*, 2018.
- [9] "SUCHAI I continúa sus logros en el espacio - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas - Universidad de Chile," *Comunicaciones FCFM - UChile*, 2017.
- [10] "Equipo USM CubeSat logra destacada participación en concurso on-line de nanosatélites · USM Noticias · Universidad Técnica Federico Santa María," *Dirección General de Comunicaciones UTFSM*, 2021. [Online]. Available: <https://noticias.usm.cl/2021/01/29/equipo-usm-cubesat-logra-destacada-participacion-en-concurso-on-line-de-nanosatelites/>. [Accessed: 09-May-2021].
- [11] R. W. C. Edited by G.L. Weissler, "Properties of materials used in vacuum technology," in *Methods in Experimental Physics*, vol. 14, no. C, Academic Press, 1980, pp. 345–423.
- [12] "'Supermalloy' : a New Magnetic Alloy," *Nature*, vol. 161, no. 4093, pp. 554–554, Apr. 1948.
- [13] G. Lee, "Materials for Ultra-High Vacuum," *Fermi Natl. Accel. Lab.*, pp. 0–2, 1989.
- [14] P. S. Maybeck, "STOCHASTIC MODELS, ESTIMATION, AND CONTROL, Volume 1, Peter S. Maybeck.pdf," in *Stochastic, Models, Estimation, and Control, Vol. 1*, 1979.
- [15] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, Quinta. 2003.
- [16] T. Wescott, "PID Without a PhD Author 's Note :," 2016.