



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño del Control de un Sistema de Levitación Magnética
para un Prototipo de Hyperloop

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR/A: Maté Orozco, Eduardo

Tutor/a: Blasco Giménez, Ramón Manuel

Cotutor/a: Martínez Turégano, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

A mis padres, quienes me han dado todo lo que me ha permitido estar aquí.

A mi familia, por apoyarme durante todo el camino.

A mis amigos por sus consejos y siempre estar ahí.

*A todos mis compañeros de Hyperloop UPV por acompañarme
en esta aventura, por enseñarme tantas cosas, por permitirme
disfrutar como lo he hecho en los buenos y malos momentos,
por ser tan increíbles y ser parte de mí.*

A Fredy y Guille, por compartir su conocimiento y permitir que esto fuera posible.

A Javi, por darme la oportunidad, confiar en mí y ser un referente.

*A Cris por su infinita paciencia, por soportarme y apoyarme todo este tiempo,
por todas las cosas que hace por mí, por enseñarme mucho más de lo
que nunca imagine y cambiar mi forma de ser y ver las cosas.*

*Sin todos vosotros nunca hubiera sido capaz de seguir,
ni de lograr nada, os debo todo lo que soy*

Gracias, de corazón.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el desarrollo del sistema de control para la tecnología de levitación magnética desarrollada por el equipo universitario Hyperloop UPV para su vehículo prototipo Auran. Este prototipo participara en la European Hyperloop Week en su segunda edición realizada en Delft.

Los principales objetivos planteados para el sistema de control son el que sea capaz de lograr la levitación de forma estable y con un bajo consumo de energía, así como que el sistema sea robusto ante la presencia de perturbaciones o elementos desestabilizantes.

El trabajo aquí presentado se centrará en el diseño del sistema de control tanto para una bancada de prueba como para el prototipo, se incluirá como parte del trabajo el diseño y desarrollo de dicha tecnología de levitación magnética. Así como contexto de otros elementos necesarios para el funcionamiento del sistema.

El trabajo abarcará las fases de modelado, diseño, identificación, simulación e implementación del mencionado sistema detallándose los pasos y decisiones tomadas durante las diferentes fases que comprenden el diseño, fabricación, montaje, testeo y validación.

ABSTRACT

This work consists in the development of the control system for the magnetic levitation technology developed by the Hyperloop UPV university team for its prototype vehicle Auran. This prototype will participate in the second edition of the European Hyperloop Week held in Delft.

The main objectives set for the control system are to be able to achieve stable levitation with low energy consumption, as well as for the system to be robust in the presence of disturbances or destabilising elements.

The work presented here will focus on the design of the control system for both a test bench and the prototype, and will include as part of the work the design and development of the magnetic levitation technology. As well as the context of other elements necessary for the operation of the system.

The work will cover the phases of modelling, design, identification, simulation and implementation of the system, detailing the steps and decisions taken during the different phases comprising design, manufacture, assembly, testing and validation.

RESUM

El present treball consistix en el desenvolupament del sistema de control per a la tecnologia de levitació magnètica desenvolupada per l'equip universitari Hyperloop UPV per al seu vehicle prototip Auran. Este prototip participara en l'European Hyperloop Week en la seua segona edició realitzada en Delft.

Els principals objectius plantejats per al sistema de control són el que siga capaç d'aconseguir la levitació de forma estable i amb un baix consum d'energia, així com que el sistema siga robust davant de la presència de perturbacions o elements desestabilizantes.

El treball ací presentat se centrarà en el disseny del sistema de control tant per a una bancada de prova com per al prototip, s'inclourà com a part del treball el disseny i desenvolupament de la dita tecnologia de levitació magnètica. Així com context d'altres elements necessaris per al funcionament del sistema.

El treball compreguera les fases de modelatge, disseny, identificació, simulació i implementació del mencionat sistema detallant-se els passos i decisions preses durant les diferents fases que comprenen el disseny, fabricació, muntatge, testeo i validació.

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I. MEMORIA DESCRIPTIVA	6
DOCUMENTO II. ANEXOS	237
DOCUMENTO III. PRESUPUESTO.....	244
DOCUMENTO IV. PLIEGO DE CONDICIONES.....	252
DOCUMENTO V. PLANOS	260

DOCUMENTO I.

MEMORIA

DESCRIPTIVA

ÍNDICE MEMORIA DESCRIPTIVA

1. OBJETIVO	9
2. ANTECEDENTES	10
2.1. Hyperloop: el medio de transporte del futuro	10
2.2. Hyperloop UPV	12
2.3. European Hyperloop Week.....	14
2.4. El vehículo prototipo Auran	15
3. POSIBLES SOLUCIONES	18
3.1. Requisitos técnicos.....	18
3.1.1. Bancada de levitación.....	18
3.1.2. Auran.....	19
3.2. Sistemas adoptados	21
3.2.1. Unidades de levitación.....	21
3.2.1.1. Alternativas	21
3.2.1.2. Sistema final (HEMS).....	22
3.2.2. Unidades de guiado	33
3.2.2.1. Alternativas	33
3.2.2.2. Sistema final (EMS)	34
3.2.3. Sistema de propulsión.....	39
3.2.3.1. Alternativas	40
3.2.3.2. Sistema final (DLIM).....	41
3.2.4. Sistema eléctrico - electrónico	47
3.2.4.1. Alternativas	47
3.2.4.2. Sistema final (LCU & LPU's)	47
4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL	51
4.1. Sistema adoptado	51
4.1.1. Alternativas	51
4.1.2. Sistema final	52
4.1.2.1. Bucle de posición.....	54
4.1.2.2. Bucle de corriente	56
4.2. Modelado del sistema	56
4.2.1. Bancada de levitación.....	57
4.2.1.1. Modelo no lineal	57
4.2.1.2. Modelo lineal	62
4.2.2. Auran.....	67
4.2.2.1. Modelo no lineal	68
4.2.2.2. Modelo lineal	82

4.3.	Identificación del sistema	87
4.3.1.	Unidades de levitación (HEMS)	88
4.3.1.1.	Caracterización fuerza	88
4.3.1.2.	Caracterización inductancia.....	92
4.3.2.	Unidades de guiado (EMS)	94
4.3.2.1.	Caracterización fuerza	95
4.3.2.2.	Caracterización inductancia.....	98
4.3.3.	Sensores.....	99
4.3.3.1.	Sensor de air gap	100
4.3.3.2.	Sensor de corriente.....	101
4.3.4.	Ajuste del modelo	102
4.4.	Diseño del sistema.....	103
4.4.1.	Control de posición	105
4.4.1.1.	Adquisición de datos y obtención variables de estado	105
4.4.1.2.	Control por espacio de estados.....	109
4.4.2.	Control de corriente.....	123
4.4.2.1.	Adquisición de datos	124
4.4.2.2.	Control PI	125
4.5.	Simulaciones.....	127
4.5.1.	Bancada de levitación.....	128
4.5.2.	Levitación estática Auran	133
4.5.2.1.	Validación del control.....	135
4.5.2.2.	Despegue	143
4.5.2.3.	Aterrizaje	150
4.5.2.4.	Levitación estática completa	154
4.5.3.	Levitación dinámica Auran.....	159
4.6.	Implementación y resultados.....	168
4.6.1.	Implementación del control	168
4.6.2.	Testing.....	171
4.6.3.	Resultados experimentales.....	174
4.6.3.1.	Bancada de levitación	174
4.6.3.2.	Levitación Auran.....	194
5.	CONCLUSIÓN	230
5.1.	Objetivos alcanzados.....	230
5.2.	Premios	231
6.	TRABAJOS FUTUROS	233
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	235

1. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el diseño del sistema de levitación y guiado electromagnéticos y especialmente el sistema de control necesario para las mismas que el equipo Hyperloop UPV incluirá en el prototipo Auran. Siendo este prototipo el primero en la historia del equipo que contara con un sistema de levitación activo.

El sistema de control deberá ser capaz de lograr que el vehículo levite de forma estable buscando un bajo consumo de corriente. También deberá ser capaz de soportar la perturbación introducida por la aceleración y frenado.

Las principales características de debe satisfacer el sistema de levitación y guiado se presentan a continuación:

- A nivel de consumo deberá buscarse un bajo consumo en condiciones de levitación nominales, ya que todo el sistema de levitación compuesto por 10 unidades se alimentará a partir de dos baterías de 25 V dispuestas en serie.
- A nivel de diseño la fuerza ejercida por las unidades deberá ser capaz de levantar el vehículo de forma controlada desde el suelo hasta la altura de levitación y regresar al mismo. Todo mientras se mantiene el control sobre el vehículo.
- A nivel de control, se deberá ser capaz de asegurar la estabilidad del sistema en todo momento, evitando oscilaciones bruscas y siendo especialmente robusto ante perturbaciones introducidas por elementos internos (motor) y externos (desalineamientos, irregularidades, etc.)

Por último, este documento pretende marcar también pautas y ser referencia para futuras generaciones en Hyperloop UPV. Tanto en el diseño de unidades de levitación y su control como para el trabajo con sistemas electromagnéticos en general.

2. ANTECEDENTES

La sociedad avanza de manera constante y cada vez cuesta menos que se produzcan cambios significativos. Esta evolución requiere que la tecnología se adapte y sea capaz de ofrecer alternativas para cubrir las demandas tanto sociales como económicas, medioambientales y energéticas. Siendo estas más protagonistas estas cada vez.

Un sector vital a la hora de conectar el mundo y permitir que sea tal y como lo conocemos tanto a nivel económico como sociocultural es el del transporte. En los últimos años los desplazamientos han proliferado y avanzado del ámbito más local a cubrir largas distancias internacionales, esto ha provocado una creciente importancia del transporte aéreo (a pesar de la pandemia). Sin embargo, el efecto medioambiental de esto es nefasto.

La ruptura de fronteras políticas y culturales, promovida por la evolución de las sociedades, ha traído consigo la globalización tanto económica como cultural. El auge del comercio online ha hecho que los potenciales clientes ya no se limiten a buscar los productos o servicios que deseen en su entorno más cercano, sino que prefieran romper fronteras y satisfacer sus necesidades sin pensar en la ubicación de la solución.

El alargamiento de las cadenas de suministro industriales, la globalización de las compañías y la internacionalización del turismo requieren de un medio de transporte ágil, seguro y respetuoso con el medio ambiente que permita el crecimiento y la evolución de la sociedad, pero garantizando el compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este contexto nace Hyperloop.

2.1. Hyperloop: el medio de transporte del futuro

Los medios de transporte convencionales están muy desarrollados y al límite de sus posibilidades. Buscando una revolución en este sector clave Elon Musk trató por primera vez en 2012 el concepto de Hyperloop. Un año más tarde SpaceX publicó el documento Hyperloop Alpha [1] donde se detallan conceptos básicos de esta tecnología.

La idea era desarrollar un medio de transporte rápido, eficiente, seguro, de bajo coste y sostenible. Para lograr esto este transporte debería desplazarse en el interior de un tubo de baja presión mediante una capsula que se transporta a alta velocidad. Estas capsulas contarían con elevación aerodinámica y la aceleración se realizaría mediante un motor

lineal posicionado en varias estaciones del tubo, estando los secundarios del motor en la capsula. En cuanto a los pasajeros, estos podrían entrar o salir de las capsulas en los extremos del tubo o bien en ramificaciones. En la Figura 1 Se muestra el diseño conceptual de este medio de transporte.

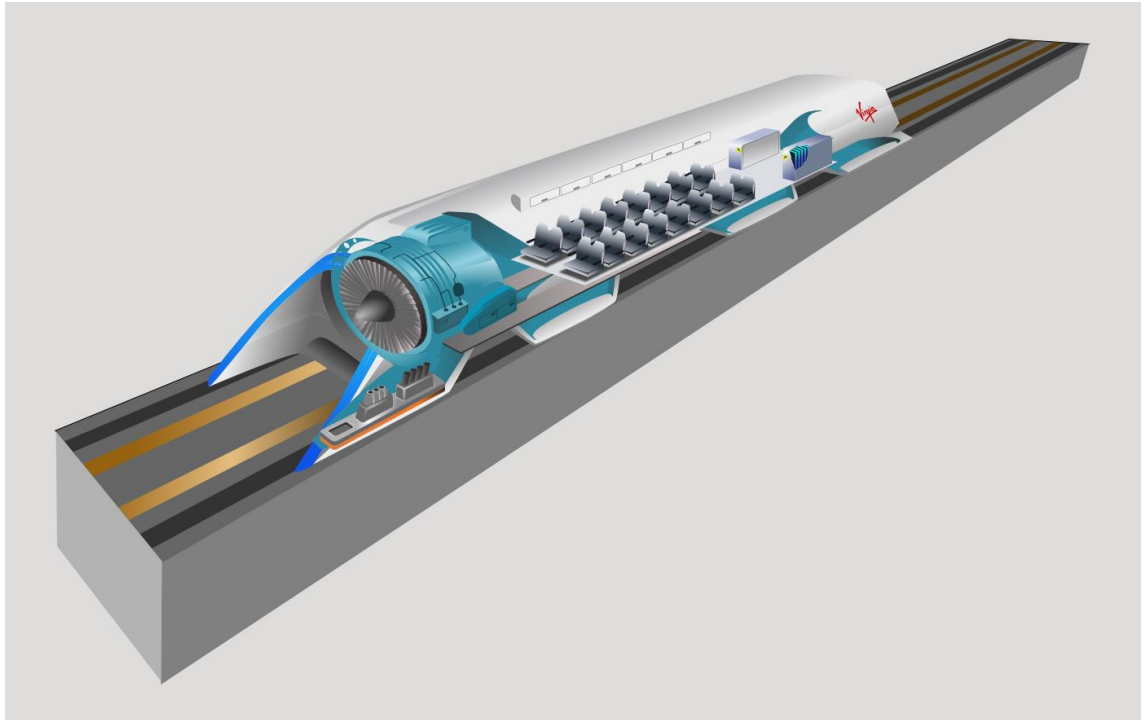


Figura 1. Diseño conceptual de Hyperloop

La principal novedad de este medio de transporte es la de limitar el rozamiento al máximo. La carga aerodinámica debida a la alta velocidad se vería reducida gracias a la baja presión y el rozamiento mecánico es eliminado mediante el sistema de levitación y guiado magnéticos.

Para el desarrollo de esta tecnología, Elon Musk creó la Hyperloop Pod Competition, una competición universitaria en la que los estudiantes podían presentar sus prototipos y probarlos en las infraestructuras proporcionadas por SpaceX.

A partir de ese momento, la comunidad hyperloop ha ido creciendo a nivel mundial con la aparición de nuevos equipos universitarios y la generación de empresas que pretenden llevar esta tecnología al plano comercial. Entre estas empresas cabe destacar la valenciana Zeleros [2], única empresa de hyperloop en España que ha presentado su prototipo (Figura 2) o empresas internacionales como Hardt o Swisspod.

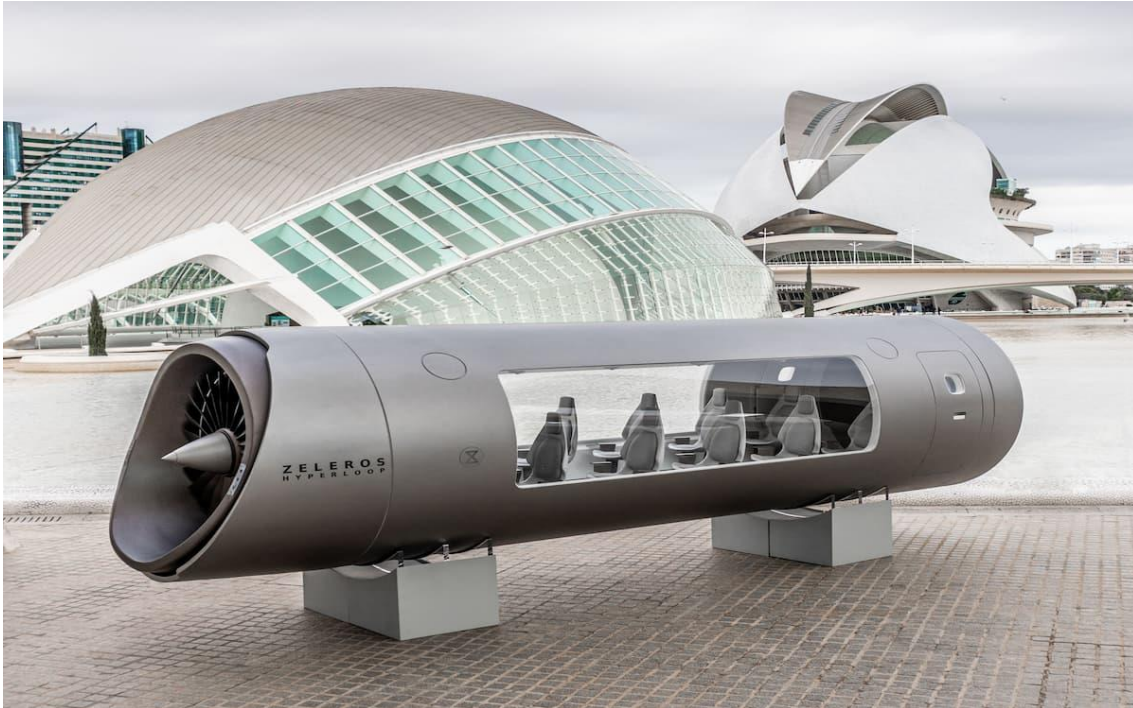


Figura 2. Prototipo de Zeleros Hyperloop

2.2. Hyperloop UPV

Hyperloop UPV es un equipo de estudiantes de la Universitat Politècnica de València (UPV) que está trabajando en el desarrollo del transporte del futuro. El equipo forma parte del grupo de Generación Espontánea UPV, una plataforma que permite a los estudiantes de la UPV emprender sus proyectos cubiertos por la comunidad universitaria y el equipo rectoral.



Figura 3. Conjunto de los integrantes de la séptima generación de Hyperloop UPV

Los inicios del equipo se remontan al año 2016, cuando un grupo de 5 estudiantes que en ese momento formaban parte de Makers UPV, decide presentarse a la Hyperloop Pod Competition organizada por SpaceX y obtienen el Premio al mejor diseño de Concepto y el Premio al mejor sistema de Propulsión, los dos únicos premios a los que habían aplicado.

En ese momento es cuando decidieron formar Hyperloop UPV, con el objetivo no solo de diseñar sino de fabricar un prototipo con el que presentarse a la siguiente edición de la Hyperloop Pod Competition, en 2017. Atlantic II es el prototipo que el equipo presentó ese año, en colaboración con la Universidad de Purdue. Era un prototipo que incorporaba levitación magnética pasiva y que permitió entrar en el Top 8 de equipos universitarios del mundo.

Más adelante, en 2018, el equipo de Hyperloop UPV creció considerablemente y optó por diseñar y fabricar un prototipo de hyperloop de forma independiente a la Universidad de Purdue. De nuevo, el prototipo, llamado Valentia, logró entrar en el Top8 de la Hyperloop Pod Competition de SpaceX.

Después, en 2019 Hyperloop UPV apostó por diseñar el prototipo más rápido de la historia del equipo: Turian. Este es el último prototipo que se ha presentado en la Hyperloop Pod Competition y que recibió el premio a la innovación.

Por último, en 2020 se buscó mejorar aún más el diseño de Turian, dando lugar al quinto prototipo Ignis que logro el tercer puesto en la European Hyperloop Week.

En 2021 se da un paso adelante tanto en innovación como en escalabilidad presentado: Auran la primera aproximación a un vehículo de hyperloop y el primer prototipo con sistema de levitación, guiado y propulsión magnética, así como con diseño interior y tubo propio.

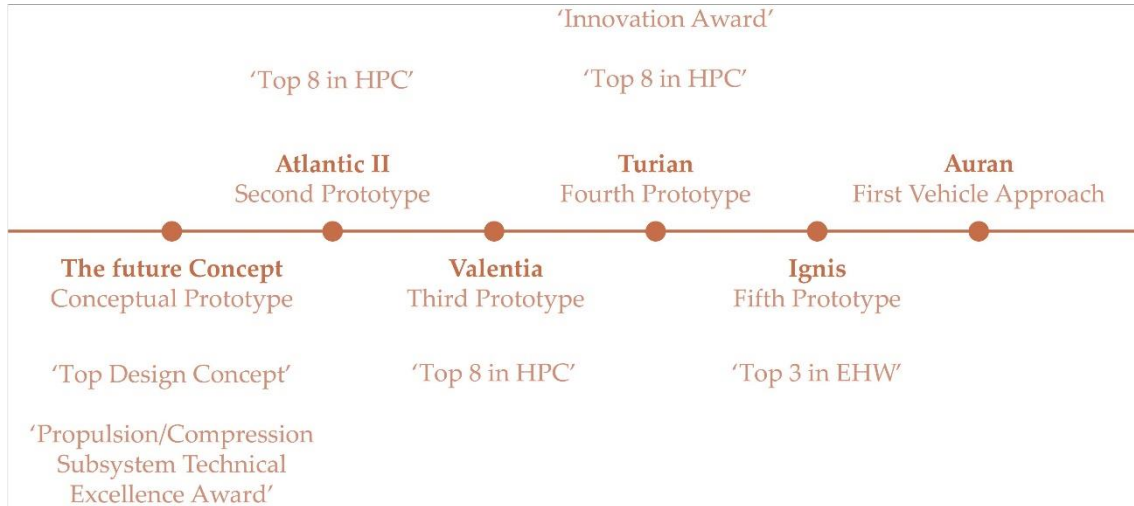


Figura 4. Timeline de los prototipos de Hyperloop UPV

2.3. European Hyperloop Week

La European Hyperloop Week es un evento internacional que ha tenido lugar en Delft del 18 al 24 de Julio de 2022 y que reunirá a agentes impulsores del hyperloop para crear un ecosistema de desarrollo y crecimiento de la tecnología.

El desarrollo del ya conocido como quinto medio de transporte implica consideraciones tanto técnicas como económicas e incluso políticas. En este contexto, la European Hyperloop Week pretende cubrir y tratar la mayor cantidad posible de ellas para realizar un análisis completo de la integración del transporte del futuro en la sociedad.



Figura 5. Logo de la European Hyperloop Week

Esta competición fue creada por cuatro equipos universitarios que buscaban un enfoque distinto a la tecnología más basado en la innovación y la escalabilidad. Estos equipos contaban con experiencia de haber participado en la SpaceX Pod Competition y crearon esta competición durante la cual por una semana se divulgaría conocimiento mediante conferencias y mesas redondas impartidas por empresas del sector además de que todos los equipos que cumpliesen la reglamentación competirían por diferentes premios [3] [4].

2.4. El vehículo prototipo Auran

Auran es el vehículo prototipo que Hyperloop UPV ha presentado a la European Hyperloop Week. Siendo este el año en el que se marca un punto de inflexión y se da un paso hacia delante con la intención de liderar la competición y el desarrollo de esta tecnología alcanzando un nuevo nivel al tratar de levitar, guiarse y propulsarse y frenar sin tocar ninguna superficie, todo esto en el interior de un tubo de 20 metros diseñado específicamente para el prototipo y contando con diseño interior, poniendo el foco en la innovación y la escalabilidad para acercarlo al máximo a una propuesta de hyperloop real [5].

Auran (Figura 6) combina un desarrollo tecnológico con la visión socioeconómica del transporte y supone el mayor reto en los siete años de historia del equipo y el mayor salto realizado.



AURAN

Figura 6. Logo Auran

El prototipo toma como esqueleto un chasis compuesto de aluminio con forma cilíndrica complementado por vigas de fibra de carbono. Todos los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos irán unidos a este esqueleto. Ya sean los guiados verticales, superiores, inferiores, anclaje del motor, unidades de levitación, freno neumático, etc.

A nivel eléctrico todo el vehículo se alimentará a 50 V mediante dos cajas, una para el sistema de levitación y la aviónica y otra para el sistema de propulsión. Esta energía se distribuirá a todas las placas que componen el sistema tanto las de potencia como de control y que se encuentran distribuidas por todo el vehículo por lo que la integración eléctrica cobra vital importancia. Cabe mencionar que todas las placas han sido diseñadas por el equipo.

El sistema electromagnético consta de un motor lineal trifásico de inducción que será el encargado de acelerar y frenar, así como de seis unidades de levitación (HEMS) y cuatro unidades de guiado (EMS) encargadas de que el prototipo se mantenga sin tocar ninguna superficie.

En la Figura 7 se muestra el explosionado del vehículo prototipo con todos los elementos y en la Figura 8 se presenta una imagen del tubo de 20 metros que sirve de infraestructura para Auran.

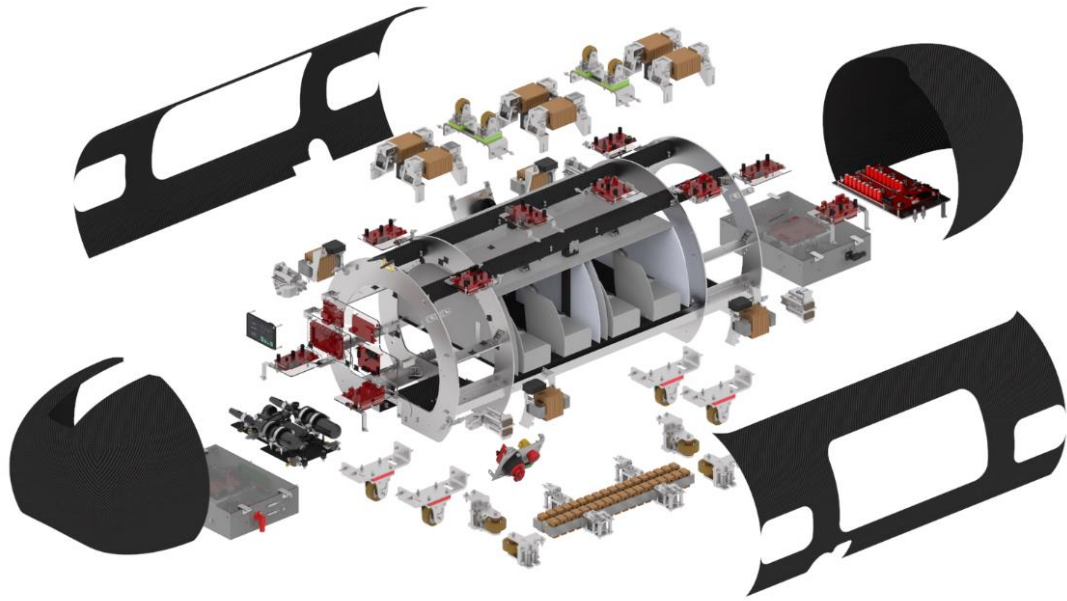


Figura 7. Explosionado Auran

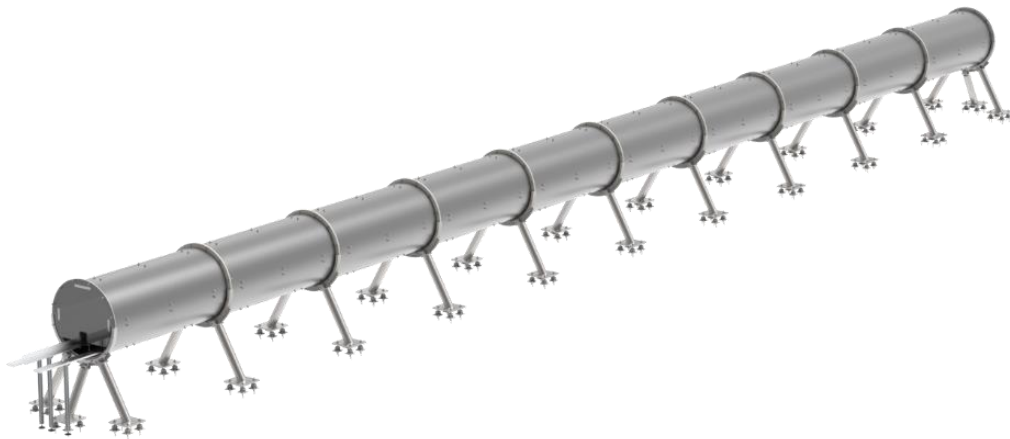


Figura 8. Tubo Hyperloop UPV

3. POSIBLES SOLUCIONES

En este apartado se va a exponer las posibles alternativas que se han planteado para los diferentes sistemas que componen Auran, así como cuál ha sido el sistema final adoptado para cada uno. Es importante destacar que el Auran se compone del trabajo de un equipo de más de 40 personas, siendo el principal marco del trabajo todo lo relacionado con el sistema de control de la levitación, sin embargo, se dará contexto de elementos que se consideran necesarios indicando en cada caso correspondiente que esa parte del trabajo fue realizada por otra persona.

3.1. Requisitos técnicos

En esta sección se plantearán los principales requerimientos que se presentan haciendo hincapié en los sistemas de los que depende el desarrollo del sistema de levitación.

Dicho sistema consta principalmente de dos elementos diferenciados, primero una bancada de levitación que se usara como primera aproximación a la tecnología de levitación y para desarrollar un conocimiento sobre la misma y los requerimientos propios del vehículo prototipo, ligados a su funcionamiento.

3.1.1. Bancada de levitación

La bancada de levitación (Figura 9) busca ser un elemento de pruebas sobre el que ser capaces de realizar la identificación de las unidades tanto de levitación como de guiado, proceso fundamental para poder realizar un control basado en modelos. Además de permitir realizar pruebas de levitación en un entorno más controlado pero que simule las condiciones que se producirán en el funcionamiento normal de Auran.

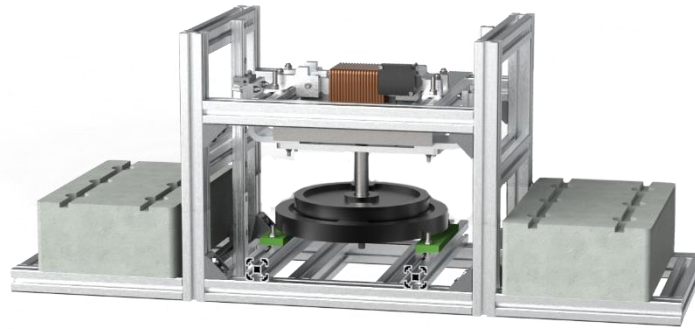


Figura 9. Bancada levitación 1 grado de libertad

Por lo que los principales requerimientos para esta bancada se pueden resumir en:

- Permitir la identificación de las unidades de levitación y guiado (fuerza e inductancia) para todo el rango de air gaps y corrientes en las que se trabajara.
- Servir como primera aproximación a la tecnología permitiendo realizar pruebas con distintas configuraciones mientras se toman datos para su posterior procesamiento y validación.
- Ser capaz de replicar las condiciones de levitación que se darán en funcionamiento del vehículo bajo condiciones controladas.
- Permitir realizar pruebas del sistema de control para validar modelos y el sistema, así como los diferentes elementos que lo componen.

3.1.2. Auran

El principal objetivo del presente proyecto, así como el objetivo final que deriva de la bancada es el de ser capaces de lograr la levitación y guiado magnético del vehículo tanto en estático como en dinámico, todo esto en condiciones de estabilidad y buscando el mínimo consumo de corriente. Los requisitos se pueden separar en dos grupos:

Levitación estática

- Hacer que Auran sea capaz de levitar y guiarse magnéticamente (sin contacto con ninguna superficie) tanto en la bancada de pruebas como en el propio tubo.
- Lograr que el vehículo sea capaz de realizar el despegue (y estabilización) desde el suelo de la infraestructura de la forma más suave posible.
- Implementar un sistema de control que permita realizar la levitación lo más estable posible en torno al punto de equilibrio.

- Alcanzar un sistema con la robustez necesaria para que sea capaz de soportar perturbaciones introducidas.
- Realizar la levitación y el guiado con el mínimo consumo de corriente posible, siempre respetando el resto de los objetivos.
- Asegurar un buen seguimiento de la corriente calculada con respecto a la real introducida en las unidades.

Levitación dinámica

- Seguir cumpliendo todos los requerimientos marcados para la levitación estática.
- Implementar un sistema lo suficientemente robusto como para aguantar la perturbación introducida por la aceleración y frenado del motor.
- Mantener la levitación y guiado a lo largo de todo el recorrido en el interior del tubo (compensando los problemas derivados de imprecisiones en fabricación).

En la Figura 10 se puede ver las diferentes fases que compondrán la levitación dinámica.

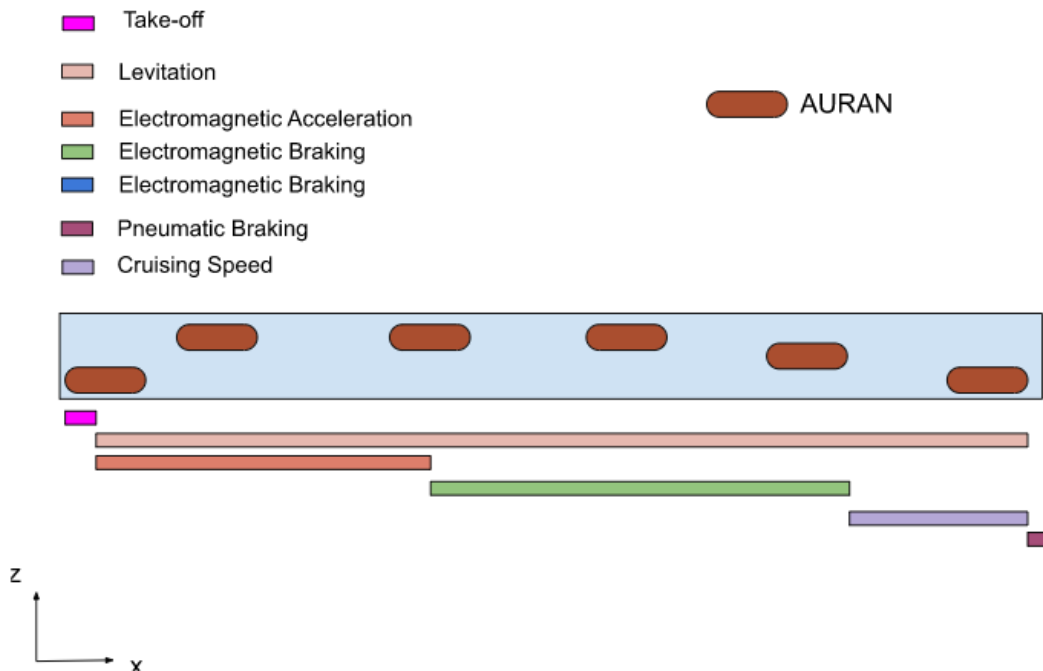


Figura 10. Fases levitación dinámica

3.2. Sistemas adoptados

En esta sección se detallarán las opciones planteadas para cada uno de los sistemas necesarios y la alternativa final tomada, así como la justificación de esta.

3.2.1. Unidades de levitación

Para el sistema de levitación se decidió buscar un sistema activo de levitación que se pueda activar de forma independiente a otros sistemas por lo que ciertas alternativas como podría ser sistemas de patines, etc. quedan descartados. También se descartan previamente otros sistemas de levitación no basados en electromagnetismo por alejarse de la filosofía hyperloop además de por su poca escalabilidad y eficiencia a la hora de aplicarlos para un vehículo [6].

Estas unidades deberán cumplir los requerimientos mencionados en los apartados anteriores teniendo en cuenta que el principal propósito de estas es compensar el efecto del peso del vehículo. El diseño, simulación y realización de los planos de estas unidades, así como de la mayoría de elementos electromagnéticos usados en Auran se desarrollaron principalmente por los Javier Luján González y Rafael Monllor Ballesteros ambos ingenieros industriales.

3.2.1.1. Alternativas

Dentro de las posibles alternativas que se plantearon y que fuesen capaces de adaptarse a los requerimientos las primeras que se descartaron fueron aquellas que requerirían un alto coste para su implementación ya que uno de los objetivos es realizar una propuesta escalable. Esto deja fuera de la ecuación posibilidades tales como el uso de superconductores (además de por limitaciones técnicas) y el uso de sistemas basados en Halbach array ya que requerirían montaje de imanes u otros elementos electromagnéticos (depende de cómo se plantee) a lo largo de la infraestructura lo cual es extremadamente costoso y poco escalable a pesar de que su funcionamiento y eficiencia sean buenos [7].

Tras tener esto en cuenta la alternativa restante se trata de lograr la levitación mediante un sistema basado en electroimanes tal y como se hace en vehículos comerciales con levitación como son los maglevs como se ve en la Figura 11.

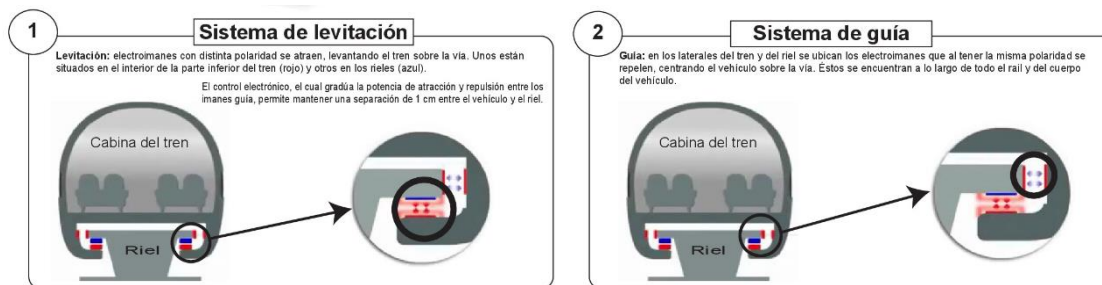


Figura 11. Infografía sistema de levitación y guiado maglev

Este sistema de levitación se basa en la atracción entre polos magnéticos creados y controlados mediante electroimanes, por lo que estos se crean al hacer pasar una corriente por una bobina arrollada alrededor de un núcleo magnético y la fuerza de este “imán” depende de la corriente principalmente (para unas características físicas fijas) [8].

Una de las mayores ventajas de estos sistemas es su alto grado de controlabilidad ya que en régimen nominal la fuerza se relaciona con la corriente aplicada y en caso de salir del rango de trabajo al eliminar la corriente se puede hacer desaparecer el efecto de atracción evitando un choque en caso de estar demasiado cerca. Por el contrario, la principal desventaja es que requieren de un alto consumo energético ya que se debe alimentar la bobina continuamente para que el efecto de atracción siga estando presente por lo que se necesitan altos niveles de potencia durante todo el funcionamiento con todos los problemas asociados a ello. Esta desventaja incumple uno de los requerimientos impuestos por lo que este sistema queda descartado, adoptándose finalmente la solución que se presentara en el próximo apartado.

3.2.1.2. Sistema final (HEMS)

La solución final adoptada es el uso de un sistema basado en la tecnología Hybrid Electromagnetic Suspension (HEMS). Se selecciona esta tecnología ya que es la que mejor se adapta a los requerimientos impuestos que eran el tener un sistema de levitación activa, con un bajo consumo de corriente, que fuera controlable y escalable.

En esta tecnología, los polos magnéticos son creados por imanes permanentes, que proporcionan un flujo magnético constante, y modificados por electroimanes, que proporcionan un flujo magnético variable. Los imanes permanentes compensan el peso del vehículo limitando el consumo de energía sólo al sistema de control, cuya acción sirve para mitigar las perturbaciones. El producto resultante es un sistema muy eficiente, especialmente a bajas velocidades [9].

Es importante señalar que, dado que el flujo resultante es la suma del flujo de los imanes permanentes y del flujo generado en el electroimán, es posible tanto aumentar como disminuir el flujo total dependiendo de si la corriente circula por las bobinas en un sentido o en otro.

Una vez esta tecnología ha sido seleccionada se procedió a definir las necesidades que estas unidades debían cubrir.

- La corriente máxima que circule por las bobinas será de 40 A.
- La levitación se realizará mediante atracción a una plancha en la parte superior del tubo.
- Las unidades deberán permitir que el vehículo cambie de estado de reposo a levitación de forma autónoma.
- El peso de las unidades deberá ser lo más bajo posible.
- El volumen de la unidad, especialmente el de las bobinas, deberá ajustarse al espacio disponible dentro del vehículo.
- Los imanes permanentes utilizados deben cumplir con las normas comerciales y deben ser capaces de mantener el vehículo en levitación, manteniendo una distancia de al menos 17.5 mm de la placa de acero superior.
- El rango de control debe ser superior al 40 %. Este parámetro se define mediante la ecuación 1.

$$\text{Rango de control } (I) = 100 * \frac{F(I = 0) - F(I)}{F(I = 0)} \quad (1)$$

La unidad final diseñada es la mostrada en la Figura 12.

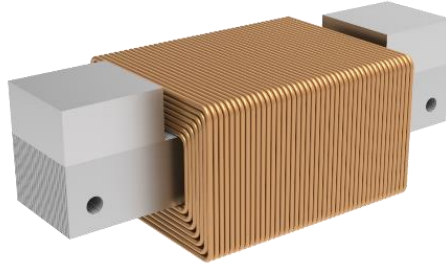


Figura 12. Unidad de levitación HEMS

Esta unidad consta principalmente de tres partes diferenciadas.

- Dos imanes permanentes orientados de forma opuesta generando por lo tanto un flujo magnético constante.
- Una sola bobina por la cual circula la corriente eléctrica induciendo un flujo magnético y permitiendo el control de la unidad.
- Un núcleo magnético de acero eléctrico laminado, el cual reduce las pérdidas en el entrehierro y a través del cual circula el flujo magnético hacia la plancha de acero situada en la infraestructura.

Colocadas frente a los módulos se encuentran las placas de acero instaladas dentro del tubo, y sobre las que se produce el fenómeno de atracción. Como se ve en la Figura 13 las líneas de campo magnético generadas con el electroimán se cierran a través de la placa de acero de la infraestructura. Debido a las características del campo magnético, que tiende a reducir la reluctancia del circuito magnético en todo momento, se genera una fuerza de atracción entre el módulo y la placa de acero dentro del tubo [10].

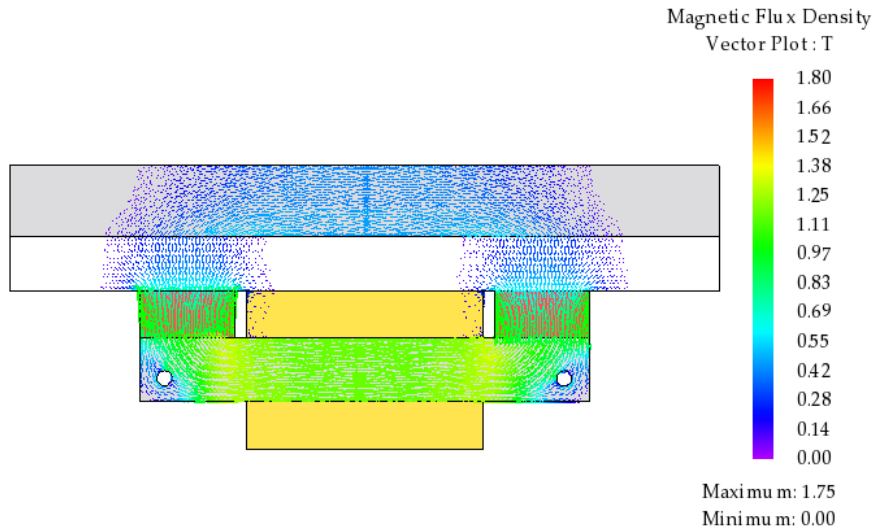


Figura 13. Diagrama flujo magnético unidad de levitación

Dentro del diseño de esta unidad se valoraron dos alternativas que se pueden ver en la Figura 14.

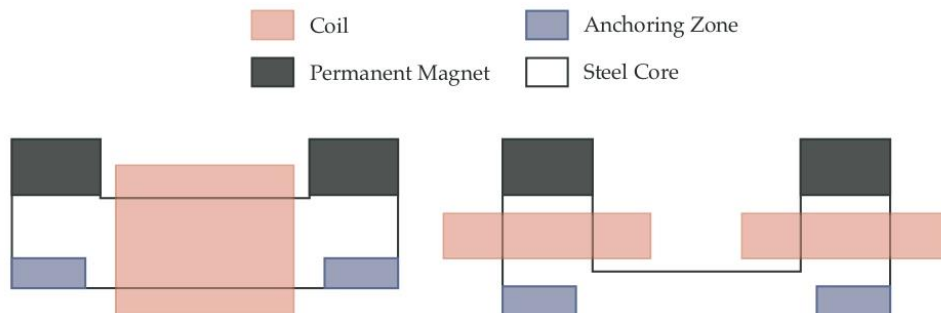


Figura 14. Posibles diseños unidad de levitación

La geometría adoptada es primera opción (forma U), esta decisión se toma ya que requiere únicamente una bobina, facilita el direccionamiento del flujo generado por los imanes permanentes por la plancha de acero y fomenta la circulación del flujo entre los imanes a través del núcleo laminado. Además, el uso de una sola bobina facilita la integración con la electrónica y reduce el peso de la unidad y el acero requerido. También permite que la zona reservada para el anclaje sea mayor y más accesible. Resultando esta alternativa más interesante en términos de optimización de espacio, peso y facilidad de manufactura.

Los imanes permanentes utilizados son comerciales y se seleccionan de forma que sean capaces de realizar la suficiente fuerza como para compensar el peso del vehículo a 17.5 mm tal como se indica en los requerimientos. Las características se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Características imanes permanentes

Parámetro	Valor
Material	NdFeB
Forma	Bloque
Tamaño	40x40x20 mm
Superficie polo	40x40 mm
Sentido magnetización	Eje 20 mm
Magnetización	N42
Recubrimiento	Niquelado (Ni-Cu-Ni)
Fuerza sujeción	588 N
Peso	240 g
Temperatura servicio max.	80 °C

Usando estos imanes (hay dos por unidad) se necesita un total de seis HEMS para mantener el vehículo en levitación (con consumo de corriente bajo) a una distancia de 17.5 mm. Este cálculo se detallará más adelante.

Respecto al diseño del núcleo de acero, este ha sido optimizado teniendo en cuenta el tamaño de la bobina. Esta ha sido diseñada para una corriente de 25 A, aunque la corriente máxima sea de 40 A ya que esta corriente solo debería aplicarse para perturbaciones extremas. Por lo que basándose en resultados de varias simulaciones realizadas la sección de cable seleccionada para la bobina es de 3.3 mm². De nuevo basándose en simulaciones y de acuerdo con información proporcionada por el fabricante el factor de llenado se selecciona de 0.5.

Volviendo al diseño del núcleo el material usado es acero laminado M400-50A. Durante el diseño una optimización paramétrica se lleva a cabo, variando el espesor, y altura para diferentes longitudes, los resultados se muestran en la Figura 15 donde se puede ver como para cualquier longitud la densidad de fuerza es mayor cuanto más baja es la altura y mayor es el espesor [11].

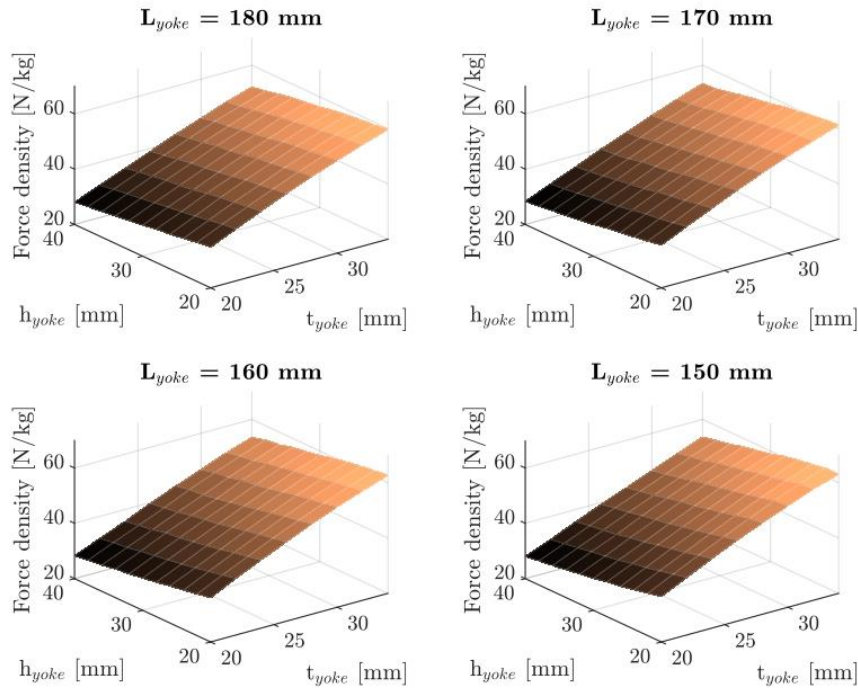


Figura 15. Estudio de densidad de fuerza para distintos parámetros

Sin embargo, esta optimización tiene como consecuencia que el núcleo de acero satura mucho a 40A reduciendo la eficiencia de la unidad y la máxima fuerza que es capaz de ejercer (afectando al rango de control). Por ello se decide aumentar la altura del mismo respecto al modelo más optimizado, dando como resultado un núcleo con las características que se muestran en la Figura 16.

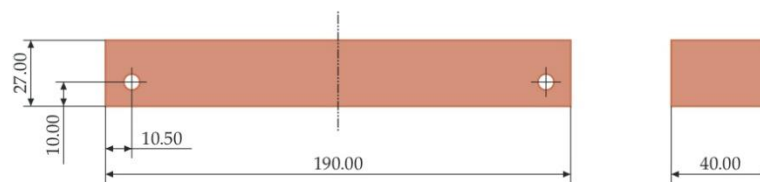


Figura 16. Dimensiones núcleo acero laminado

A modo de resumen las características de la bobina y el núcleo laminado se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características constructivas bobina y núcleo

Parámetro	Valor
Alto núcleo	27 mm
Largo núcleo	190 mm
Ancho núcleo	40 mm
Material núcleo	Acero M400-50A
Sección conductor bobina	3.3 mm ² (Cu)
Numero vueltas bobina	300
Temperatura máxima aislamiento	200 °C
Resistencia bobina	0.319 Ω

Merece la pena comentar que la inductancia para este sistema, factor crítico para el control es un valor que depende de ambos la corriente que circule y la distancia entre la unidad y la plancha de acero.

Además de todo lo mencionado para el dimensionamiento de la plancha de acero en el tubo se planteó el uso de un acero laminado que reducía la fuerza de drag un 75%. Sin embargo, debido al alto coste que esto supone se descarta esta opción y se usa un acero comercial con un espesor de 20 mm.

Todas las simulaciones electromagnéticas llevadas a cabo tanto para estas unidades como para el resto de los elementos que se presentaran en posteriores secciones se realizan mediante el software JMAG. Y se realizaron simulaciones tanto de casos 2D como 3D dependiendo de las necesidades de precisión en las mismas que fuese necesario, usándose principalmente las de 3D.

Tras el diseño de las unidades una de las primeras simulaciones que se realizan es la que relaciona la fuerza producida por las unidades en función de la corriente que circule por la bobina y el air gap entre la unidad y la plancha de acero. Los resultados de esta simulación se pueden ver en la Figura 17.

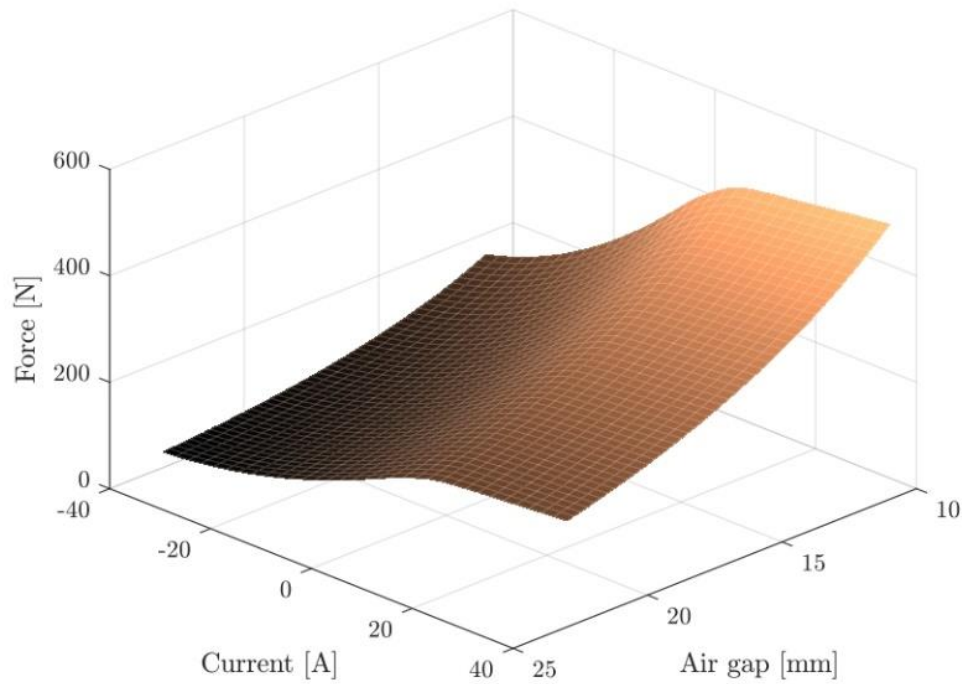


Figura 17. Mapa fuerza unidad de levitación

De esta grafica se pueden obtener algunas conclusiones respecto al comportamiento de la unidad para diferentes air gaps y corrientes. Se puede apreciar como existen dos comportamientos muy diferenciados en función de si la corriente aplicada es positiva o negativa, así como el efecto de la saturación del núcleo para corrientes altas.

En la Figura 18 se muestra un gráfico 2D en el que se representa la fuerza ejercida por las seis unidades en conjunto para diferentes corrientes, así como el peso del vehículo aproximado. Siendo el punto de corte el punto teórico en el que se podría levantar sin consumo de corriente y punto que se busca.

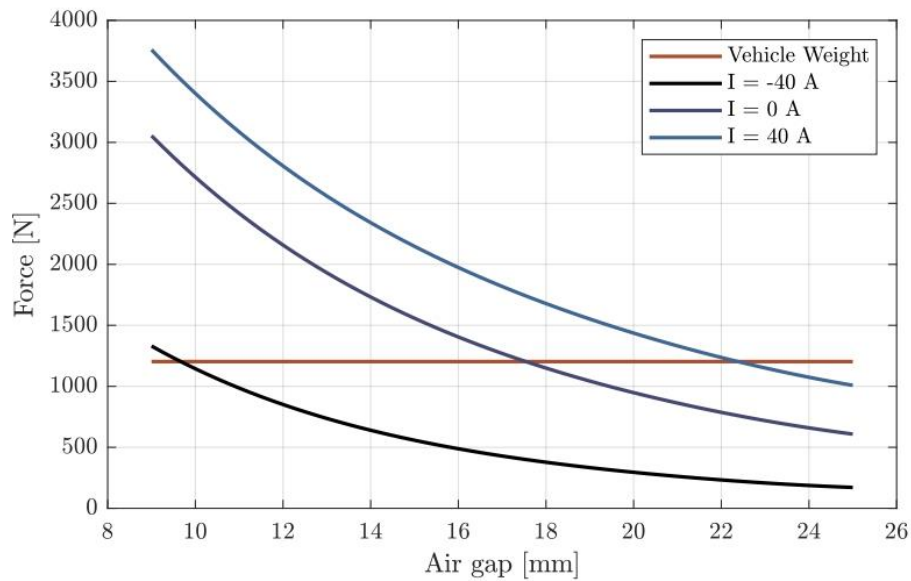


Figura 18. Comparativa fuerza total unidades y peso del vehículo

De esta grafica podemos obtener algunos puntos de operación como son la distancia nominal que ya hemos dicho que serán 17.5 mm, así como las distancias máximas y mínimas que serán 22.5 mm y 9.75 mm respectivamente.

Respecto al rango de control cuya expresión se presentó antes (Ecuación 1) los valores para la distancia nominal son los siguientes.

Tabla 3. Rango de control para el caso de 17.5 mm de air gap

Corriente [A]	Rango de control [%]
- 40	70.89
40	43.72

Como se ha comentado la inductancia para las unidades depende de la corriente y el air gap esto es debido a que ambos parámetros están relacionados con el flujo magnético y la inductancia se obtiene a partir de la Ecuación 2.

$$L = \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

A partir de esta fórmula y con los datos obtenidos de las simulaciones se obtiene un mapa de la inductancia a partir de la corriente y air gap que se muestra en la Figura 19.

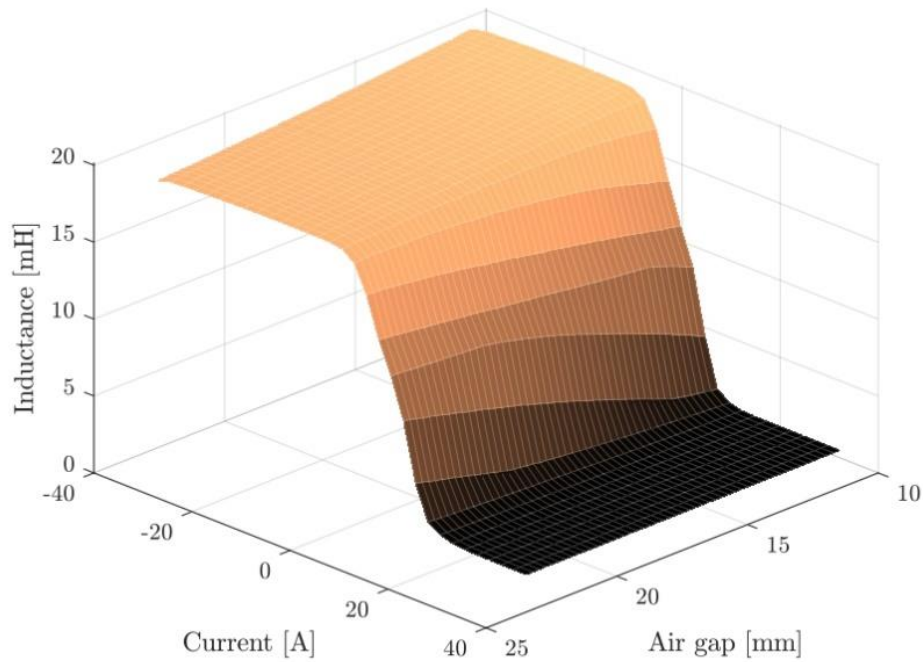


Figura 19. Mapa inductancia unidad de levitación

En esta grafica se puede apreciar un comportamiento no lineal muy marcado en el que de nuevo hay dos zonas. Ambas zonas tienen una baja dependencia del air gap si lo comparamos con la dependencia de la corriente. Estas dos zonas se corresponden con la aplicación de corrientes positivas o negativas y se ve como el valor es hasta 4 veces mayor para corrientes negativas factor que podría ser crítico para el sistema de control.

Adicionalmente se realizan simulaciones para conocer cómo se comporta el sistema cuando se produce el desplazamiento. Esta simulación hace posible determinar las consecuencias de las corrientes inducidas en las planchas de acero del techo. En la Figura 20 se puede ver como se producen ciertas pérdidas en la fuerza de levitación a medida que aumenta la velocidad.

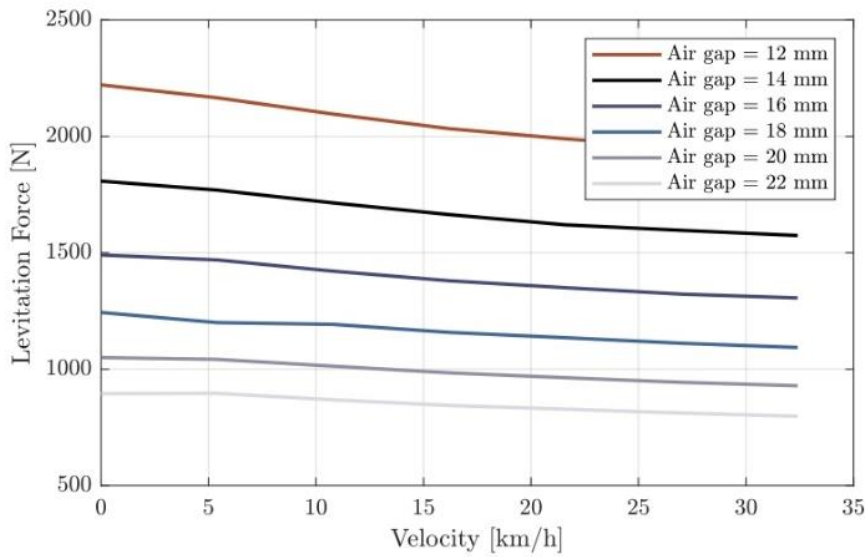


Figura 20. Fuerza de levitación en función de la velocidad

Además de comprobar como varia la fuerza de levitación, existe otro parámetro interesante que depende de la velocidad el cual es la fuerza de drag que aparece en la dirección de movimiento del vehículo. Estas fuerzas se opondrán al movimiento de forma similar a como lo haría una rodadura. En la Figura 21 se puede observar cómo estas fuerzas aumentan al incrementarse la velocidad encontrándose un máximo en torno a los 15 Km/h y después bajan ligeramente hasta estabilizarse a un valor normal.

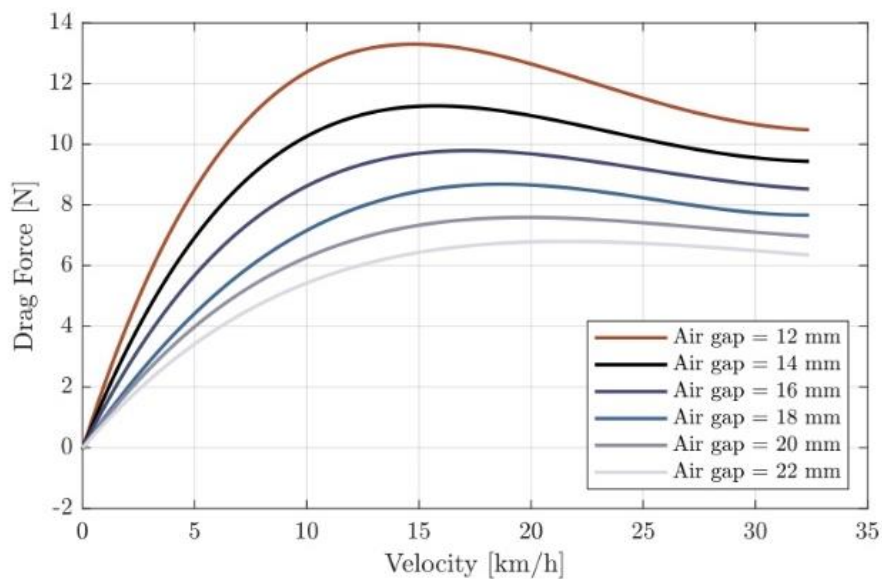


Figura 21. Fuerza de drag

3.2.2. Unidades de guiado

Las unidades de guiado comparten unos requerimientos muy similares a los ya presentados para las unidades de levitación por lo que el procedimiento por el cual se seleccionan las tecnologías es muy similar. Siendo la única diferencia que estas unidades no sufrirán ninguna fuerza en régimen nominal (como es el peso para las unidades de levitación). Al igual que para las unidades de levitación la mayor parte del diseño electromagnético fue llevado a cabo por Javier Luján González y Rafael Monllor Ballesteros.

3.2.2.1. Alternativas

Al igual que para las unidades de levitación para las unidades de guiado primeramente se descartaron todas aquellas alternativas que por razones de coste no eran viables, así como aquellas que no cumplían mínimamente algunos de los requisitos planteados.

Este primer “filtro” de nuevo deja como posibles tecnologías candidatas al Hybrid Electromagnetic Suspension (HEMS) y la Electromagnetic Suspension (EMS) que se basa en un electroimán clásico. Ambos sistemas podrían cumplir con los requisitos y se basan en el mismo fenómeno la atracción entre polos magnéticos cuya fuerza se puede regular a partir de la corriente que circula por la bobina.

Dado el régimen de funcionamiento nominal para estas unidades que se trata de un estado en el que no aparecerá ninguna fuerza de perturbación se opta por descartar el uso de unidades HEMS. Esto es debido a que el uso de estas unidades debido a los imanes permanentes introduciría una fuerza en estado nominal que no es necesaria para mantener el sistema estable, además de que la presencia de estos imanes generaría más fuerza de drag. Todo esto hace que, aunque fuera una opción viable no se escoja como solución para estas unidades, adoptándose finalmente la tecnología presentada a continuación.

3.2.2.2. Sistema final (EMS)

Como ya se ha presentado para estas unidades en régimen nominal no existe fuerza de perturbación por lo que tampoco sería necesario que exista una fuerza por parte de las unidades de guiado, esto unido al objetivo de un bajo consumo de corriente, así como al hecho de que las fuerzas que se necesitarían compensar por estas unidades no son altas se opta por el uso de la tecnología de Electromagnetic Suspension (EMS). Esta tecnología se basa en la creación de una fuerza mecánica a partir del fenómeno de atracción magnética entre el acero y los polos magnéticos. En esta tecnología en particular, los polos magnéticos son creados por un electroimán.

Estas unidades deberán cumplir adicionalmente con los siguientes requisitos.

- La máxima corriente en la bobina serán 40 A.
- La distancia nominal a las planchas laterales es de 10 mm.
- El peso de estas unidades debe ser el mínimo posible.

La unidad final diseñada es la mostrada en la Figura 22.

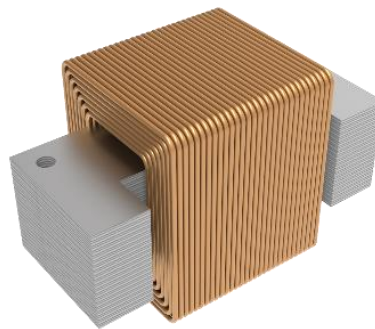


Figura 22. Unidad de guiado (EMS)

El diseño de esta unidad se compone principalmente de dos partes:

- Una bobina por la cual circulara corriente generando un flujo magnético y provocando la aparición de dos polos magnéticos.
- Un núcleo de acero laminado por el cual el flujo circula y es dirigido hacia las planchas lateras situadas en el tubo.

El diseño de la unidad se ha hecho basándose en las mismas condiciones que se asumieron para las unidades de levitación. Dando lugar a una unidad con forma de U con una sola bobina de nuevo buscando una optimización de peso y espacio. El material usado para el núcleo es acero laminado M400-50A.

Para el proceso de optimización primero se realizó un estudio sobre el espesor del núcleo llevando a cabo un barrido paramétrico manteniendo constantes otros valores y obteniéndose resultados de fuerza y densidad de fuerza que se muestran en la Figura 23 en la cual se puede observar como para el máximo de fuerza y densidad de fuerza se encuentra alrededor de un espesor de 34 mm valor que se adopta.

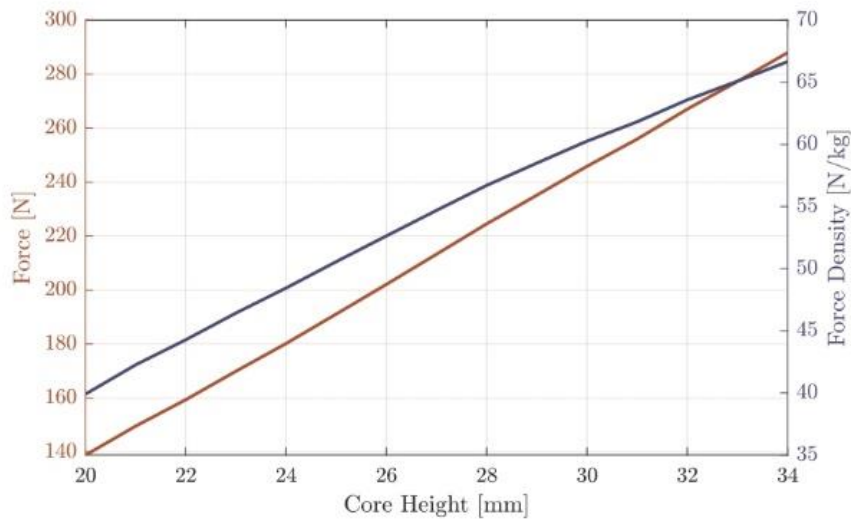


Figura 23. Optimización espesor núcleo

Una vez fijado el espesor se realiza un proceso similar para el ancho de la parte que forma la U (“diente”). El resultado se muestra en la Figura 24 para la cual se toma el valor de 22 mm.

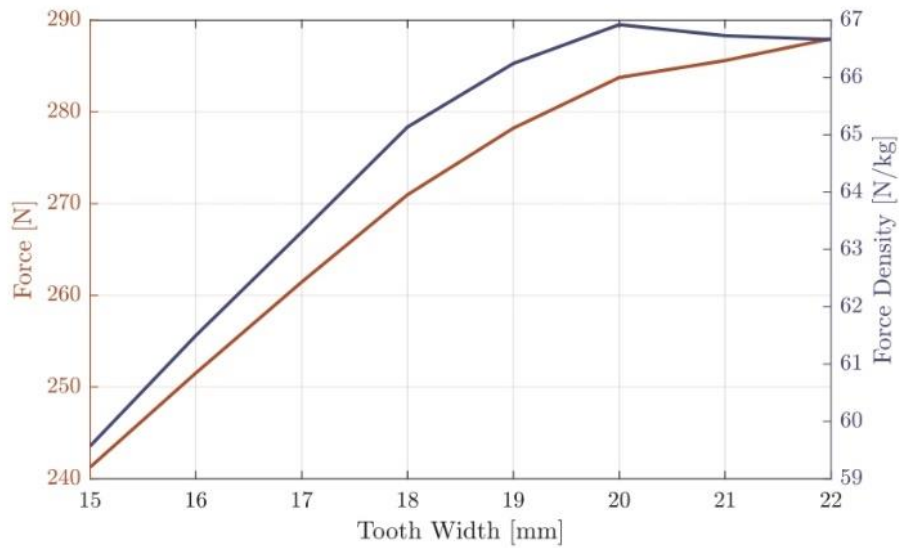


Figura 24. Optimización diente

Finalmente, otro estudio se realiza para determinar las dimensiones de la bobina tanto en volumen como en número de vueltas. De este estudio se desprende que cuanto más apilada esté la bobina y más corta sea, más eficiente será el conjunto más eficiente, ya que el campo magnético generado estará más concentrado. La Figura 25 muestra los resultados de este estudio comparativo, donde, al reducirse el número de espiras, la bobina es más corta y, por tanto, la masa de acero necesaria es menor. El número de vueltas seleccionado para el diseño de la unidad es de 200 vueltas, ya que tiene una densidad de fuerza muy alta.

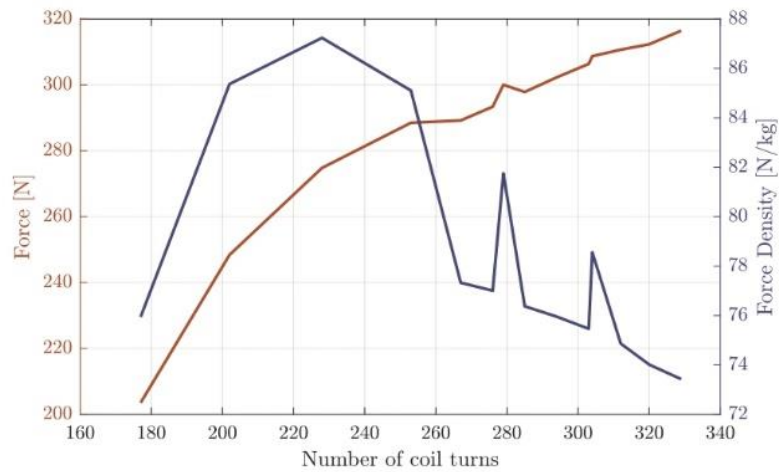


Figura 25. Optimización bobina

Al igual que para las unidades de levitación la sección de conductor escogida es de 3.3 mm². Las dimensiones finales de la unidad diseñada se pueden ver en la Figura 26.

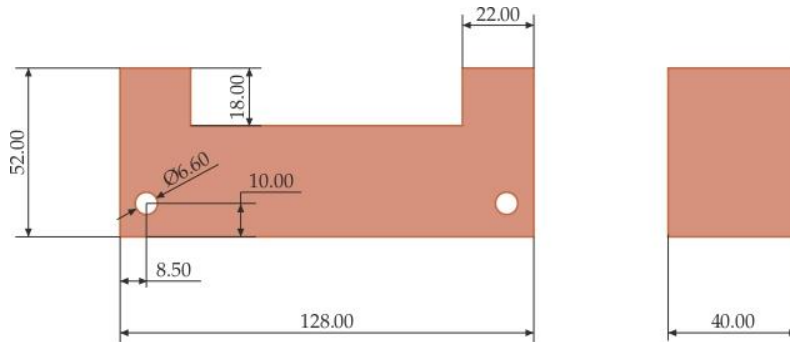


Figura 26. Dimensiones finales unidad de guiado

Y un resumen de las características constructivas se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Características constructivas EMS

Parámetro	Valor
Espesor núcleo	34 mm
Ancho "U" núcleo	22 mm
Material núcleo	Acero M400-50A
Sección conductor bobina	3.3 mm ² (Cu)
Numero vueltas bobina	200
Temperatura máxima aislamiento	200 °C
Resistencia bobina	0.243 Ω

El espesor de las planchas laterales se selecciona igual que para la plancha superior siendo este valor 20 mm.

De la misma forma que se hizo para las unidades de levitación una vez definida la geometría y características finales de la unidad se realiza un mapeo a fin de obtener la fuerza para las distintas corrientes y air gaps esta información se muestra en la Figura 27.

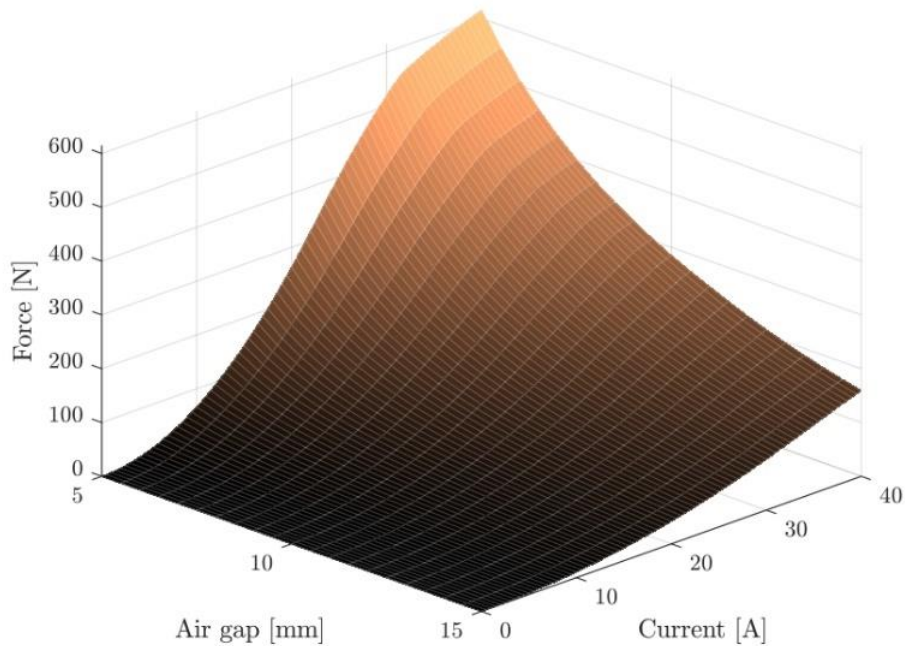


Figura 27. Mapa fuerza unidad de guiado

En la gráfica se puede ver como solo se representan corrientes positivas, esto es debido a que al tratarse de un electroimán que inducirá un polo magnético en un elemento metálico la fuerza que se genere será la misma independientemente de la dirección de la corriente. También se puede apreciar como para esta unidad no existe saturación del acero en ningún punto del rango de funcionamiento, aunque sí que comienza a aparecer este fenómeno a 40 A y 5 mm.

Además, la Figura 28 muestra la inductancia de la bobina de la unidad en función del número de espiras y de la medida del entrehierro. La inductancia de la bobina aumenta a medida que disminuye la medida del entrehierro, permaneciendo prácticamente invariable con la corriente cuando la unidad de acero opera en la zona lineal, conocida como zona de no saturación.

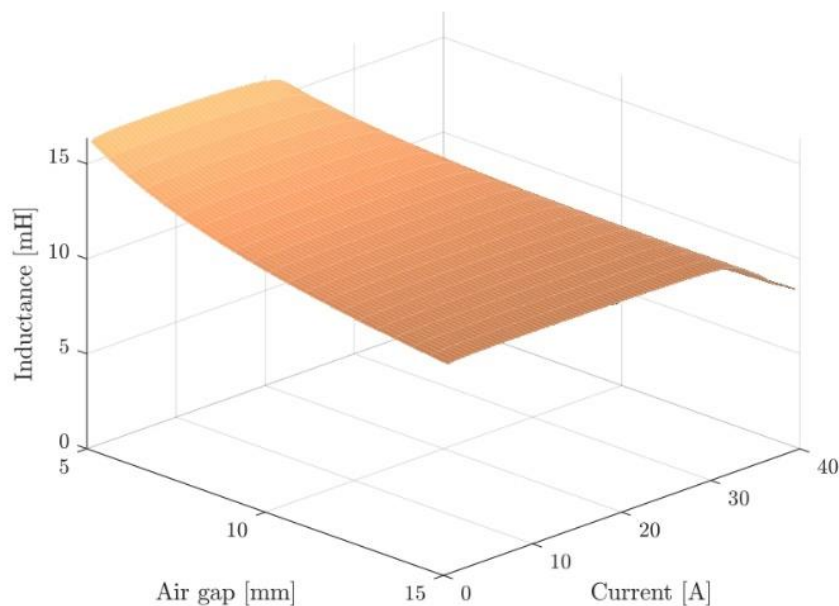


Figura 28. Mapa inductancias unidad de guiado

Sin embargo, en la zona de máxima corriente y mínimo entrehierro se aprecia una notable variación de la inductancia, que difiere de la homogeneidad de los restantes valores. Dado que estos valores se obtienen a partir de la derivada del flujo magnético en el acero con respecto a la corriente, estos valores atípicos en la inductancia de la bobina pueden justificarse a partir de los valores del flujo magnético ya que para 40 A a 5 mm aparece una cierta saturación.

3.2.3. Sistema de propulsión

El sistema de propulsión que se situará en la parte inferior del vehículo será el responsable de producir el empuje necesario para producir la aceleración y en la medida de lo posible el frenado. Sin embargo, dado que el salto tecnológico más grande este año es la levitación una gran fuerza del motor no será el objetivo ya que podría desestabilizar la levitación. Además, al igual que pasaba para las unidades de levitación y guiado se busca que este sistema funcione sin contacto por lo que se optara por el uso de sistemas basados en electromagnetismo [12]. Para este sistema el diseño electromagnético fue llevado a cabo por Javier Luján González y Rafael Monllor Ballesteros, mientras que el control del mismo es realizado principalmente por Raquel Murcia Juan ingeniera electrónica.

3.2.3.1. Alternativas

Dentro de los sistemas de propulsión que se plantean de nuevo se buscara aquel que más convenga al objetivo general de Auran, es decir que no afecte de manera muy notable a la estabilidad del vehículo, así como que sea escalable.

Para este sistema una de las opciones planteadas es el uso de un motor síncrono lineal, este motor cuenta con muchas ventajas como son una alta fuerza a velocidades bajas, alta eficiencia, capacidad de realizar un frenado regenerativo, etc. Sin embargo, este tipo de motor se basa en el uso de imanes permanentes y electroimanes bien en el primario o el secundario, esto para el tipo de aplicación planteada implicará necesariamente introducir una de las dos opciones en la infraestructura lo que significaría un alto coste que no cumplirá con los objetivos de escalabilidad por lo que se descarta esta opción.

Otra opción sería el uso de un motor lineal de reluctancia conmutada este motor al igual que para el motor síncrono ofrece una alta fuerza incluso a velocidades bajas además de una buena eficiencia, también presenta la ventaja de que se puede implementar mediante el uso de electroimanes y elementos ferromagnéticos que en caso de situarse en la estructura no repercutirían en un alto coste. Como desventajas nos encontramos que un motor de este tipo requiere de un sistema de control y electrónica más complejas ya que la conmutación debe hacerse en el momento preciso o no solo no se acelerara, sino que el vehículo se detendría. Otra desventaja y una de las principales razones por la que esta opción también se descarta es que se trata de un sistema “inestable” ante cualquier desalineamiento que genere más gap entre el primario y secundario una fuerza lateral aparecerá que tendera a aumentar este desalineamiento generando a su vez mas descompensación de fuerza lateral, puesto que nunca se ha trabajado con este tipo de motores y se buscaba un sistema lo más estable posible esta opción se descartó, adoptándose finalmente la presentada a continuación.

3.2.3.2. Sistema final (DLIM)

El sistema final adoptado es un Doble motor lineal de inducción (DLIM) este sistema se ha escogido por cumplir los requerimientos planteados, ser un sistema electromagnético, ser capaz de acelerar y frenar, no afectar demasiado a la estabilidad del conjunto además de que ya se tenían conocimientos en este tipo de tecnología facilitando su comprensión, implementación y optimización.

Este sistema consta de dos motores lineal de inducción colocados simétricamente a los lados de un rail de aluminio emplazado en la infraestructura, dando lugar al doble motor de inducción lineal (DLIM) tal y como se puede ver en la Figura 29.



Figura 29. DLIM Hyperloop UPV

La configuración de doble cara permite que el flujo magnético se concentre en una trayectoria cerrada que atraviesa ambos motores y reduce las pérdidas parásitas, aumentando así la eficiencia de cada motor por separado.

Los requerimientos especificados para el sistema de tracción son las siguientes:

- Limitación de la tensión máxima de pico en las fases del inversor de 50 V, parámetro que se ajusta en función de la tensión de la batería.
- Ser capaz de acelerar y frenar de forma electromagnética, así como permitir el movimiento en ambos sentidos dentro del tubo.
- Alcanzar una velocidad máxima de al menos 20 Km/h dentro del tubo de 20 m de longitud.
- Reducción del peso para facilitar la levitación del vehículo.

- Creación de bajas fuerzas transversales con el objetivo de contribuir a la estabilidad a nivel mecánico y, sobre todo, minimizar su variación en la conmutación de las fases del sistema trifásico.

En cuanto a las dimensiones de los motores, es primordial señalar que el diseño se ha establecido con el objetivo de desarrollar un motor ligero que cree fuerzas uniformes y proporcione estabilidad al vehículo cumpliendo con el resto de los requerimientos. El material elegido para el estator es acero laminado M400-50A con un factor de laminado del 98%. Reduciendo de esta forma las pérdidas por efecto Joule generadas por las Eddy currents.

En cuanto a la anchura de la ranura y la altura del diente, estos parámetros están íntimamente relacionados con el número de vueltas que se pueden enrollar alrededor de cada diente, ya que su aumento supone una mayor superficie total de la ranura. En consecuencia, los conductores pueden ocupar una mayor superficie de cada ranura para un determinado factor de llenado. Las dimensiones finales del estator se muestran en la Tabla 5. Estas dimensiones garantizan además que no exista prácticamente saturación del acero durante la operación normal del motor. El plano constructivo del motor puede consultarse en el ANEXO 1.

Tabla 5. Dimensiones estator motor

Parámetro	Valor
Ancho estator	32 mm
Longitud estator	592 mm
Ancho diente	8 mm
Ancho ranura	24 mm
Altura diente	32 mm

Las bobinas forman un devanado concentrado. Se ha decidido que el tipo de bobinado sea concentrado, ya que consigue una mayor simetría y uniformidad en la distribución de la fuerza magnética en comparación con el bobinado distribuido. Este hecho se traduce en fuerzas transversales con mucho menos rizado y, en definitiva, en un conjunto más estable. Esto puede explicarse observando que, en el devanado concentrado, todas las bobinas de un estator permanecen a la misma distancia de las bobinas del otro estator, lo que no ocurre en un tipo distribuido. Otra ventaja del tipo de bobinado elegido es que es más fácil de fabricar y montar.

La selección del número de polos, longitud de estos, frecuencia, etc. Se realiza buscando optimizar el tamaño y peso del motor, así como la velocidad de sincronismo para alcanzar los objetivos requeridos (el estudio específico del motor está fuera del marco de este trabajo). Basándose en los resultados se define una corriente necesaria para la aceleración de 70 A y de 100 A para la frenada. De nuevo la sección de conductor elegida es de 3.3 mm² y con un total de 46 vueltas por bobina.

Teniendo en cuenta las limitaciones de tamaño del motor, buscando obtener la aceleración necesaria y teniendo en cuenta la limitación de voltaje impuesta. Se definen dos sets de tres bobinas por fase conectadas en paralelo, de forma que la aceleración se pueda alcanzar sin aumentar la corriente demasiado. En la Figura 30 se puede ver como se ha realizado la conexión de estas bobinas que se realiza en estrella facilitando el balance entre las fases, reduciendo errores de conexión y aumentando la precisión del control del motor que se hará basándose en la corriente de las fases del inverter.

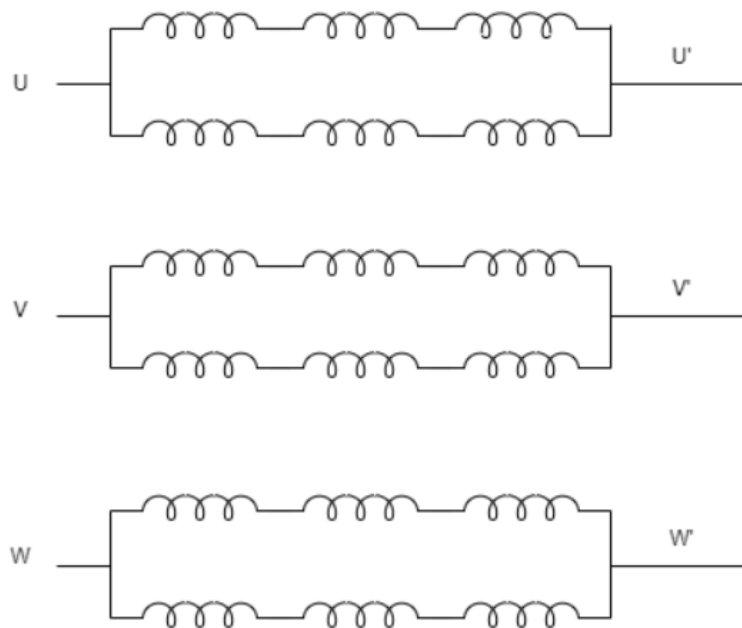


Figura 30. Bobinado fases motor

Además, dado que los sentidos de giro de las bobinas determinan los polos magnéticos creados y, en consecuencia, el funcionamiento del motor, la figura 31 muestra los sentidos de giro de cada una de las bobinas y las fases a las que se refieren e indica también los seis polos magnéticos (tres pares de polos). El plano del bobinado del motor se puede consultar en el ANEXO 2.

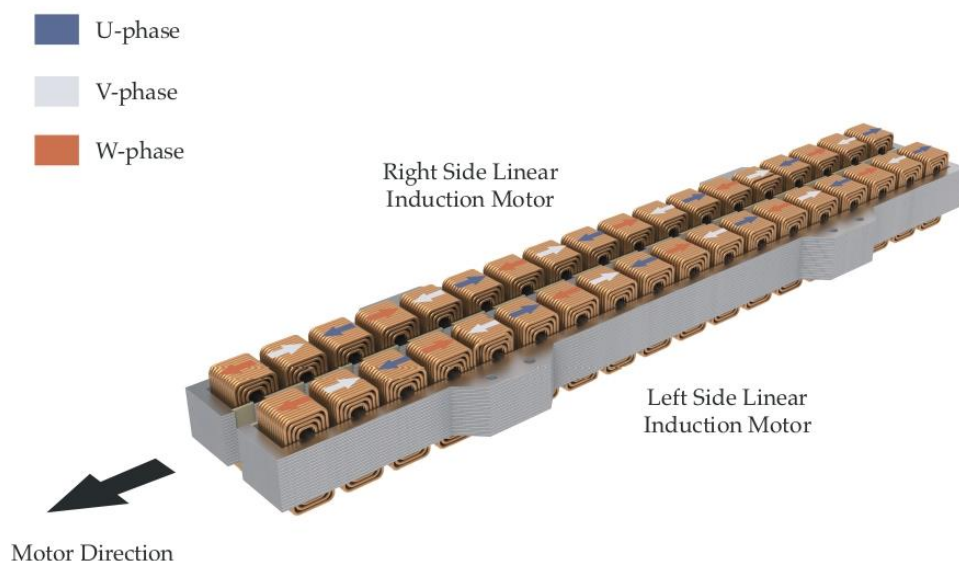


Figura 31. Fases motor

Las características finales del bobinado se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características bobinado motor

Parámetro	Valor
Numero de fases	3
Numero de polos	6
Longitud polo	98.7 mm
Bobinas en paralelo por fase	2
Sección del conductor	3.3 mm ²
Tipo de conexión	Estrella (Y)

A lo largo del diseño del Sistema de Tracción, uno de los objetivos ha sido maximizar el empuje en el arranque ya que uno elevado supone no sólo una alta aceleración inicial sino también un mejor rendimiento del frenado a contracorriente. El empuje al principio aumenta para air gaps más pequeños, debido a la reducción de la reluctancia del circuito magnético. Sin embargo, según los estudios de dinámica del vehículo, no es posible reducir el entrehierro a menos de 5 mm. Por esta razón, el entrehierro diseñado del motor es de 5 mm.

De igual forma se realiza un estudio para tratar de optimizar el espesor del rail y la frecuencia dando como lugar a la decisión de fijar el espesor del rail a 6 mm y la frecuencia de operación del motor a 40 Hz. Finalmente, en la Tabla 7 se muestran los principales parámetros eléctricos del motor.

Tabla 5. Parámetros eléctricos motor

Parámetro eléctrico	Valor pico	
	Fase aceleración	Fase frenada
Corriente fase	70 A	100 A
Voltaje fase	16 V	21 V
Potencia	4.25 kW	8.04 kW

Al igual que para el resto de los sistemas electromagnéticos las simulaciones se llevarán a cabo con JMAG, presentándose a continuación algunas de las principales simulaciones realizadas.

Primeramente, se muestra en la Figura 32 la saturación del estator para el caso más desfavorable que son 100 A. Se puede ver como algunas zonas superan los 1.8 T que es a partir de donde se produce la saturación.

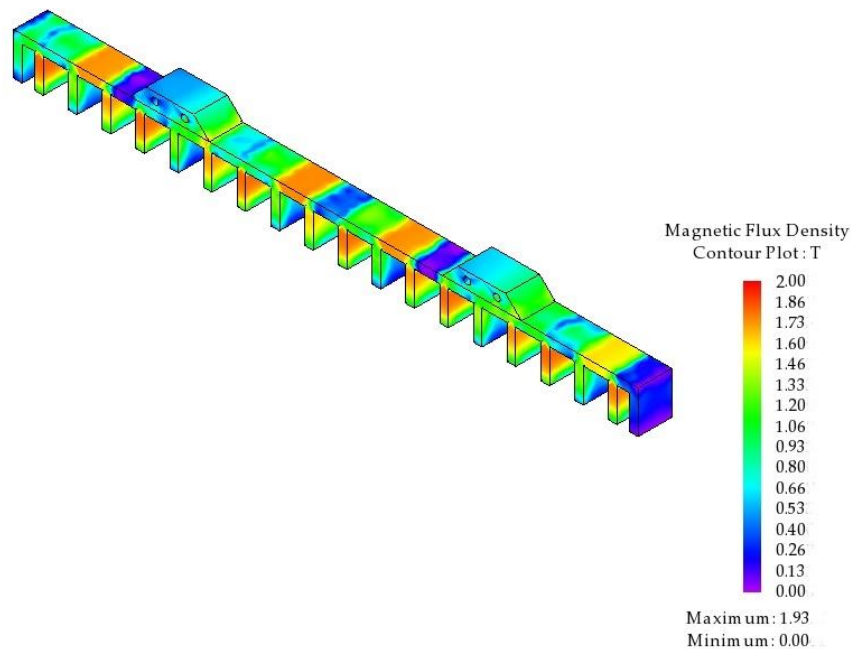


Figura 32. Densidad flujo magnético en el frenado

Una vez comprobado que no existirán problemas con la saturación y fijados los parámetros de funcionamiento las principales graficas que nos interesan serán las de empuje una función de la velocidad ya que como hemos dicho buscamos el mayor empuje a slip bajos ya que esto afectara positivamente a la frenada. En la Figura 33 se puede ver la fuerza de empuje en función de la velocidad para una frecuencia de 40 Hz y 70 A.

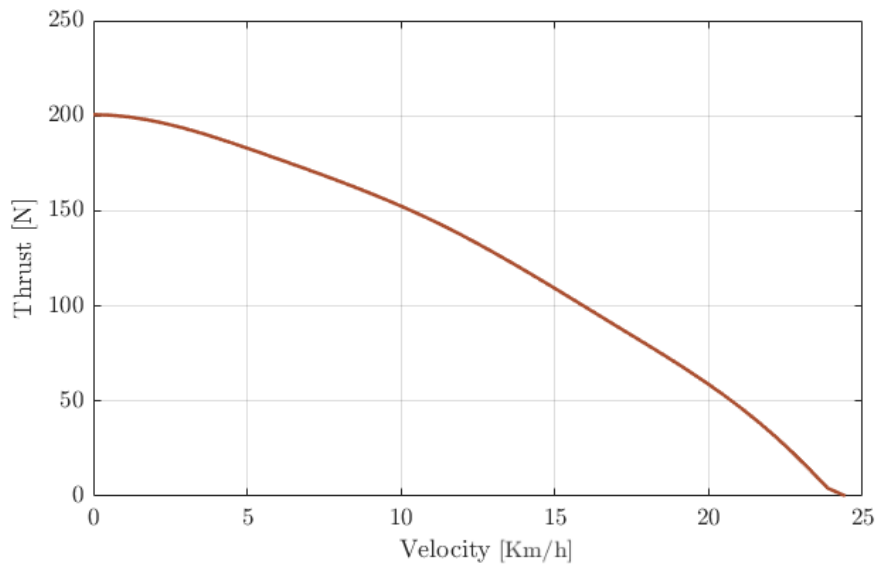


Figura 33. Fuerza aceleración

La misma simulación se realiza para las fuerzas durante la fase de frenado la cual se produce a 40 Hz y 100 A. La corriente y por lo tanto la fuerza durante esta fase es mayor dado que esta fase ha de ser más corta y ser capaz de detener el vehículo en poca distancia para no sobrepasar los 20 metros disponibles. Las fuerzas se pueden ver en función de la velocidad en la Figura 34.

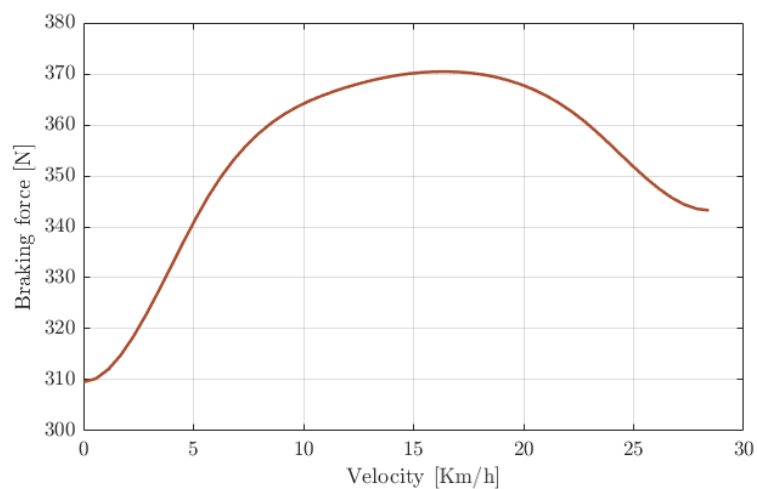


Figura 34. Fuerza frenada

3.2.4. Sistema eléctrico – electrónico

Este sistema sirve como base para el buen funcionamiento de los anteriormente presentados, sus requisitos son varios dependiendo de cuál sea la función específica en cada placa, pero en general irán asociados con los del sistema al que correspondan. Siendo el único requerimiento común para todas y de obligatorio cumplimiento tanto para las placas de control como para las de potencia que han de trabajar a 50 V ya que esta será la tensión de alimentación de todos los sistemas eléctricos, electrónicos y electromagnéticos de Auran. Todo el diseño de las placas, así como su soldadura es realizado por distintos miembros de Hyperloop UPV, al igual que la mayor parte del código de las mismas. Siendo el principal responsable del código de las placas asociadas a la levitación Daniel González Castiñeiras.

3.2.4.1. Alternativas

Dentro de este apartado no tiene demasiado sentido hablar de alternativas ya que todas las placas son diseñadas dentro del equipo adaptándose a las necesidades por lo que entrar a este proceso sería analizar las alternativas para cada componente con el que cuenta cada placa. Esto se entiende que esta fuera del marco que se pretende abarcar por lo que no se tratará y se pasará directamente a presentar el sistema final.

3.2.4.2. Sistema final (LCU & LPU's)

Como se ha mencionado todas las placas del vehículo han sido diseñadas por miembros del equipo esto incluye muchos sistemas como pueden ser BMS, NavBrakes, etc. Puesto que el ámbito de este trabajo se centra en la levitación solo se mencionarán las placas que se relacionan con este propósito.

El sistema electrónico de las unidades de levitación y guiado se compone de dos módulos diferentes, la Unidad Controladora de Levitación (LCU) y las Unidades de Potencia de Levitación (LPU). Hay una única LCU montada en el vehículo, y su función es gestionar cada módulo de potencia.

La comunicación entre las placas se realiza empleando el protocolo CAN (Controller Area Network). Las LPU suministran la cantidad adecuada de energía a las bobinas HEMS y EMS para obtener la salida deseada. Cada placa controla una sola bobina. Por lo tanto, hay diez módulos LPU en el vehículo, seis de ellos asociados al HEMS y el otros cuatro para los EMS.

La función de la unidad de control de levitación (LCU) es realizar las ecuaciones de control. Como se ha explicado, este módulo toma como entrada diez mediciones de air gap y emplea la ecuación de control para calcular los objetivos de corriente para las diferentes LPU. A continuación, este objetivo de corriente se envía a través del bus CAN a cada LPU. Dentro de esta placa existen dos buses CAN distintos uno dedicado exclusivamente a la comunicación entre la LCU y las LPU's y otro mediante el cual la LCU se comunica con el resto de las placas del vehículo las cuales están integradas en este bus. Esta distinción se hace debido a la necesidad de transmitir datos a varios módulos y a alta frecuencia que tiene el sistema de levitación. Una imagen de esta placa se puede ver en la Figura 35.

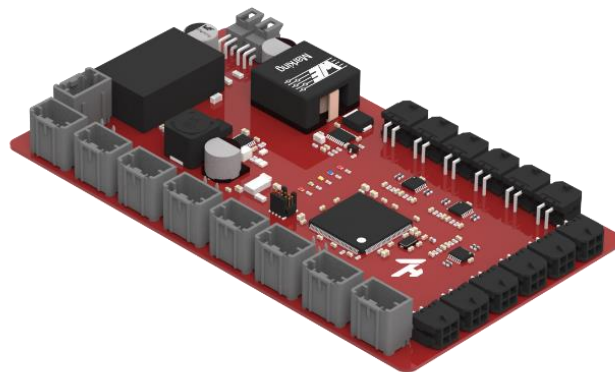


Figura 35. LCU

Por su parte las LPU's son las unidades de potencia y su función es actuar como controlador de las bobinas, para ello emplean una configuración de puente en H permitiendo que la corriente fluya en ambas direcciones a través de la bobina dependiendo de la acción de control deseada aumentando o disminuyendo así el flujo por la unidad. Estas unidades pueden verse en la Figura 36.

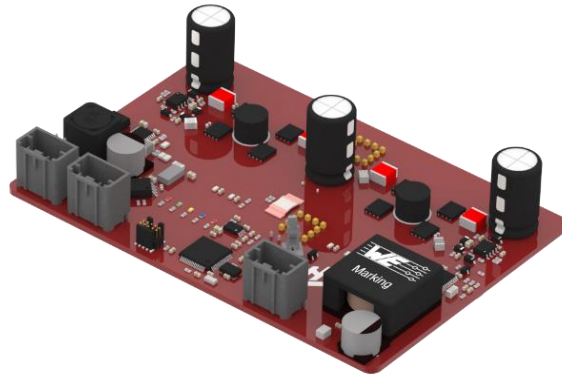


Figura 36. LPU

Adicionalmente en la Figura 37 se muestra el esquema de comunicación que existe para todas las placas que componen Auran incluyendo los dos buses CAN, la master que se ocupa de procesar esta información y mostrarla por pantalla además de la comunicación inalámbrica realizada mediante el NAP, a través del cual se recibe y muestra información en tiempo real en una interfaz de usuario también diseñada ad hoc por el equipo.

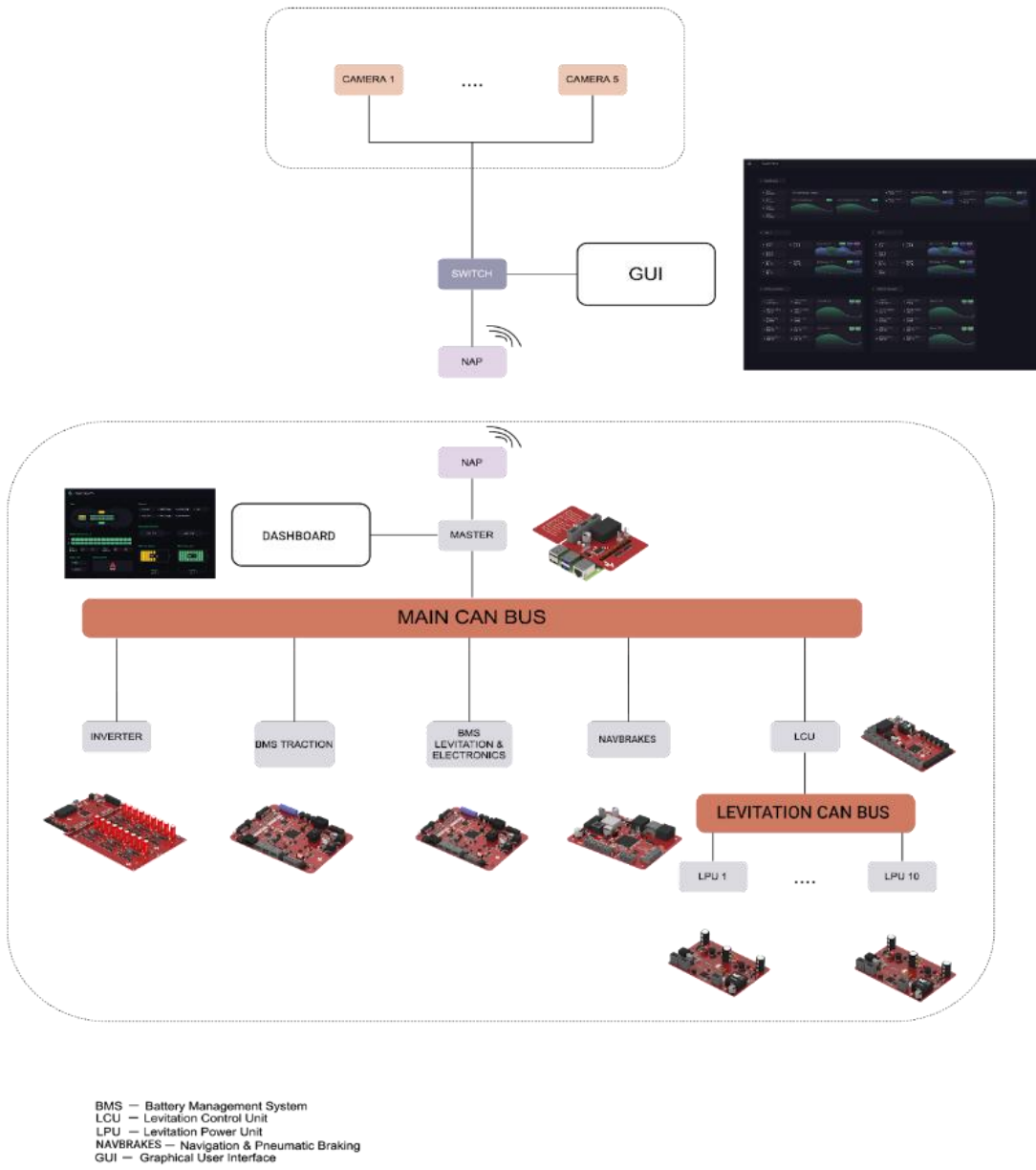


Figura 37. Diagrama comunicaciones Auran

4. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

A lo largo de esta sección se abarcará todo el proceso que se ha realizado a lo largo del año englobado en el proyecto Auran de Hyperloop UPV haciendo hincapié en la parte que se contempla dentro de este trabajo esto es el sistema de control. Por lo tanto, se tratarán todas las fases que se han llevado a cabo incluyendo el diseño, simulaciones, identificación e implementación.

4.1. Sistema adoptado

En esta sección al igual que se hizo para los principales sistemas que componen Auran se tratara de que planteamiento se siguió a la hora de elegir la estructura de control que se usaría.

Como se comentó antes los principales objetivos del sistema de control son los de lograr una levitación y guiado estables con un bajo consumo de corriente mientras el sistema tiene la suficiente robustez como para soportar perturbaciones siendo la principal la introducida por la aceleración y freno del motor. Cabe destacar que dentro del equipo es la primera vez que se explora la tecnología de levitación y guiado por lo que no existe un conocimiento previo factor que se tiene en cuenta a la hora de elegir la arquitectura del control.

4.1.1. Alternativas

Dentro de las posibles arquitecturas de control existen varias opciones que se plantearon como posibilidades antes de llegar a la que compondría el sistema final.

La primera de ellas se corresponde con el tipo de controlado más básico, un PID, este tipo de controlador podría en teoría ser capaz de gobernar el funcionamiento para la bancada de levitación sin problemas, sin embargo a la hora de realizar el control puesto que estos controladores funcionan mejor para sistemas SISO y el nuestro se trataría de un sistema MIMO requeriría la incorporación de algoritmos adicionales para conseguir un control en conjunto de todo el sistema lo que complicaría la estructura y no sería

posible realizar un control estable si cada unidad se preocupase únicamente de su air gap.

Otro elemento a tener en cuenta con este tipo de controles es que por su diseño están especialmente pensados para trabajar con referencias y su comportamiento ante perturbaciones es peor, esto se plantea como un inconveniente ya que el funcionamiento nominal del vehículo es el de trabajar con una referencia fija (en el punto en el que la fuerza de los imanes permanentes compensan el peso del vehículo) y ser robusto ante perturbaciones presentándose virtualmente cero cambios de referencia durante el funcionamiento [13]. Todas estas razones hacen que se descarte el uso de este tipo de arquitectura al menos para el bucle de control principal.

Otra alternativa que se plantea es el uso de arquitecturas de control más avanzadas que permitan un comportamiento no lineal ya que en teoría se ajustaran mejor al comportamiento altamente no lineal que presenta el sistema. Dentro de estos tipos de controles se puede considerar el uso de controladores de lógica difusa las ventajas de este tipo de controles es su alta adaptabilidad si se realizan de forma correcta, además de que permitirían realizar un control del vehículo como conjunto lo cual es un factor vital para el funcionamiento correcto del mismo, además de dar una mejor respuesta en todo en rango al no ser necesario linealizar el sistema. También ofrecerían un buen comportamiento ante referencias y perturbaciones una vez realizados de forma correcta, el uso de este tipo de controladores para sistemas similares ya se ha estudiado como se puede ver en [14]. Sin embargo y a pesar de las múltiples ventajas de esta arquitectura se opta por no implementarlas al no haber conocimiento previo de en su uso lo cual unido a la falta de conocimiento de la tecnología podría frenar el desarrollo siendo esto un factor crítico dado que el proyecto se diseña, fabrica y se hace funcionar en menos de un año.

4.1.2. Sistema final

Finalmente, el sistema adoptado basándose en las alternativas disponibles [15] y buscando el mejor comportamiento posible fue un control basado en el espacio de estados. Este tipo de control está basado en modelos y es un control lineal por lo que requiere una correcta identificación del sistema para asegurar el correcto funcionamiento del mismo y ofrece una serie de ventajas que hace que se seleccionen las principales son las siguientes:

- Capacidad de realizar un control global sobre las variables de posición y orientación del vehículo al ser un control muy útil y adaptado a sistemas MIMO.
- Fácil implementación en sistemas electrónicos.
- Muy buena respuesta ante perturbaciones y posibilidad de obtener buena respuesta ante referencia al incluir acción integral.
- Conocimientos previos con este tipo de controladores.
- Se obtienen sistemas robustos una vez se ha realizado el ajuste.

Estas son las principales ventajas por las que se elige esta arquitectura de control [16] [17] [18], sin embargo, una vez definida se procede a realizar un estudio más en profundidad de los sistemas a controlar descritos en la Sección 3.2 tras este estudio y a partir de las simulaciones obtenidas se determina que existen dos dinámicas principales muy diferenciadas dentro del control global del vehículo. La primera es el comportamiento dinámico del vehículo es decir cómo se modifica su posición y orientación con las fuerzas aplicada, como se ha de medir esto a partir de medidas de air gap, etc. La segunda es la dinámica de las unidades de levitación las cuales pueden tratarse como sistemas RL con inductancia variable para obtener la corriente que circula y a partir de ella la fuerza aplicada. La estructura final adoptada se presenta en la Figura 38 aunque se explicara en secciones posteriores.

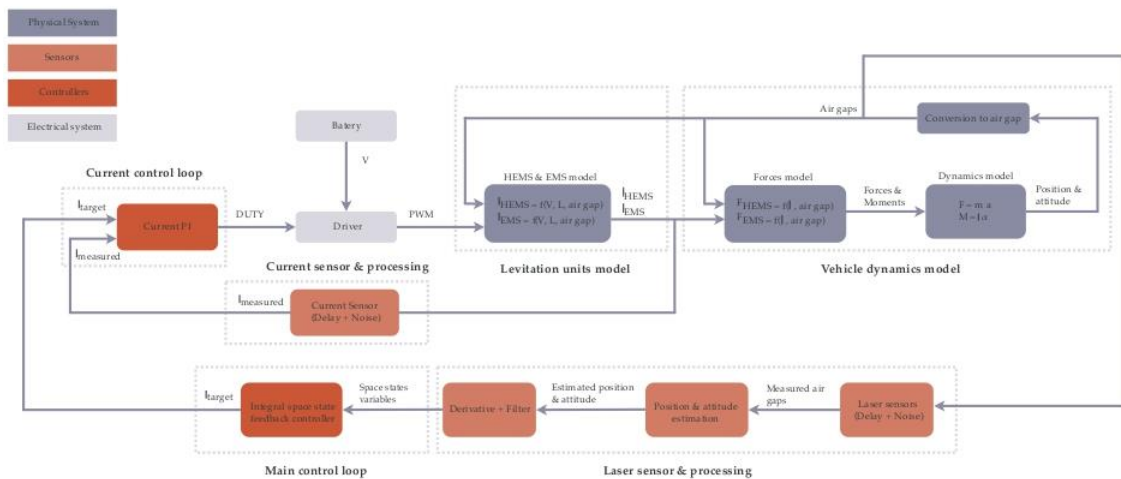


Figura 38. Esquema de control

La estructura se dividió en dos “bloques” que obedecen a las dinámicas antes mencionadas y que ahora se explicaran al detalle.

4.1.2.1. Bucle de posición

Dentro de este bucle se englobará todo lo que corresponde al control global del vehículo, esto incluye desde la adquisición de los datos de los diez sensores de air gap, su procesado y transformación a posición y orientación, así como el control por espacio de estados basado en estas variables y que tendrá como output la corriente necesaria en cada bobina para el control del vehículo.

Es importante mencionar que Auran no cuenta con un sistema específico para el cálculo de la posición y orientación como puede ser una IMU, sino que cuenta con diez sensores laser de alta precisión situados cercanos a las diez unidades del sistema de levitación y guiado como se puede ver en la Figura 39. Donde además se muestra la numeración asignada a cada unidad y por lo tanto a sus sensores de air gap.

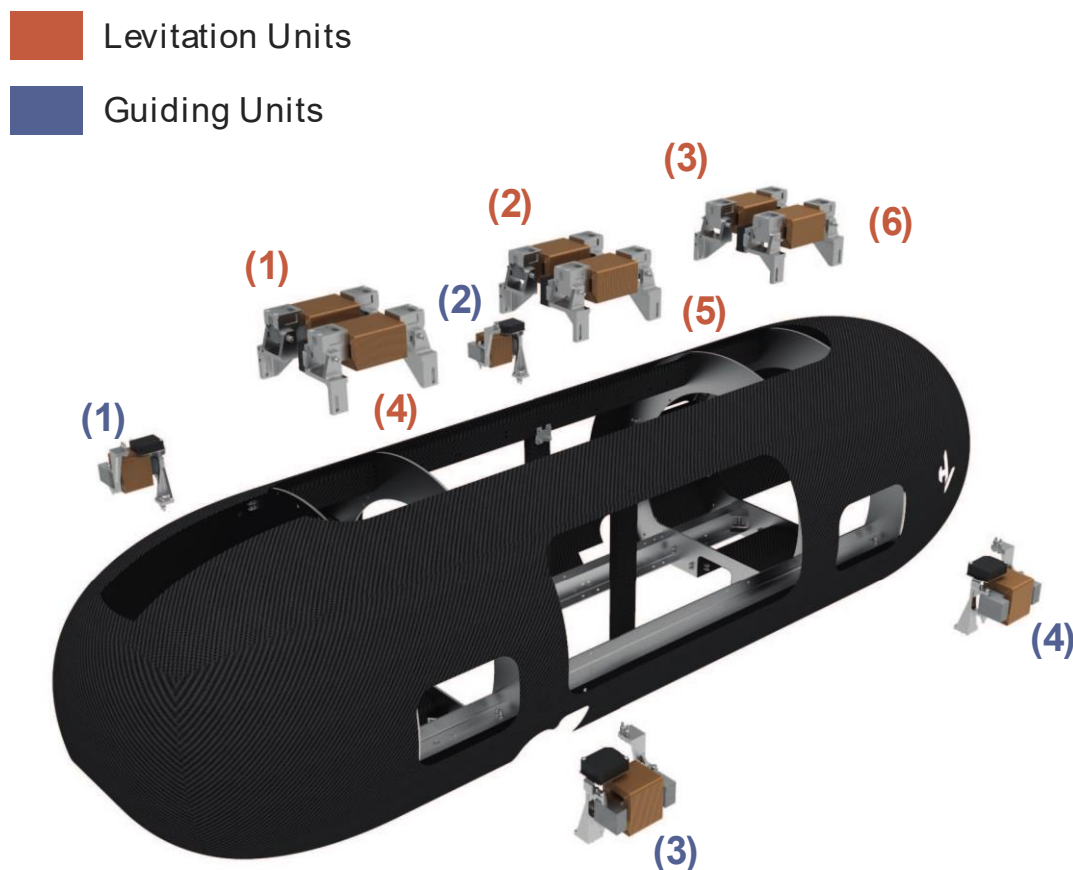


Figura 39. Posicionamiento unidades y sensores

Estas medidas por si solas únicamente pudieran darnos la posición del vehículo y dejarían como alternativa para el control que cada unidad se preocupase únicamente de su air gap, esto probablemente resultaría en que el sistema no sería controlable por lo que es necesario a partir de estas diez medidas y conociendo las características geométricas del sistema se puede estimar el alabeo, cabeceo y guiñada del vehículo dado que los ángulos máximos que permite el tubo son pequeños.

También dado que el control se hará por espacio de estados se debe obtener no solo la posición y orientación del vehículo sino su derivada e integral, siendo especialmente crítica la primera ya que se obtendrá derivando una señal que procede de sensores y que por tanto tiene ruido el cual se amplificara al derivar y ha de ser tratado de forma correcta para mantener el sistema estable. El tratamiento de esta señal se explicará en detalle en su correspondiente sección.

Como última parte de este bucle se encuentra el propio control basado en espacio de estados el cual tomara como inputs los cinco grados de libertad que es capaz de controlar el sistema de levitación y guiado (el movimiento a lo largo del tubo no se controla) así como sus derivadas e integrales para generar como outputs diez corrientes de referencia que se deberán aplicar a cada unidad de levitación o guiado correspondientemente para lograr el control.

La estructura únicamente de este bucle se presenta en la Figura 40.

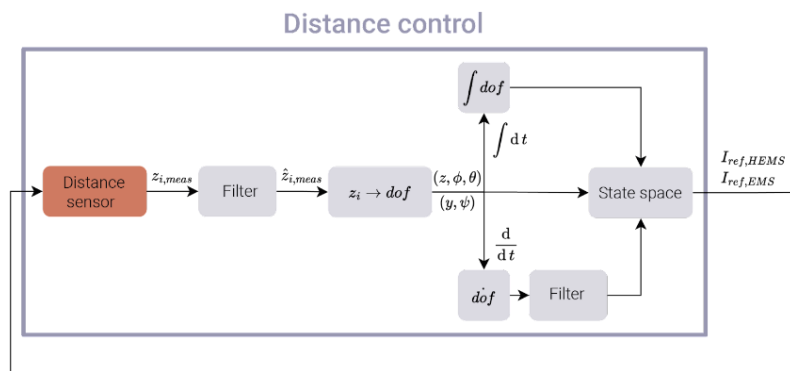


Figura 40. Bucle de posición

Todo este bucle requiere que la información del sistema se procese de forma global por ello este bucle incluyendo lectura de los sensores de air gap se computa en la LCU y las diferentes corrientes serán enviadas por CAN a cada LCU.

4.1.2.2. Bucle de corriente

La segunda dinámica que se presenta en el sistema se da en las unidades de levitación y guiado, esta dinámica corresponde a las LCU y nos encontramos que la variable de entrada es una corriente de referencia, la variable de salida la corriente real y la acción de control el voltaje aplicado. Dado que esto constituye un control bastante sencillo, un sistema SISO, la alta no linealidad presentada por las unidades y que puesto que se requiere controlar la corriente el bucle de control deberá ejecutarse a alta frecuencia se busca optimizar tiempo de ejecución y obtener la máxima robustez posible además de todos los problemas derivados que aparecerían de derivar una corriente se opta por el uso de un PI para este bucle. La estructura se puede ver en la figura 41.

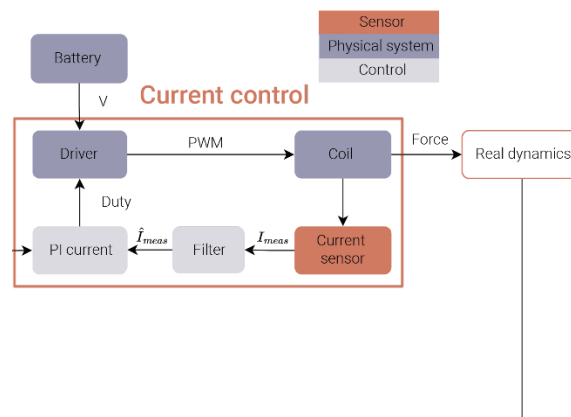


Figura 41. Bucle de corriente

Este PI trabajara con la diferencia entre la corriente real de la bobina y la de referencia variando el voltaje aplicado mediante una PWM que permite aplicar corriente en ambos sentidos gracias a un puente en H. El objetivo de este PI es hacer que la corriente real siga la de referencia con el menor retraso posible en todo el rango de trabajo a pesar de la inductancia variable resultando esto en que la fuerza aplicada es la deseada.

4.2. Modelado del sistema

Una vez seleccionada la arquitectura de control, así como los bucles en que se dividirá el mismo debemos tener en cuenta que el control que realizaremos se basa en modelos por lo que es importante realizar un modelado de los sistemas, tanto de la bancada de levitación como de Auran. Inicialmente se realizarán los modelos basados

en los datos de las simulaciones para posteriormente ajustar los mismos con la información obtenida durante la identificación.

4.2.1. Bancada de levitación

El primer elemento que deberemos modelar y que además servirá como base para un modelo más completo es la bancada de levitación, recordamos que el objetivo de esta es simular el funcionamiento que tendrán las unidades en vehículo a menor escala y en un entorno controlado (solo se permitirá la variación de air gap) dentro del modelado de la bancada distinguimos los siguientes modelos:

- Modelo dinámico: corresponde con cómo será el comportamiento del sistema en relación a las fuerzas que se le aplican.
- Modelo de fuerzas: como se relaciona la fuerza ejercida por la unidad con la corriente que pasa por esta.
- Modelo de la corriente: como se llega a la corriente final aplicada en función de la tensión aplicada y la inductancia.
- Modelos de los sensores: se modelará el ruido, retraso y resolución de los mismos, así como los filtros que se implementaran.

4.2.1.1. Modelo no lineal

El primer modelo que debemos realizar y donde más precisión nos interesa tener puesto que será el modelo que usemos como base para obtener el modelo lineal y para la validación del sistema será el modelo no lineal. Este modelo ha de reproducir el comportamiento del sistema de la forma más fidedigna posible [19]. Como hemos comentado dentro de este modelo existen diferentes elementos que deberemos modelar.

El primer elemento a modelar serán las fuerzas ejercidas por las unidades en función de la corriente y el air gap, esta relación se obtuvo primeramente mediante simulaciones como se pudo ver en la Figura 17. Para el modelado puesto que se consideran estos datos como datos de alta precisión y se busca que el modelado se ajuste lo mejor posible se opta por realizar el modelado mediante un polinomio de dos variables que serán la corriente y el air gap. El proceso usado para obtener estos modelos se explicará en la sección del modelo no lineal de Auran. El resultado que se presenta en la Figura 42.

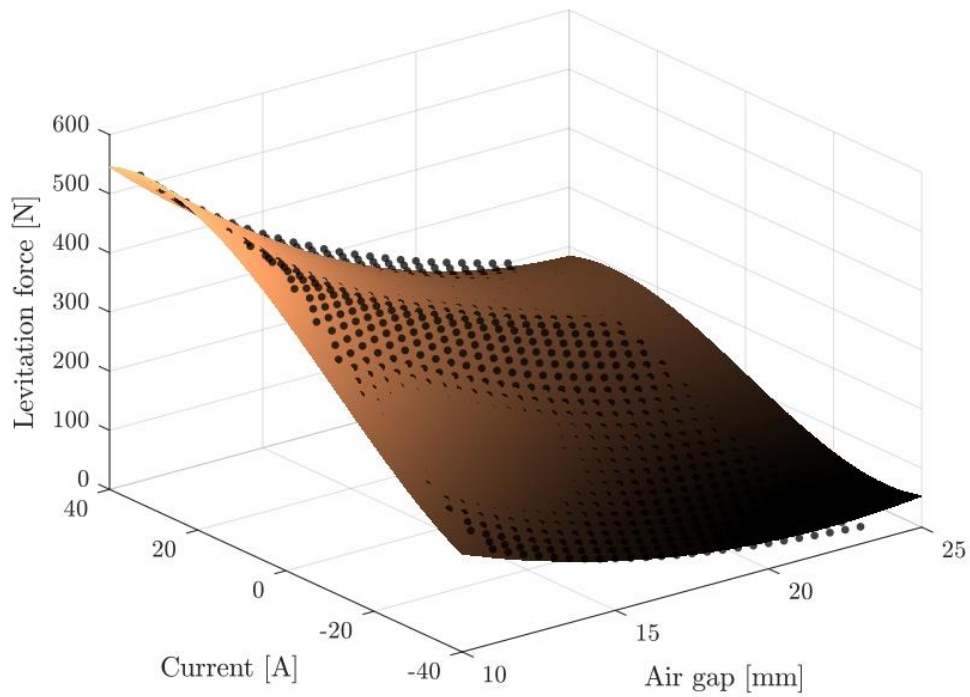


Figura 42. Ajuste modelo fuerzas HEMS (R^2 99.62%)

El mismo proceso se sigue para las unidades de guiado en lo respectivo a la fuerza finalmente lográndose el ajuste mediante el polinomio que se presenta en la Figura 43.

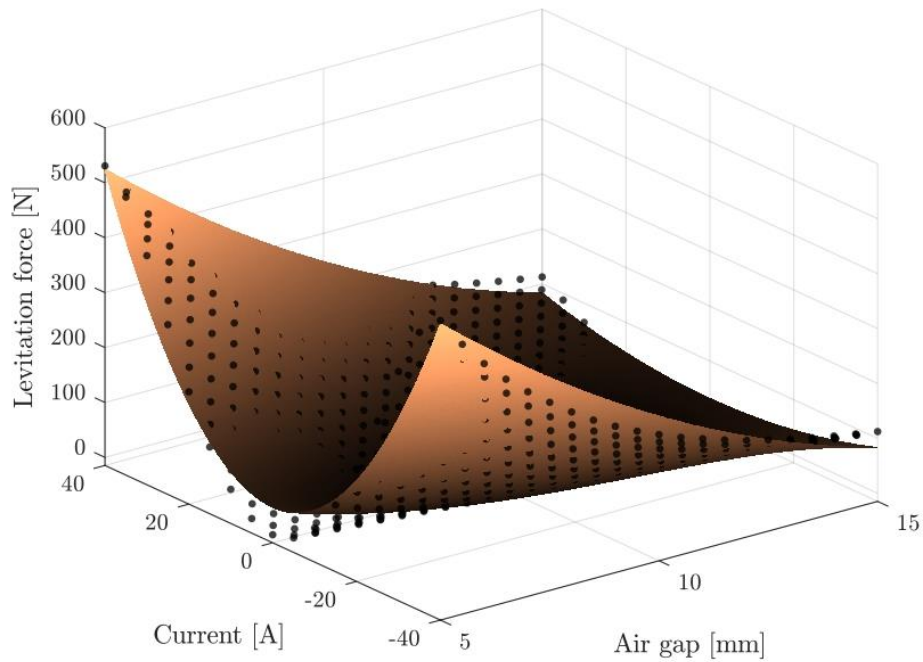


Figura 43. Ajuste modelo fuerzas HEMS (R^2 97.86%)

El siguiente elemento que se procedió a modelar fueron las inductancias también presentados los resultados de las simulaciones previamente para este caso dado la forma “especial” que presenta como si fuera un escalón se descartó el uso de un polinomio convencional ya que el ajuste que ofrecía no era óptimo. Viendo la imagen se puede observar como la forma de la inductancia es similar a la de una tangente hiperbólica por lo que se trata de aproximar mediante una ecuación de este tipo siendo la ecuación la presentada en la Ecuación 3. En la cual se decide que a fin de obtener un mejor ajuste no se considerara la variación con la corriente al ser esta mínima.

$$a \cdot \tanh(b \cdot I + c) + d \cdot x_{air\ gap} + e \quad (3)$$

El resultado del ajuste de este modelo se presenta en la Figura 44.

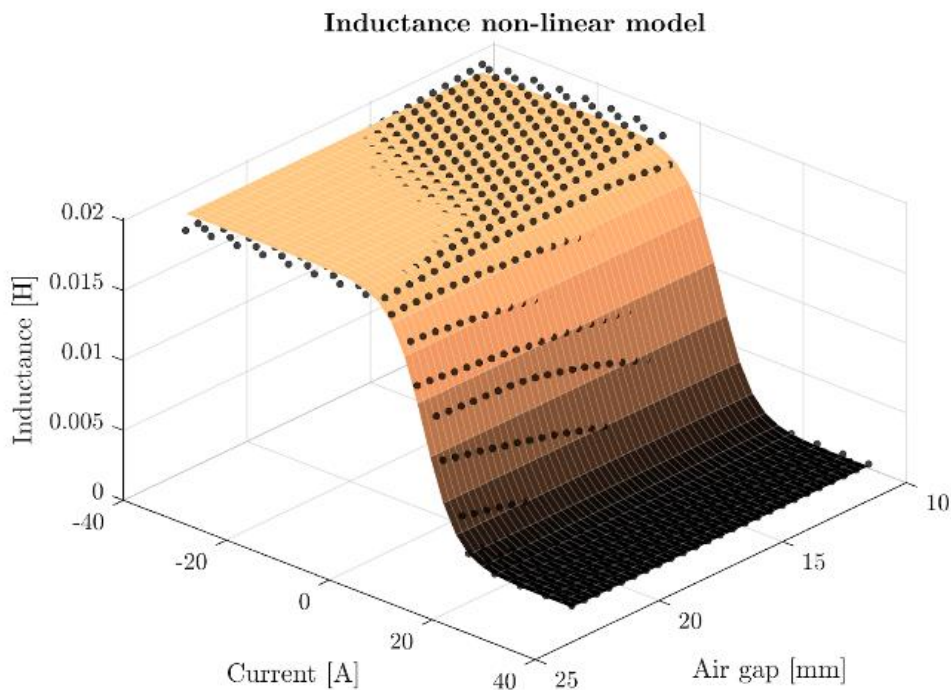


Figura 44. Ajuste modelo de la inductancia

Todos estos modelos se implementan dentro de bloques específicos dentro de MATLAB para que se incorporen e interaccionen con el modelo.

El siguiente elemento que se modela es el comportamiento dinámico, que en el caso de la bancada de levitación al estar limitado el movimiento únicamente a la variación de air gap es relativamente sencillo ya que se basa en la ley de Newton (Ecuación 4).

$$F = m \cdot a \tag{4}$$

De esta forma a partir de la fuerza que obtenemos mediante los modelos presentados anteriormente podemos hallar la aceleración que sufre el sistema y mediante integración de este parámetro la velocidad y posición, siendo este último parámetro el que obtendremos en el sistema real mediante el sensor de air gap.

Por último, dentro del modelado se incluye la dinámica de los sensores para el modelado de estos se toma inicialmente una estimación. El modelado se realiza como la adición de un valor aleatorio al que se le ajusta la desviación estándar para que se adapte a un valor con sentido, también se incluye dentro del modelo la resolución de los propios sensores, esto se realiza tanto para los sensores de air gap como para los de corriente. También se incluye dentro del modelo (a pesar de ser un elemento lineal) los filtros que se aplican a las señales obtenidas de los sensores y que introducirán un retraso en el sistema. La estructura del modelo no-lineal se presenta en la Figura 45, 46, 47 y 48.

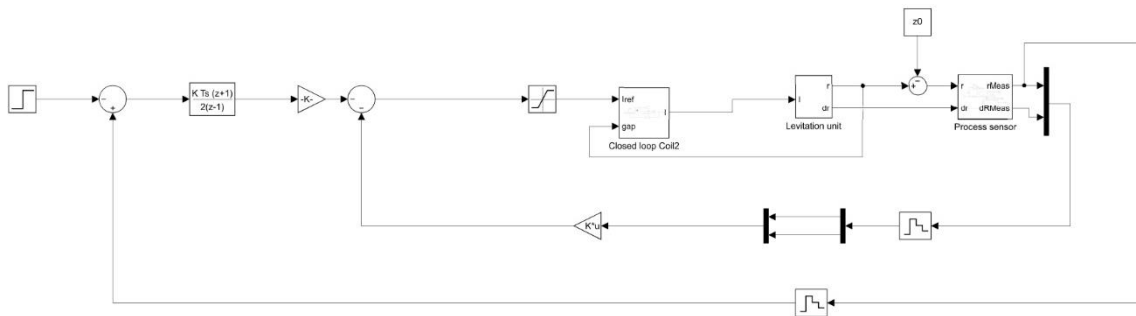


Figura 45. Esquema general bancada levitación simulink

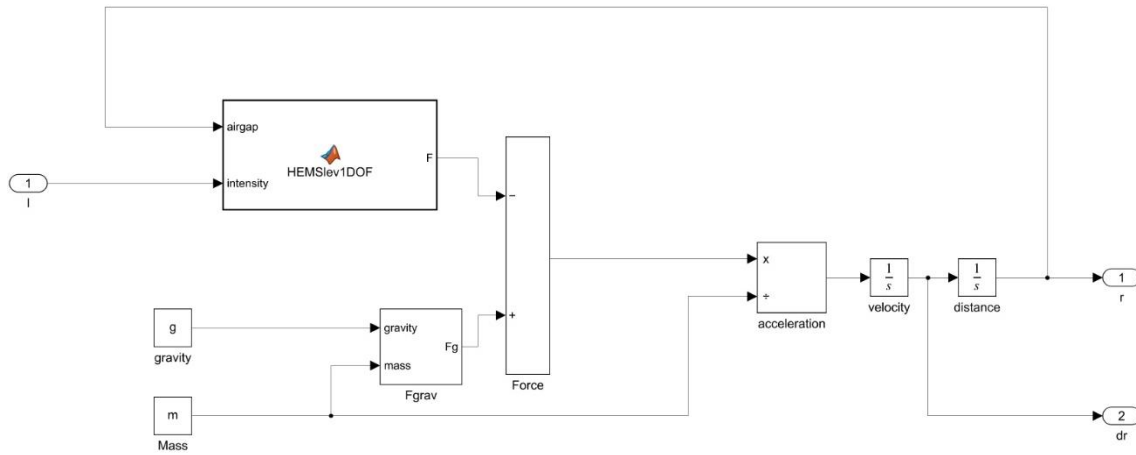


Figura 46. Modelados de la fuerza y dinámica simulink

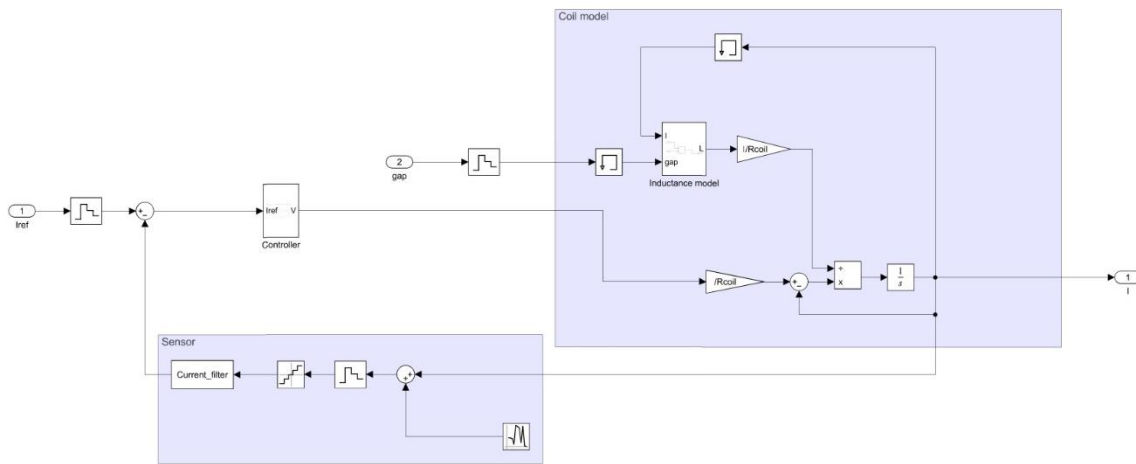


Figura 47. Modelado bobina, inductancia y sensor corriente simulink

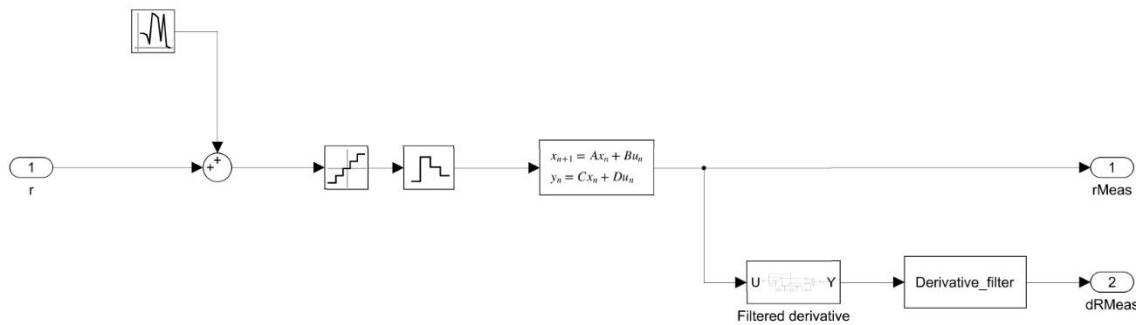


Figura 48. Modelado sensor air gap, derivada y filtros asociados simulink

4.2.1.2. Modelo lineal

La mayor parte del esfuerzo referente al modelado recae sobre el modelo no lineal ya que es el que se usará durante la validación. El modelo lineal al que se hace referencia aquí tendrá como objetivo el llegar a una simplificación de la física que rige el sistema sin necesidad de uso de polinomios de alto grado o con elementos fuertemente no lineales ya que al linealizar para obtener el modelo a partir del cual se hará el control el comportamiento divergiera mucho de la realidad haciendo que el control no aplicase la acción de control necesaria en cada momento. Por todo esto se opta por el uso de polinomios simples de bajo grado en los cuales se busca que la derivada mantenga el sentido físico y se priorizara el ajuste en torno al punto que se usará para la linealización para intentar maximizar la similitud de este modelo con el no lineal alrededor de este punto.

Para las unidades de levitación se separa la dinámica del imán permanente (se obtiene usando solo datos con corriente nula) de la del electroimán (se obtiene restando la fuerza ejercida por el imán permanente) siendo especialmente delicado este ajuste puesto que depende de dos variables. Con el objetivo de que el ajuste se mejore se descartaran puntos que no tengan sentido desde el punto de vista de la operación normal (máxima corriente a mínima distancia, por ejemplo) y se limita también los datos usados hasta obtener un buen ajuste. Los polinomios usados para modelar estas dinámicas se presentan en las Ecuaciones 5 y 6.

$$F_{\text{iman permanente}} = \frac{p_1}{(p_2 + z)^2} \quad (5)$$

$$F_{\text{electroiman}} = \frac{k_1 \cdot I}{(k_3 \cdot z - k_2)^2} \quad (6)$$

Y el resultado que se obtiene después de usar esos polinomios para ajustar los datos previamente seleccionados se presentan en las Figuras 49, 50 y 51.

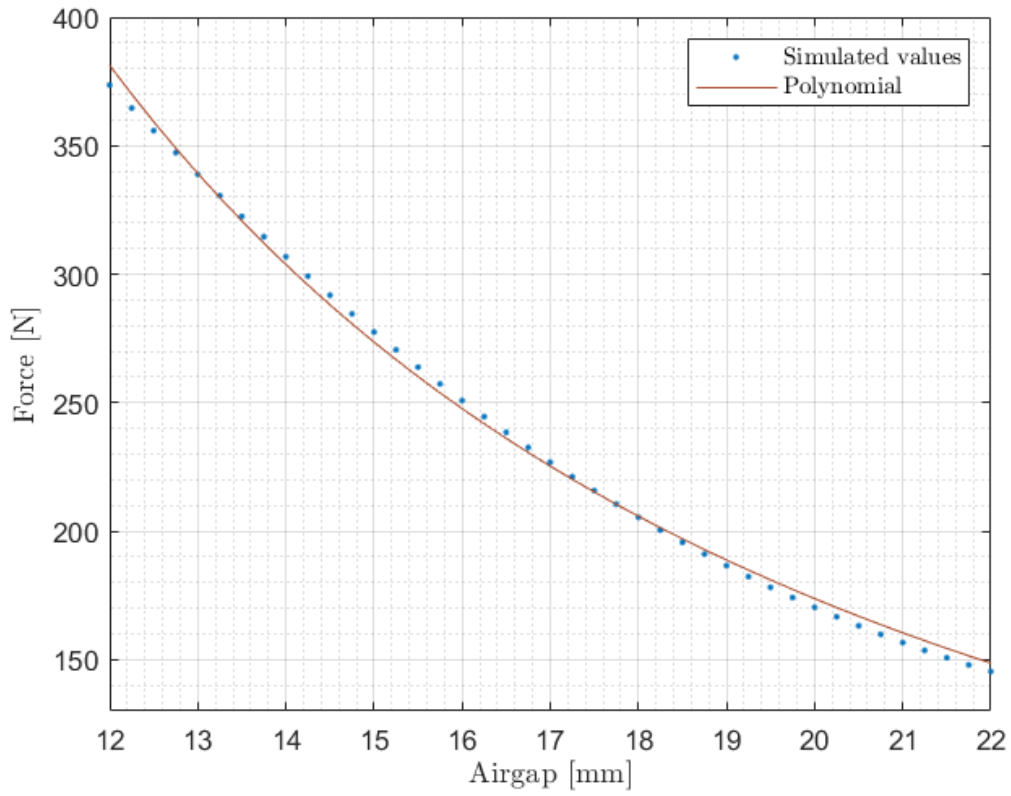


Figura 49. Ajuste polinomio parte imán permanente HEMS

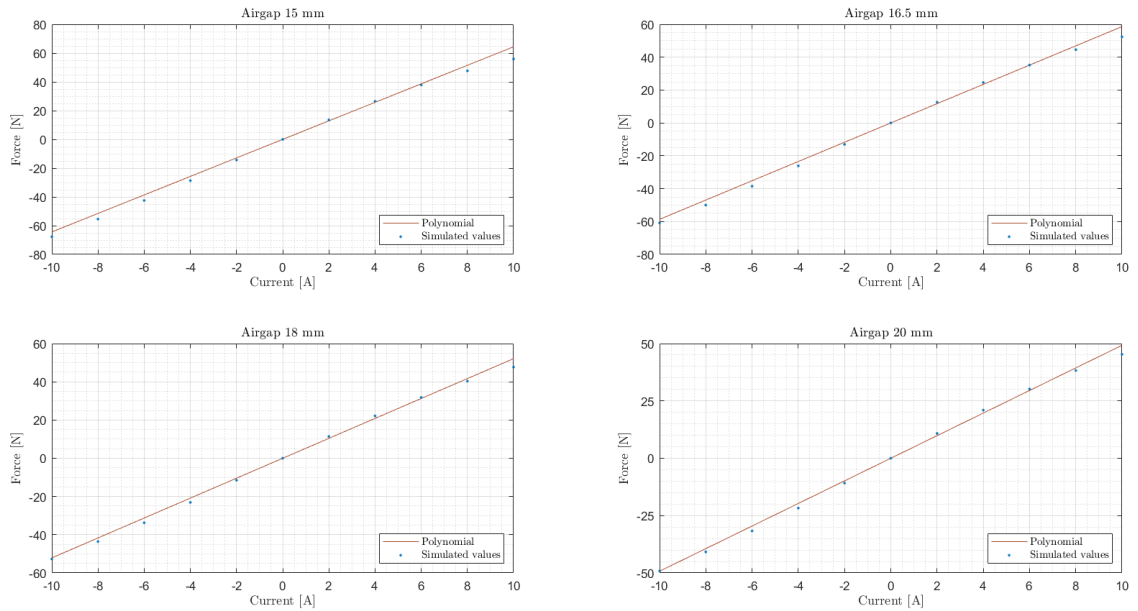


Figura 50. Ajuste polinomio electroimán a air gap fijos HEMS

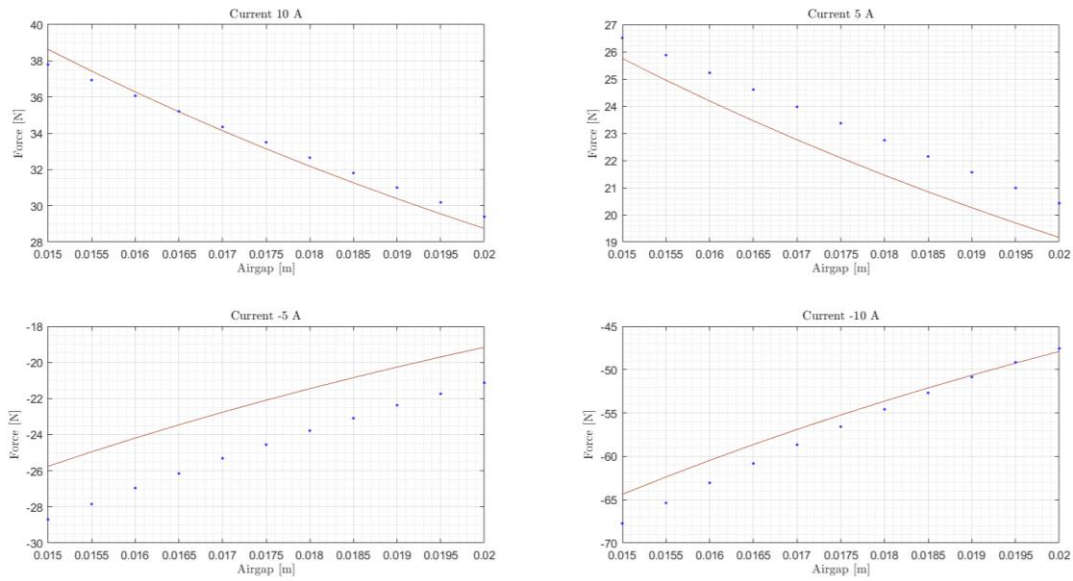


Figura 51. Ajuste polinomio electroimán a corriente fija HEMS

Se puede apreciar en las imágenes como para el imán permanente al ser dependiente únicamente de la distancia y la forma una exponencial más sencilla el ajuste tanto en el propio valor como en la tendencia (es lo que nos afecta más a la hora de linealizar) se ajusta bastante bien a los valores. Especialmente en el entorno de 17.5 – 18 mm que será el punto para el cual linealizaremos por lo que daremos como correcto este ajuste.

Respecto al electroimán puesto que es dependiente de dos variables (corriente y air gap) el ajuste mediante un polinomio simplificado arrojará peores resultados en el valor, pero de nuevo buscaremos que la tendencia sea lo más similar posible. Puesto que el punto para el que se linealizará será el de corriente nula y en torno a los 17.5 – 18 mm y el polinomio usado es lineal este no dará un buen ajuste si usamos todos los datos a nuestra disposición además de que algunos no tienen sentido desde el punto de vista de la operación (corriente negativa a máxima distancia, etc.) por lo que se limitan estos datos a valores entre -10 y 10 A para la corriente y 15 y 20 mm para el air gap.

En la Figura 50 se muestra el ajuste del polinomio manteniendo fijos distintos air gaps y variando la corriente. Se puede apreciar como para los diferentes air gaps el ajuste es bastante bueno tanto en valor como en tendencia, especialmente en el entorno de corriente nula que es el punto que más nos interesa.

De igual forma en la Figura 51 se realiza un proceso similar en este caso fijando la corriente y modificando el air gap. Se ve como el ajuste a los valores en este caso es peor (aunque para corriente nula el resultado es el mismo puesto que es cero en el polinomio y en los datos), esto se debe a las limitaciones del ajuste mediante estos polinomios más sencillos, de igual forma la tendencia se mantiene tanto para valores de corriente positivas como negativas y parece asemejarse bastante a la información real por lo que se da por valido también este ajuste teniendo en cuenta cual es el punto sobre el que linealizaremos.

Se realiza un proceso similar para las unidades de guiado, aunque en este caso solo existirá la parte del electroimán que se modela mediante la Ecuación 7.

$$F_{ems} = \frac{b_1 \cdot I}{(z + b_2)^2} \tag{7}$$

Igual que ocurría para los HEMS se busca que el ajuste en torno al punto de linealización, especialmente la tendencia sea lo más parecida posible, en el caso del EMS este punto también será la corriente nula, pero en este caso el air gap nominal será de 10 mm. Se realizan varias pruebas seleccionando distintas cantidades de datos llegando finalmente a la conclusión de que el mejor ajuste se realiza si se limita mucho los valores de corriente que se usan para el ajuste. Los resultados de los ajustes del polinomio se muestran en las Figuras 52 y 53.

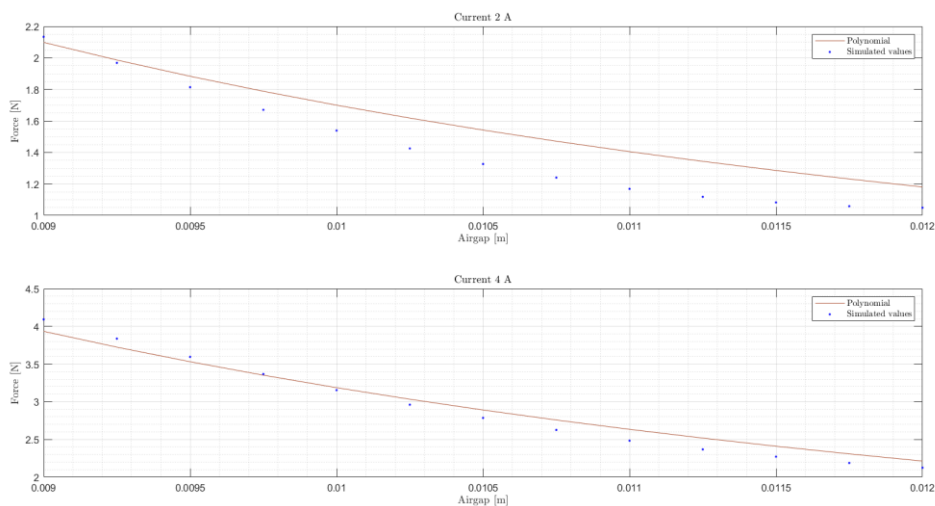


Figura 52. Ajuste polinomio EMS a corriente fija

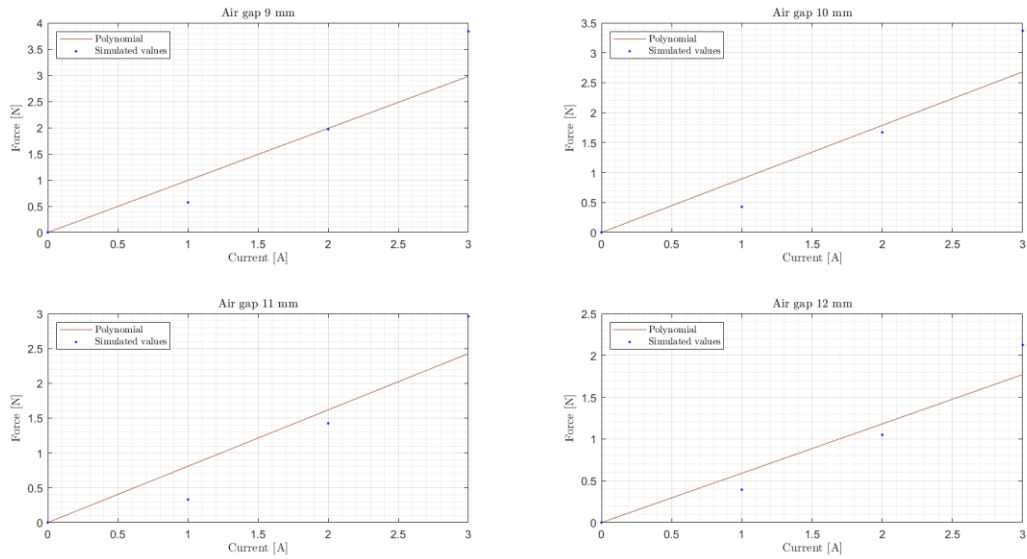


Figura 53. Ajuste polinomio EMS a air gap fijo

En la figura 52 se observa como es el ajuste para corrientes fijas al variar el air gap como ocurría con el electroimán del HEMS este ajuste no es óptimo en todo el rango para esta comparación, pero de nuevo nuestro mayor interés está en la tendencia más que en el valor propiamente dicho y esta parece seguirse de forma aceptable por lo que el ajuste se da como correcto.

Por último, en la Figura 53 se muestra la comparativa a diferentes corrientes manteniendo el air gap, para este caso el ajuste es mejor, aunque sigue habiendo diferencia en los valores, pero de nuevo nos interesa más la tendencia que parece ser correcta para todos los escenarios estudiados por lo que también se considerara correcto el ajuste.

Para el caso de la bancada de levitación solo se usará el modelo de los HEMS ya que son la única tecnología que se probará, como se ha explicado para realizar el control se usará un modelo simplificado sobre el que se linealizará, este proceso se hará usando el comando de MATLAB "linmod" al cual se le pasará como variables el valor de las variables para el punto de linealización, en este caso serán 17,5 mm para el air gap y cero para la corriente. El modelo de simulink que se usará para realizar esta linealización se muestra en la Figura 54.

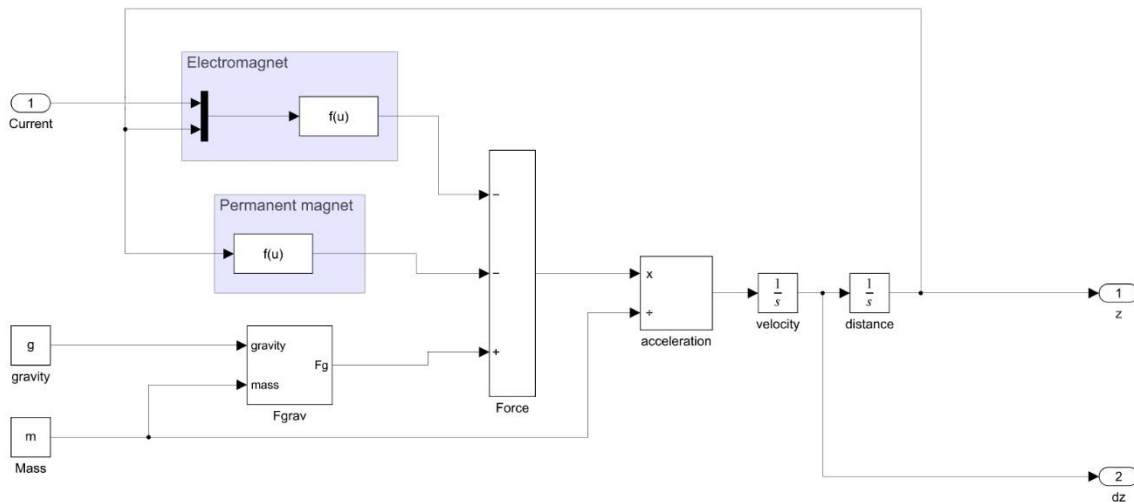


Figura 54. Modelo usado para linealización bancada de levitación

4.2.2. Auran

Una vez definido cuáles serán los modelos que se usarán para la bancada de levitación algunos de los cuales serán la base para el modelo global se procede a el modelado total del sistema de Auran este modelo a pesar de que use principalmente para la levitación que solo controlara cinco grados de libertad considerara también el desplazamiento longitudinal ya que se usara para las simulaciones dinámicas también. Las mayores diferencias entre ambos sistemas estarán en la dinámica del vehículo puesto que ahora no están restringidas, así como en la aparición de nuevas fuerzas que han de considerarse.

4.2.2.1. Modelo no lineal

Como primer paso en este apartado, es relevante introducir el modelo completo, considerando los 6 grados de libertad que comprenden tres traslaciones y tres rotaciones, del vehículo [20]. El modelado del vehículo se llevó a cabo con la ayuda de Ferran de Andrés Vert ingeniero aeronáutico.

El modelo incluye todas las fuerzas generadas por los subsistemas del vehículo, tales como:

- Fuerzas de levitación y de drag generadas por los HEMS
- Fuerzas de guiado generadas por los EMS
- Fuerza de tracción y transversal generadas por el DLIM
- Fuerza normal y de frenado generada por el sistema de frenado neumático

En la figura 55 se puede ver una representación del modelo junto con los ejes considerados para el mismo. El eje X es el eje longitudinal a lo largo del tubo, el eje Y es el eje lateral y el eje Z es el eje vertical, correspondiente a la distancia de levitación. Este modelo también considera el punto de aplicación de cada una de estas fuentes de fuerza para estimar el momento inducido por cada una de ellas. La nomenclatura de las variables de orientación se toma según una convención, siendo el alabeo una rotación a lo largo del eje X, el cabeceo una rotación a lo largo del eje Y y la guiñada una rotación a lo largo del eje Z.

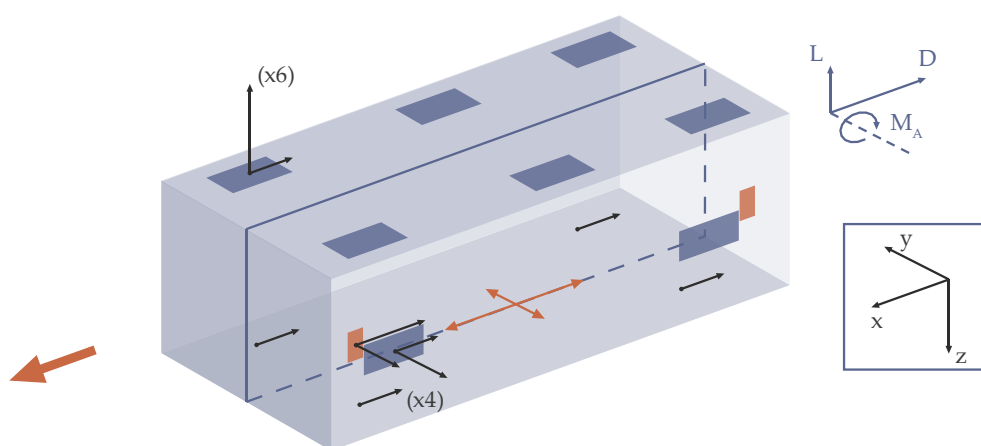


Figura 55. Modelo dinámico del vehículo simplificado para 6 GDL

Algunos de los principales supuestos durante el desarrollo del modelo son los siguientes:

- El vehículo es un sólido rígido de masa constante
- La componente transversal de las fuerzas de levitación es despreciable en comparación con su componente normal
- La transición entre el estado de aceleración del motor y el frenado es instantánea
- El valor cero de la posición en Z se corresponde con que la cara del imán permanente este en contacto con la plancha de acero.
- El valor cero de la posición en Y se corresponde con que este esté completamente centrado y que las unidades de los extremos se encuentren a diez milímetros entre su cara y la plancha lateral.

Antes de presentar el modelo dinámico, conviene introducir la nomenclatura. Los siguientes vectores describen la cinemática del vehículo en seis grados de libertad:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r} &= [x \quad y \quad z]^T \\
 \mathbf{v} &= [u \quad v \quad w]^T \\
 \boldsymbol{\alpha} &= [\phi \quad \theta \quad \varphi]^T \\
 \boldsymbol{\Omega} &= [p \quad q \quad r]^T
 \end{aligned} \tag{8}$$

Donde \mathbf{r} representa las tres componentes de posición, \mathbf{v} la velocidad, $\boldsymbol{\alpha}$ la orientación y $\boldsymbol{\Omega}$ la velocidad angular. El modelo dinámico de seis grados de libertad queda definido por las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned}
 \dot{p} &= [I_{zz}M_L + I_{xz}M_N - (I_{xz}(I_{yy}-I_{xx} - I_{zz}))p + (I_{xz}^2 + I_{zz}(I_{zz} - I_{yy}))r]q \cdot \det^{-1} \\
 \dot{q} &= [M_M - (I_{xx} - I_{yy})pr - I_{xz}(p^2 - r^2)][I_{yy}]^{-1} \\
 \dot{r} &= [I_{xz}M_L + I_{xz}M_N - (I_{xz}(I_{yy}-I_{xx} - I_{zz}))r + (I_{xz}^2 + I_{xx}(I_{xx} - I_{yy}))p]q \cdot \det^{-1} \\
 \dot{u} &= \frac{F_X}{m} - g \sin(\theta) + rv - qw \\
 \dot{v} &= \frac{F_Y}{m} - g \cos(\theta) \sin(\Phi) - ru + pw \\
 \dot{w} &= \frac{F_Z}{m} - g \cos(\theta) \cos(\Phi) + qu - pv
 \end{aligned} \tag{9}$$

Donde

$$det = (I_{XX}I_{ZZ} - I_{XZ}^2)^{-1} \quad (10)$$

La siguiente transformación de coordenadas relaciona las coordenadas fijadas por el cuerpo y las inerciales

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\varphi & s\phi s\theta c\varphi - c\phi s\varphi & c\phi s\theta c\varphi + s\phi s\varphi & 0 & 0 & 0 \\ c\theta s\varphi & s\phi s\theta s\varphi + c\phi c\varphi & c\phi s\theta s\varphi - s\phi c\varphi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi \cdot \sec(\theta) & c\phi \cdot \sec(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (11)$$

Finalmente, y teniendo en cuenta lo anterior la dinámica del vehículo se implementará mediante el bloque de MATLAB “6DOF (Euler Angles)” esto se hace ya que se ajusta a las condiciones del modelo y las asunciones realizadas, así como por su fácil implementación, bajo tiempo de desarrollo, alto grado de fiabilidad y amplia literatura. El bloque se presenta en la Figura 56.

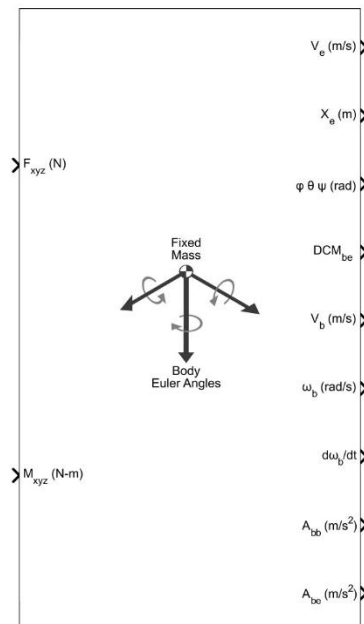


Figura 56. Bloque 6DOF MATALB

Respecto al modelado de las fuerzas este ya se ha presentado previamente para la fuerza ejercida por las unidades de levitación y guiado, explicándose que se hizo mediante polinomios. Cabe destacar también que se busca que estos polinomios sean lo menos complejos posibles (siempre que proporcionen un buen ajuste) a fin de evitar problemas y errores numéricos durante las simulaciones.

Para el modelado el error es predicho dividiendo de forma aleatoria los datos en dos partes una que contendrá el 80% de los datos que se usará para entrenar el modelo y otra con el 20% que se usará para estimar el error del modelo como se muestra en la Figura 57.

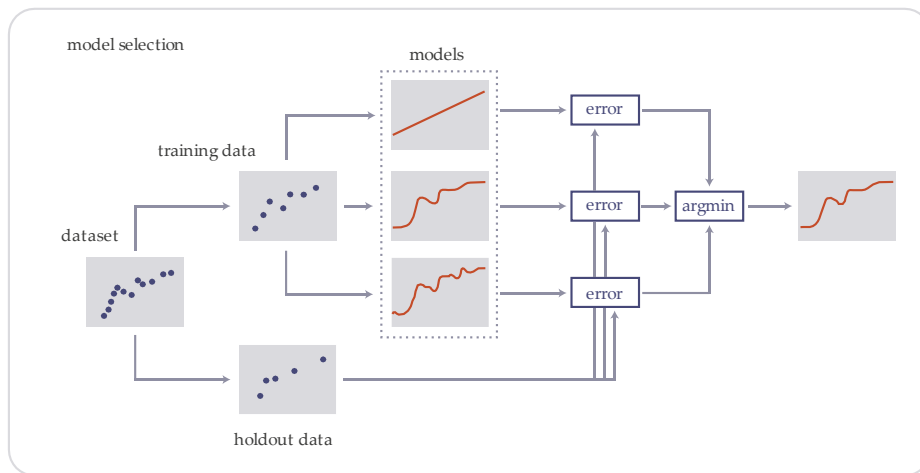


Figura 57. Diagrama de la selección del modelo

Para obtener una buena estimación del error sin consumir demasiados datos, ya que en muchos de los casos no hay muchos, se emplea el proceso de validación cruzada con una partición de 4, calculando un modelo medio sobre cada una de las diferentes particiones, como se ve en la Figura 58.

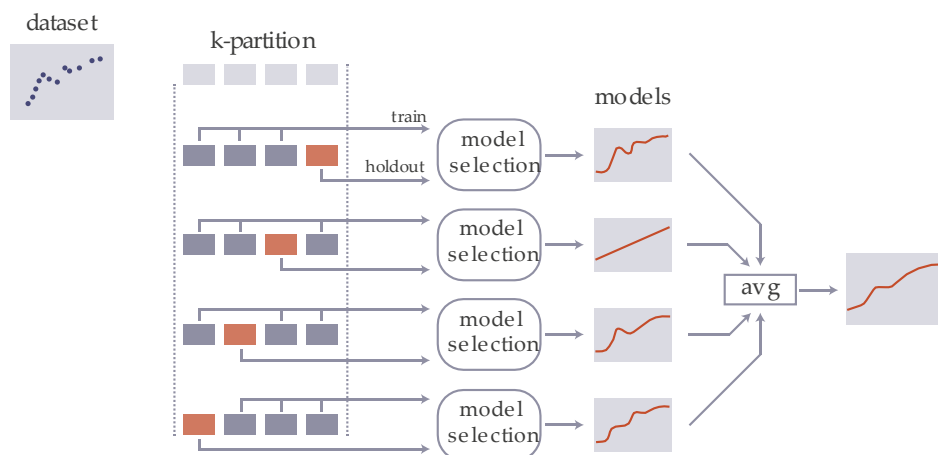


Figura 58. Validación cruzada del modelo

Usando este proceso se obtienen los modelos de las fuerzas tanto de la levitación de los HEMS (Figura 42) y las de guiado de los EMS (Figura 43). Además, se obtiene el modelo de las fuerzas del motor tanto en aceleración como en frenado, estos modelos se hacen en función de la velocidad teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones obtenidos, los resultados se muestran en la Figuras 59 y 60.

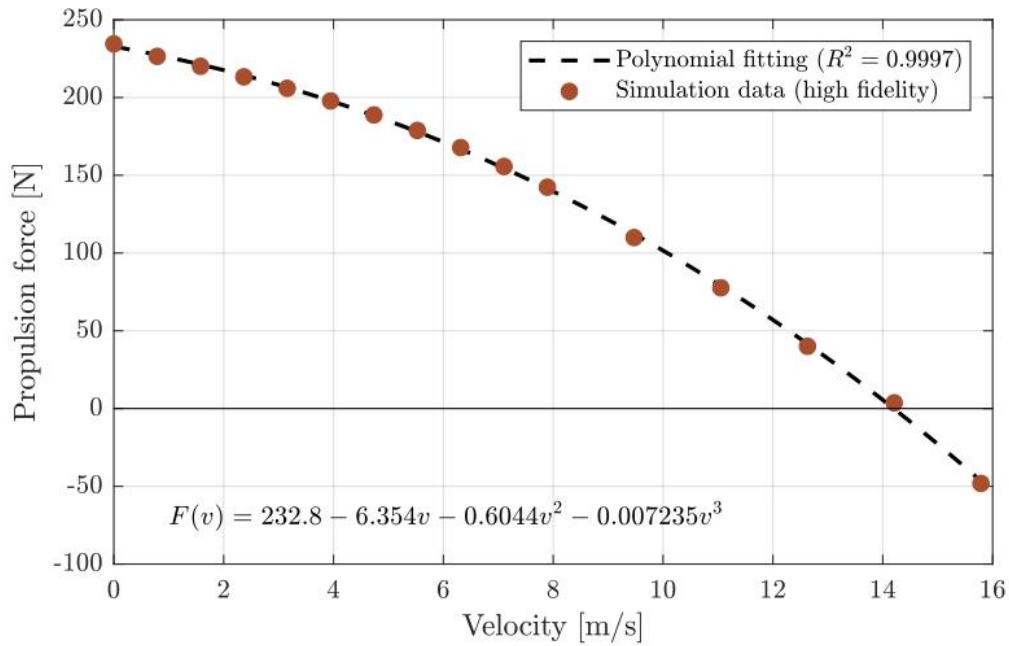


Figura 59. Modelado fuerza DLIM aceleración

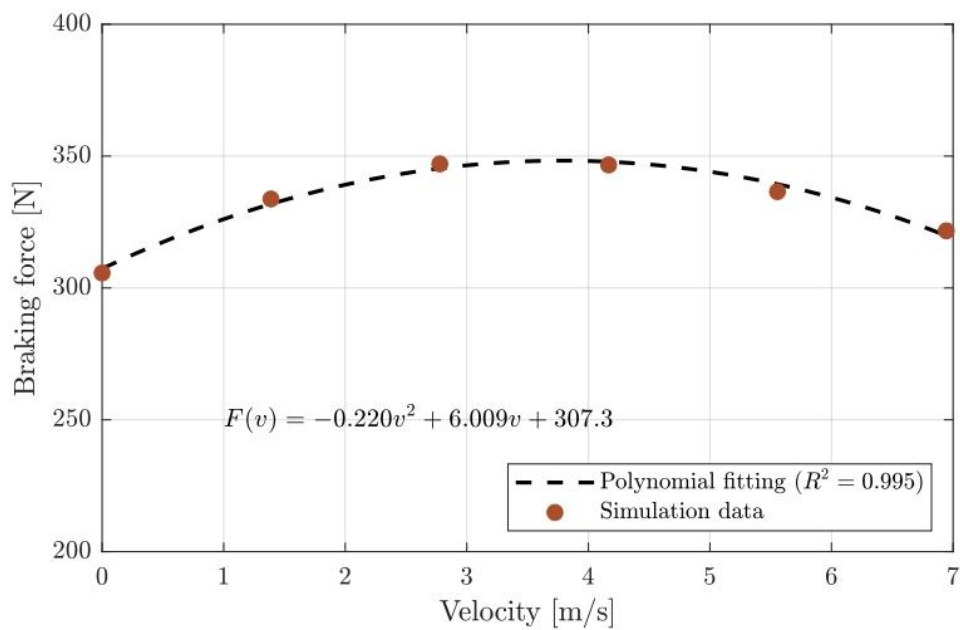


Figura 60. Modelado fuerza DLIM en frenado

También se realiza el modelado de la fuerza de drag generado por las unidades de levitación, este drag se produce por la presencia de un campo magnético entre la unidad y la plancha. Para el modelado se asume que esta fuerza no dependerá del air gap dando como resultado el modelo que se ve en la Figura 61.

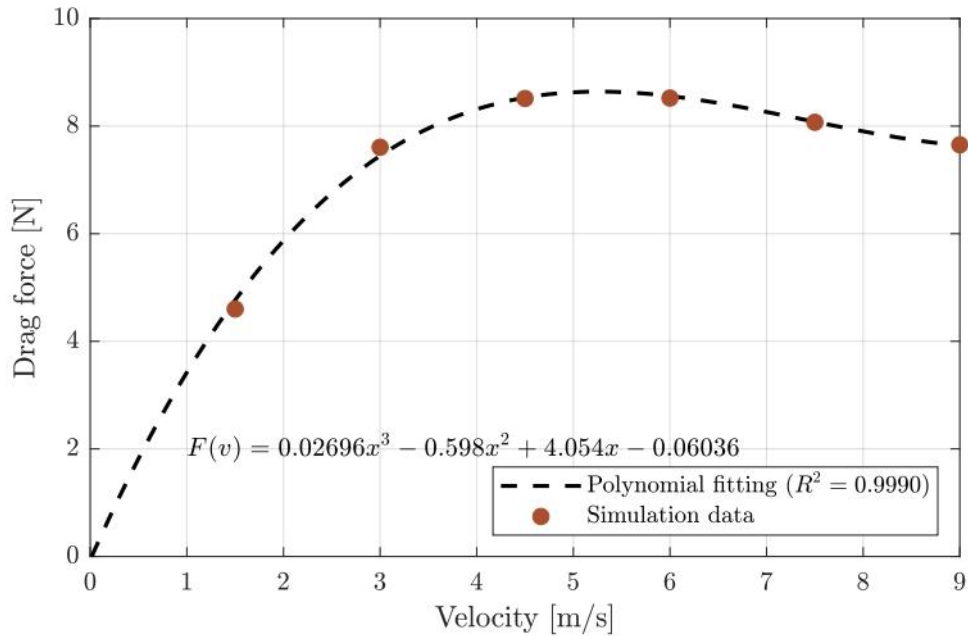


Figura 61. Modelado fuerza drag HEMS

Todos los modelos presentados se incorporan al modelo en simulink en la estructura que se puede ver en la Figura 62.

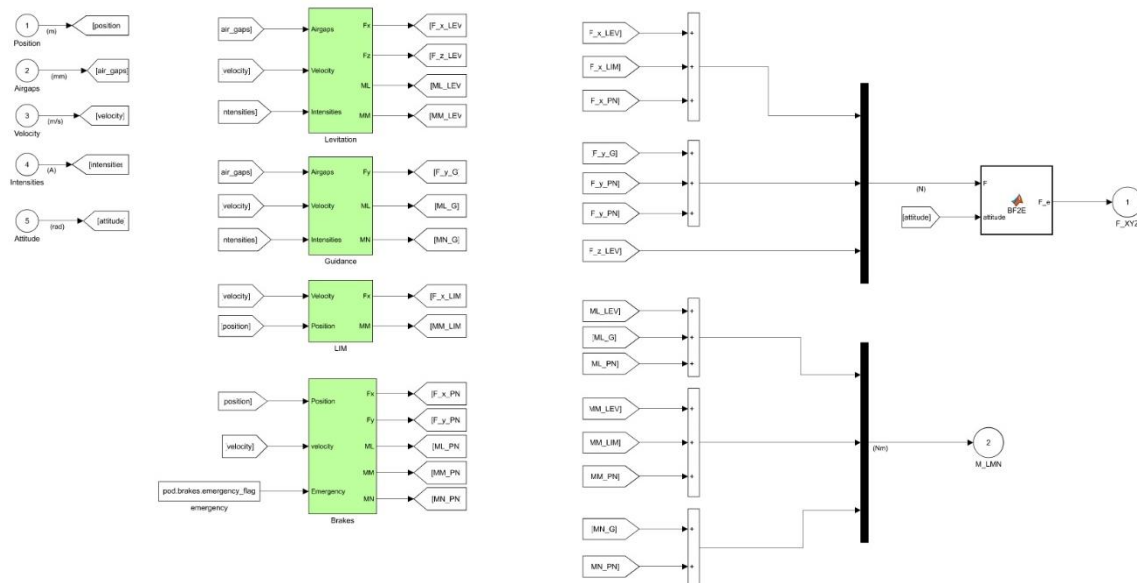


Figura 62. Estructura fuerzas Simulink

Como se puede apreciar el modelado se ha diferenciado por elementos a los cuales entrara uno de los cinco inputs al bloque al que toda la estructura pertenece estos inputs son: posición en el tubo (usada para determinar cuándo activar frenado), air gaps (para la fuerza de los HEMS y EMS), velocidad (usada para cálculos de drag y fuerza del DLIM), intensidades (usadas para el cálculo de la fuerza del HEMS y EMS) y orientación (usada para el computo de las fuerzas con los ejes correspondientes). Dentro de cada uno de los bloques no solo se obtendrá la fuerza resultante de cada sistema a partir de los modelos presentados, sino que a partir de los puntos de aplicación de las mismas y las características geométricas del vehículo se obtendrán todos los momentos que se generan. En la Figura 63 se puede ver el ejemplo del bloque de levitación.

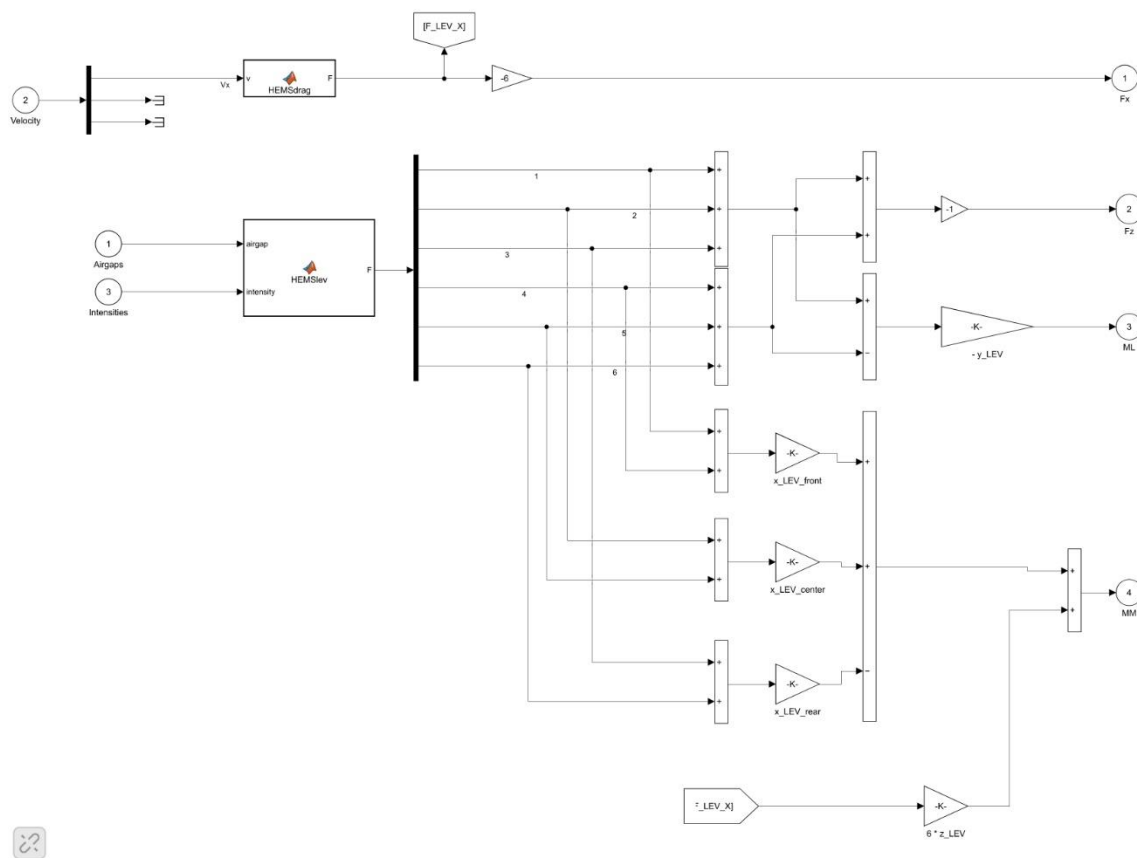


Figura 63. Bloque fuerzas levitación simulink

Una vez todas las fuerzas de cada sistema se han obtenido, así como los momentos estos se sumarán a fin de obtener las fuerzas y momentos resultantes aplicados sobre el sistema relacionados a los ejes tomados, siendo esta salida el input del bloque del comportamiento dinámico visto en la Figura 57.

Respecto al modelo eléctrico de la bobina que tiene en cuenta la resistencia e inductancia variable de la misma es idéntico al presentado para la bancada de levitación y que se muestra en la Figura 47.

El siguiente elemento a modelar y ultimo ya que se considera que los elementos de control, así como los filtros no forman parte del modelo perse, sino que son elementos del sistema de control y por lo tanto se detallaran en su sección. Estos elementos restantes son los relacionados con la adquisición de datos y transformaciones necesarias.

En nuestro modelo nos interesa ser capaces de simular tanto la dinámica real que ocurre en el vehículo como a la información a la que tendremos acceso en el sistema real esta es las distancias medidas por los sensores de air gap. En el modelo al trabajar con el bloque de Euler obtendremos la posición y orientación del centro de gravedad del vehículo por lo que necesitaremos hacer una primera transformación de esos datos a los air gaps esto es posible ya que conocemos la posición de los sensores y las características geométricas del vehículo. Cabe mencionar que este paso se realiza únicamente para que el modelo nos dé la mejor aproximación posible en la realidad esta transformación no será necesaria, el código para realizar esta transformación es el que se muestra en la Figura 64 y se implementara mediante un bloque de simulink.

Los parámetros geométricos usados para realizar esta transformación, así como las posteriores y la obtención de momentos a partir de las fuerzas se obtienen a partir del modelo de SolidWorks en el que se incluyen todos los elementos que componen Auran desde los mecánicos a los eléctricos incluyendo cableado, baterías, etc. Los principales datos obtenidos se muestran en la Tabla 8. En esta tabla las distancias estarán referenciadas respecto el centro geométrico del vehículo.

Tabla 6. Valores físicos y geométricos Auran

Datos generales	
Parámetros	Valor
Masa	122,62 kg
Ixx	9,79E+1 kg · m ²
Iyy	2,78E+2 kg · m ²
Izz	2,59E+2 kg · m ²
Ixz	-1,8E+0 kg · m ²
Datos levitación	
± Posición Y	0,06682 m
Posición X unidades delanteras	0,53833 m
Posición X unidades centrales	0,01133 m
Posición X unidades traseras	-0,51567 m
Posición Z	0,35975 m

Datos guiado	
Posición X unidades delanteras	0,50883 m
Posición X unidades traseras	0,48617 m
± Posición Y	0,36273 m
Posición Z	0,00406 m
Datos motor	
Posición Z	0,23111 m

Estas señales de air gap sin ruido serán las que se usen también como inputs para el cálculo en los modelos de las fuerzas ya que las unidades estarán afectadas por la distancia real que hay desde cada una.

Es importante resaltar que a pesar de que en la Figura 39 donde se mostró la numeración de los air gaps se reinicia la numeración cuando se cambia de unidades asociadas a HEMS a las asociadas al EMS, de cara a estos cálculos y por simplicidad se numeraran del uno al diez. Siendo del uno al seis los asociados a los HEMS y del siete al diez los asociados al EMS. Respetándose el orden ya establecido.

```

1 function y = pos2ag3D(r, rot, pod)
2 % Computes the airgaps as a function of the position and the attitude
3 %
4 % Last updated: 02.07.2022
5 %
6
7 y_CG = r(1);
8 z_CG = r(2);
9 rot_x = rot(1);
10 rot_y = rot(2);
11 rot_z = rot(3);
12
13 AG_0 = 10e-3;
14
15 AG_1 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) - pod.geometry.x_LEV_front * sin(rot_y) + pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
16 AG_2 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) - pod.geometry.x_LEV_center * sin(rot_y) + pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
17 AG_3 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) + pod.geometry.x_LEV_rear * sin(rot_y) + pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
18 AG_4 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) - pod.geometry.x_LEV_front * sin(rot_y) - pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
19 AG_5 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) - pod.geometry.x_LEV_center * sin(rot_y) - pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
20 AG_6 = z_CG - pod.geometry.z_LEV * cos(rot_y) + pod.geometry.x_LEV_rear * sin(rot_y) - pod.geometry.y_LEV * sin(rot_x);
21
22 AG_7 = - y_CG - pod.geometry.x_G_front * sin(rot_z) + AG_0 ;
23 AG_8 = - y_CG + pod.geometry.x_G_rear * sin(rot_z) + AG_0 ;
24 AG_9 = y_CG + pod.geometry.x_G_front * sin(rot_z) + AG_0 ;
25 AG_10 = y_CG - pod.geometry.x_G_rear * sin(rot_z) + AG_0 ;
26
27 y = [AG_1; AG_2; AG_3; AG_4; AG_5; AG_6; AG_7; AG_8; AG_9; AG_10];
28
29 y(y<0)=0;
30

```

Figura 64. Código para transformar posición y orientación en air gaps

Una vez obtenidos los air gaps para simular la adquisición de datos de la forma más correcta posible se les añadirá un ruido mediante una señal aleatoria con una desviación estándar que primero se estimara en función a información de otros años y más adelante se obtendrá de forma experimental, también se tendrá en cuenta la resolución del sensor y se ajustará la frecuencia a la de muestreo del sensor, esto se hará para cada uno de los diez air gaps obtenidos, en la Figura 65 se muestra el ejemplo para un air gap (se incluye

el filtrado posterior). Una vez hecho esto para todos los air gaps tendremos señales que simulan las reales que nos encontraremos en el propio vehículo y por lo tanto sobre las que deberemos trabajar.

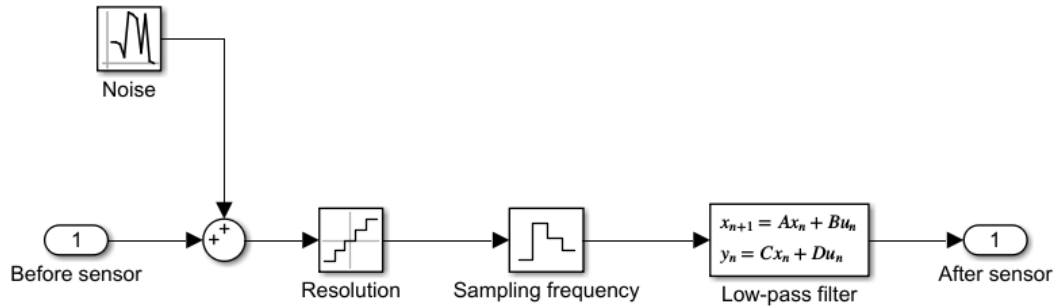


Figura 65. Modelado adquisición datos air gap

En cuanto al sensor de corriente, el proceso seguido será exactamente el mismo ajustando los parámetros a las características de ese sensor.

Una vez tenemos estas señales de air gap reales deberemos transformarlas ya que como se ha comentado a lo largo del trabajo a fin de obtener un control más estable y robusto las variables del mismo serán la posición y orientación del vehículo no los air gaps individualmente, por esto se requiere una transformación inversa a la realizada en el paso previo, la cual de nuevo teniendo en cuenta la posición de cada sensor de air gap y las características geométricas nos devolverá las dos posiciones y tres orientaciones. Este algoritmo si ha de ser implementado en el vehículo y por lo tanto se ajustará experimentalmente cuando llegue ese momento.

Auran cuenta con diez sensores de air gap lo cual hace que exista redundancia en varias medidas especialmente las de posición, esto se aprovecha para obtener los valores finales a partir de un promedio de forma que también se minimiza el efecto del ruido.

La obtención de los valores de posición es trivial ya que se realiza a partir de las medidas directamente, no así para los ángulos que se obtienen a partir de esas medidas de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 RotX_1 &= \text{asin}\left(\frac{AG_1 - AG_4}{2y_{LEV}}\right) \\
 RotX_2 &= \text{asin}\left(\frac{AG_2 - AG_5}{2y_{LEV}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

$$RotX_3 = \text{asin}\left(\frac{AG_3 - AG_6}{2y_{LEV}}\right)$$

$$RotZ_1 = \text{asin}\left(\frac{AG_8 - AG_7}{2x_{GUI}}\right)$$

$$RotZ_2 = \text{asin}\left(\frac{AG_{10} - AG_9}{2x_{GUI}}\right)$$

$$RotY_1 = \text{asin}\left(\frac{AG_5 - AG_4}{x_{LEV}}\right)$$

$$RotY_2 = \text{asin}\left(\frac{AG_6 - AG_4}{2x_{LEV}}\right)$$

$$RotY_3 = \text{asin}\left(\frac{AG_6 - AG_5}{2x_{LEV}}\right)$$

$$RotY_4 = \text{asin}\left(\frac{AG_3 - AG_2}{x_{LEV}}\right)$$

$$RotY_5 = \text{asin}\left(\frac{AG_3 - AG_1}{2x_{LEV}}\right)$$

$$RotY_6 = \text{asin}\left(\frac{AG_2 - AG_1}{x_{LEV}}\right)$$

La implementación del código en simulink que contiene las transformaciones se muestra en la Figura 66.

```

%% Attitude
rotx_aux(1) = asin((airgaps(1) - airgaps(4))/(2 * pod.geometry.y_LEV));
rotx_aux(2) = asin((airgaps(2) - airgaps(5))/(2 * pod.geometry.y_LEV));
rotx_aux(3) = asin((airgaps(3) - airgaps(6))/(2 * pod.geometry.y_LEV));

roty_aux(1) = asin((airgaps(5) - airgaps(4))/( pod.geometry.x_LEV));
roty_aux(2) = asin((airgaps(6) - airgaps(4))/(2 * pod.geometry.x_LEV));
roty_aux(3) = asin((airgaps(6) - airgaps(5))/( pod.geometry.x_LEV));
roty_aux(4) = asin((airgaps(3) - airgaps(2))/( pod.geometry.x_LEV));
roty_aux(5) = asin((airgaps(3) - airgaps(1))/(2 * pod.geometry.x_LEV));
roty_aux(6) = asin((airgaps(2) - airgaps(1))/( pod.geometry.x_LEV));

rotz_aux(1) = asin((airgaps(8) - airgaps(7))/(2*pod.geometry.x_G));
rotz_aux(2) = asin((airgaps(9) - airgaps(10))/(2*pod.geometry.x_G));

rotx = mean(rotx_aux);
roty = mean(roty_aux);
rotz = mean(rotz_aux);

%% Position
x_G = pod.geometry.x_G;
x_LEV = pod.geometry.x_LEV;

y_aux(1) = - airgaps(7) - pod.geometry.x_G_front * sin(rotz) + pod.geometry.y_G * cos(rotz);
y_aux(2) = - airgaps(8) + pod.geometry.x_G_rear * sin(rotz) + pod.geometry.y_G * cos(rotz);
y_aux(3) = airgaps(9) - pod.geometry.x_G_front * sin(rotz) - pod.geometry.y_G * cos(rotz);
y_aux(4) = airgaps(10) + pod.geometry.x_G_rear * sin(rotz) - pod.geometry.y_G * cos(rotz);

z_aux(1) = airgaps(1) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) + pod.geometry.x_LEV_front * sin(roty) - pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);
z_aux(2) = airgaps(2) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) + pod.geometry.x_LEV_center * sin(roty) - pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);
z_aux(3) = airgaps(3) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) + pod.geometry.x_LEV_rear * sin(roty) - pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);
z_aux(4) = airgaps(4) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) + pod.geometry.x_LEV_front * sin(roty) + pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);
z_aux(5) = airgaps(5) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) + pod.geometry.x_LEV_center * sin(roty) + pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);
z_aux(6) = airgaps(6) + pod.geometry.z_LEV * cos(roty) - pod.geometry.x_LEV_rear * sin(roty) + pod.geometry.y_LEV * sin(rotx);

y = mean(y_aux);
z = mean(z_aux);

u = [y, z, rotx, roty, rotz]';

```

Figura 66. Código para pasar air gap a posición y orientación

Por último, en la Figura 67 se muestra cómo se enlazan todos los bloques para desde el input que es la posición y orientación reales del vehículo llegar a la estimación de las mismas, más adelante se mostrara la calidad de estas estimaciones.

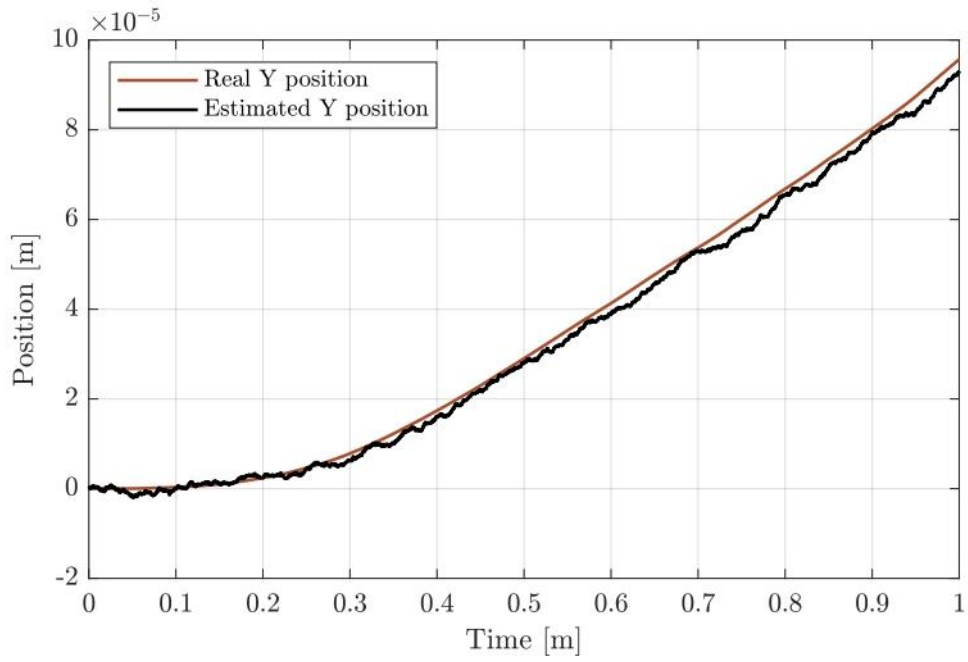


Figura 69. Estimación posición en Y

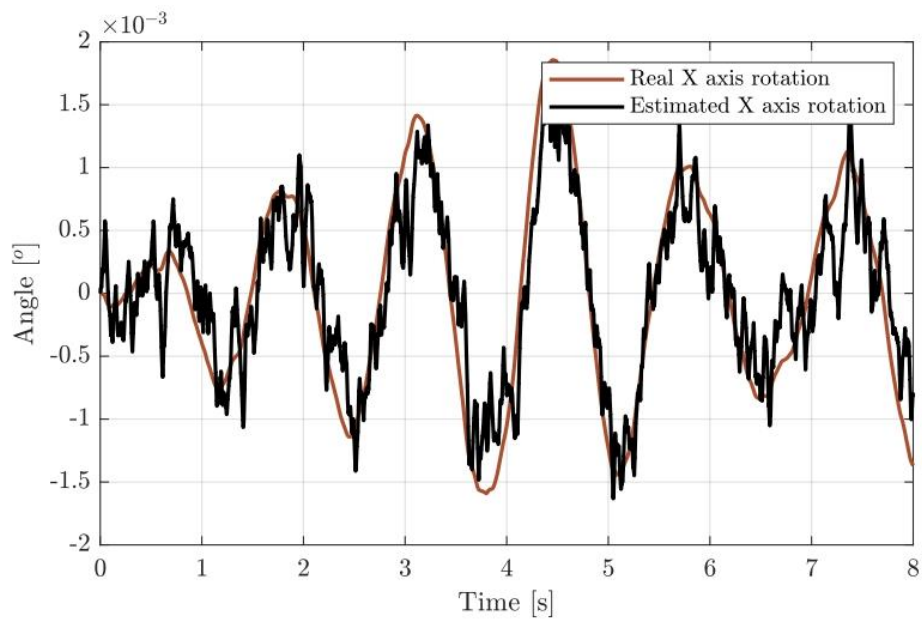


Figura 70. Estimación rotación en X (alabeo)

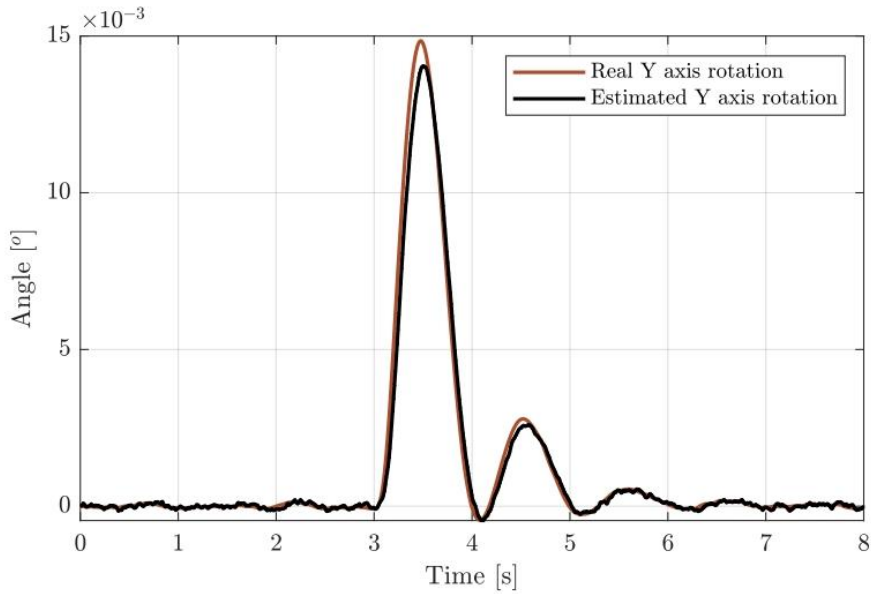


Figura 71. Estimación rotación en Y (cabeceo)

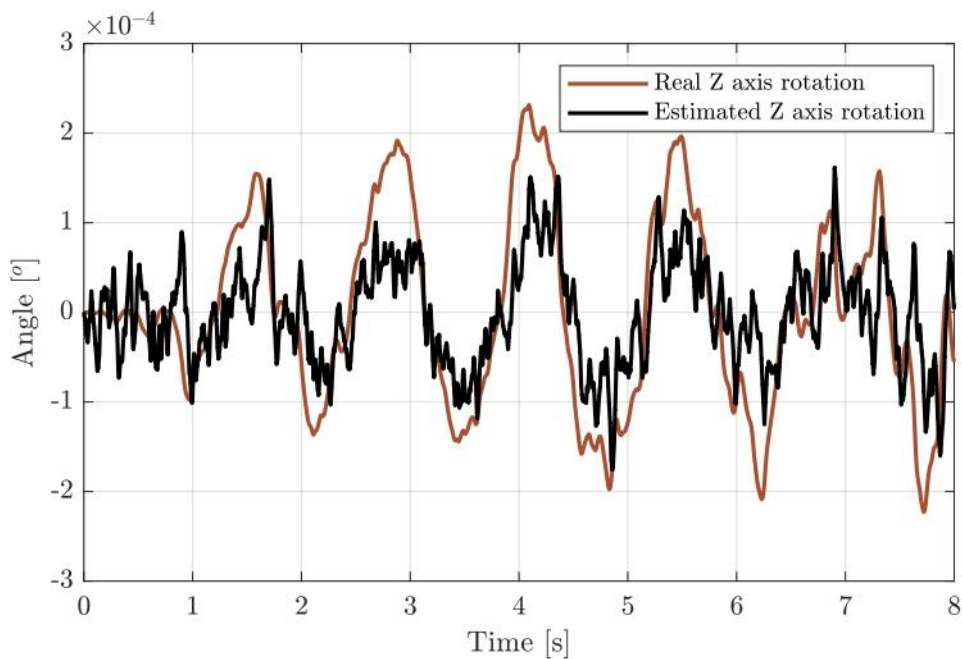


Figura 72. Estimación rotación en Z (guiñada)

En las comparativas se puede apreciar como existen señales de más calidad que otras. Las comparativas de la posición en Z y rotación en Y presentan una señal mucho más suave, esto es debido a que existe una redundancia en la capacidad de obtener los valores. Esta redundancia se da para todas las variables, pero en el caso de las dos comentadas se cuenta con más valores para obtener la media y por lo tanto el resultado final se ve menos afectado por el ruido. Así mismo en esas imágenes se puede ver como

se produce una muy buena estimación de las variables, aunque presentan un cierto retraso que se debe a la acción del filtrado.

Las variables de la posición en Y y especialmente la rotación en X y en Z se muestran más ruidosas y presentan un seguimiento peor por las razones ya expuestas siendo esto especialmente agudo para el caso de la posición en Z. Por lo que se tratara de mejorar la estimación de estas señales para el modelo final mediante un mejor filtrado.

4.2.2.2. Modelo lineal

El modelo lineal que se plantea para Auran es muy similar al que se presentó para la bancada de levitación ya que su principal objetivo es el de servir como base para la linealización del sistema y por lo tanto obtener las matrices A, B, C y D que describen el comportamiento del sistema. Cabe mencionar que puesto que el control se realiza sobre la posición y orientación y puesto que se necesita relacionar estos elementos entre si esto fuerza a que las posiciones han de ser tomadas como las del centro de gravedad.

El modelo al igual que pasaba para la bancada de levitación tomará como entradas la corriente en las unidades y dará como salida posición y rotación. Obteniéndose internamente la fuerza ejercida por las unidades a partir de esa corriente y del air gap al que se encuentra cada una que al igual que para el modelo lineal en este caso ha de calcularse a partir de la posición. Otra diferencia respecto al de la bancada es que puesto que ahora consideramos más grados de libertad incluyendo las rotaciones deberemos computar también los momentos, de nuevo esto se hará igual que para el modelo lineal a partir de las fuerzas conociendo su punto de aplicación y las características geométricas del vehículo. En la Figura 73 se muestra el bloque de simulink total que se usara para linealizar mediante el comando linmod y que tiene como entradas las diez corrientes para cada unidad y como salidas dos posiciones y tres rotaciones, así como sus derivadas.

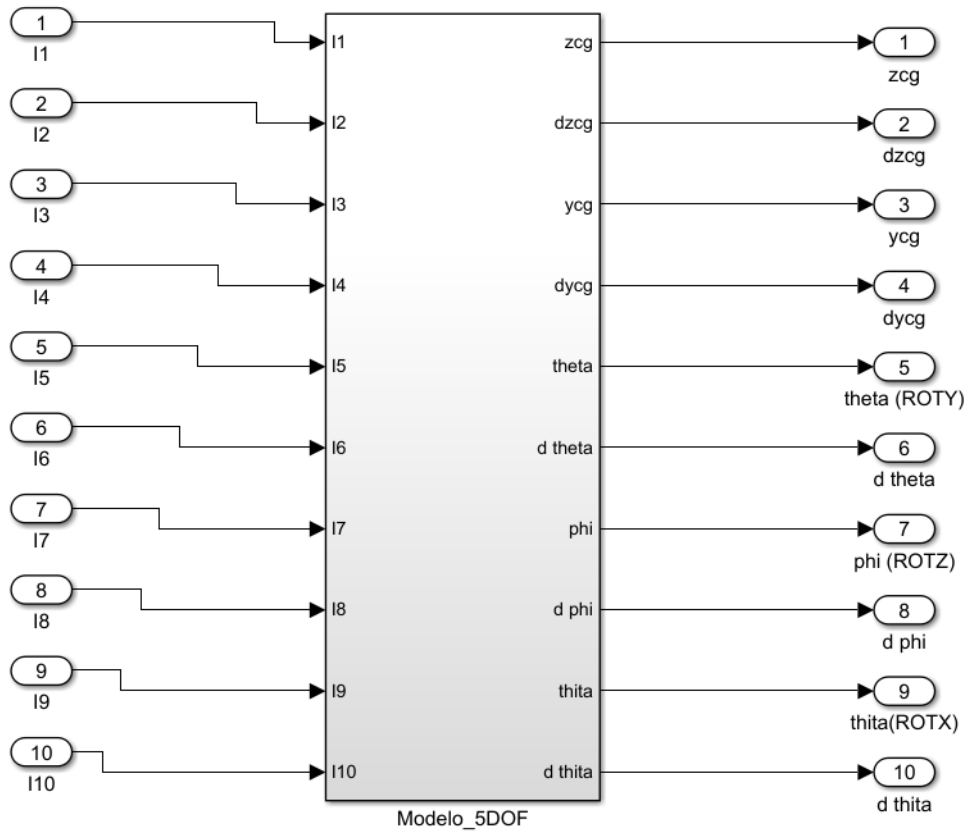


Figura 73. Modelo lineal Auran

Dentro de este bloque distinguiremos varias zonas la primera será la de obtención de las fuerzas y momentos en esta tendremos una estructura como la mostrada en la Figura 54 para cada unidad con unos inputs de corriente que vendrán como variables y unos air gaps que se calcularán internamente, además se tendrá en cuenta la interacción de todas las fuerzas y sus puntos de aplicación para el cálculo de las fuerzas y momentos resultantes como se puede ver en la Figura 74.

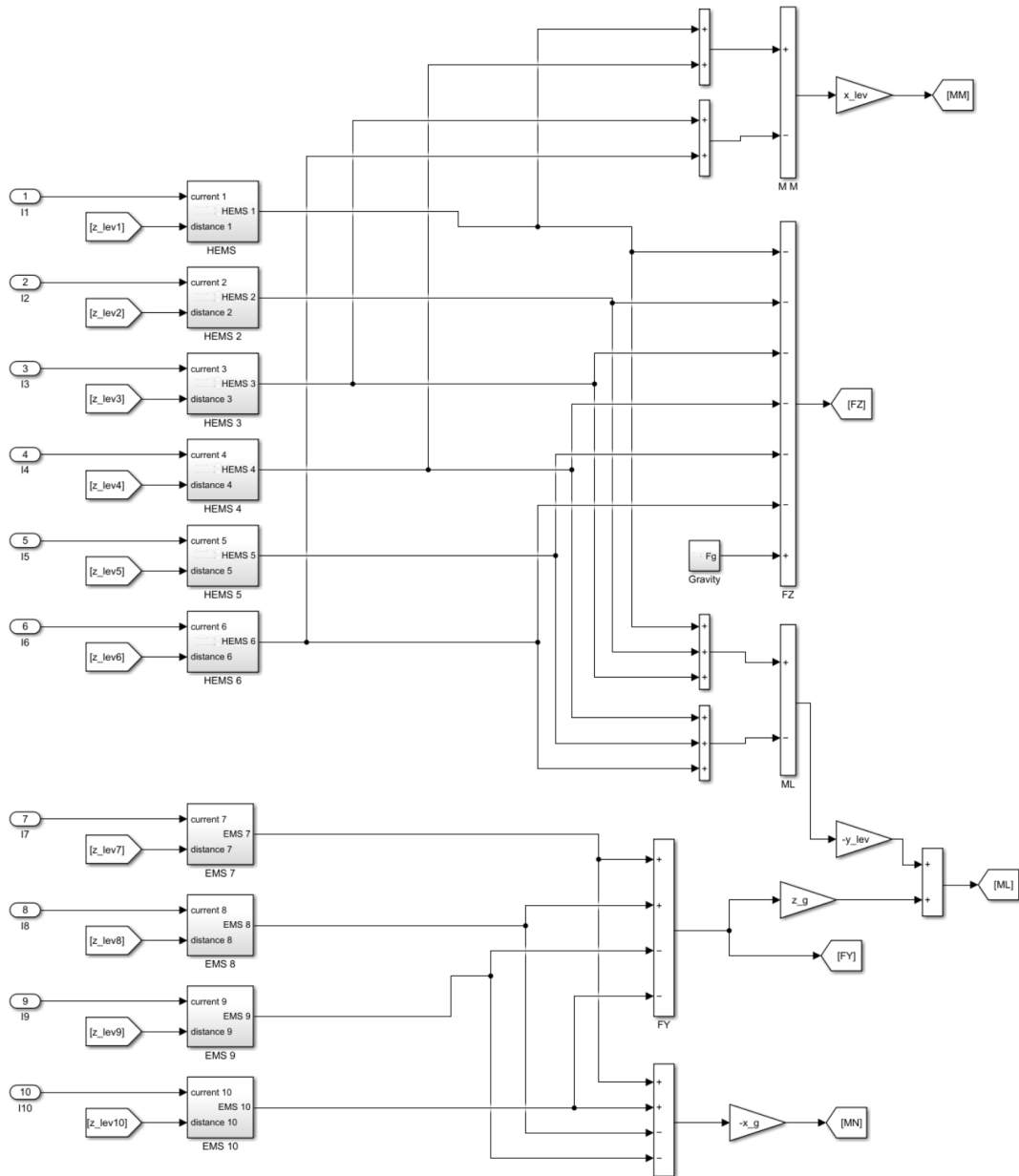


Figura 74. Obtención fuerzas y momentos modelo lineal

Al ser el propósito de este modelo el de linealizar para obtener el control de las unidades de levitación y guiado no se incluirán ninguna fuerza extra tratándose estas como perturbaciones desde el punto de vista del control.

El siguiente elemento es una vez computado las fuerzas y momentos es la obtención de las posiciones y rotaciones, esto se hace a partir de las fuerzas obteniendo la aceleración e integrando y de aquí se obtendrán las salidas del sistema. Teniendo en cuenta la geometría del vehículo y por simplicidad se considera que los productos cruzados de inercia son cero. El esquema de esta parte se puede ver en la Figura 75.

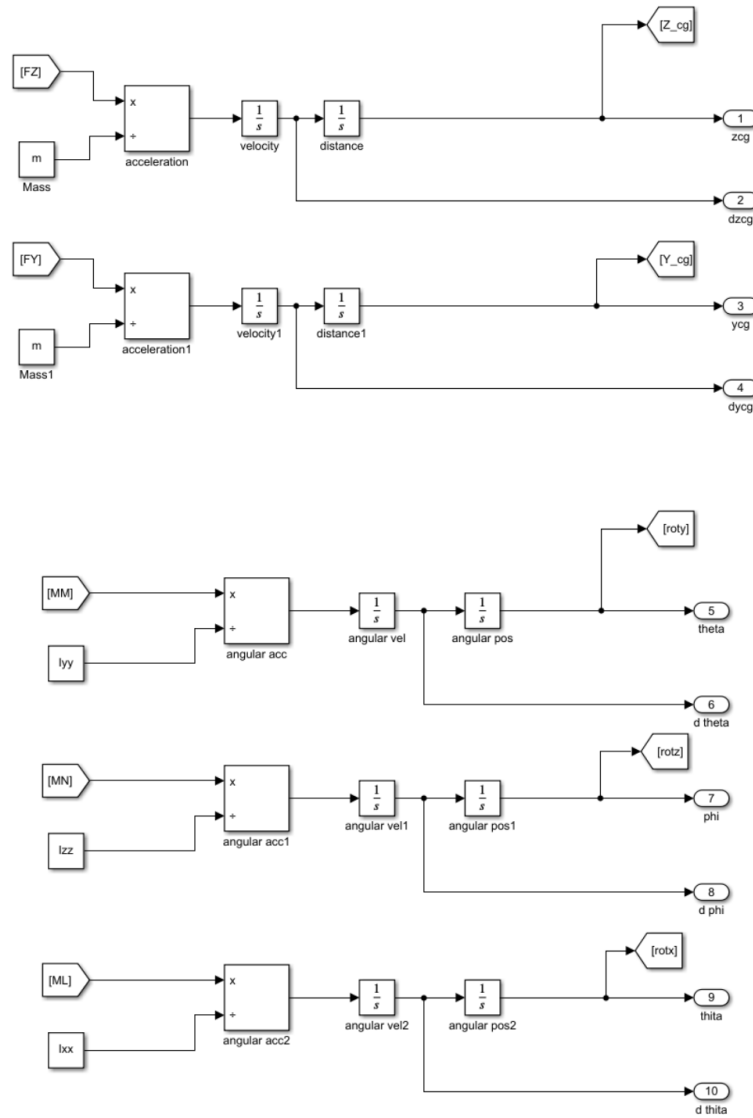


Figura 75. Obtención posición y rotaciones y sus derivadas modelo lineal

Por último, al igual que pasaba en el modelo lineal para el computo de las fuerzas de cada unidad necesitaremos su air gap mientras que las salidas del sistema se obtienen respecto al centro de gravedad por lo que se debe realizar una transformación de estas a su air gap correspondiente a fin de que el cálculo sea correcto esto se implementa mediante una estructura de bloques de simulink que es la que se presenta en la Figura 76.

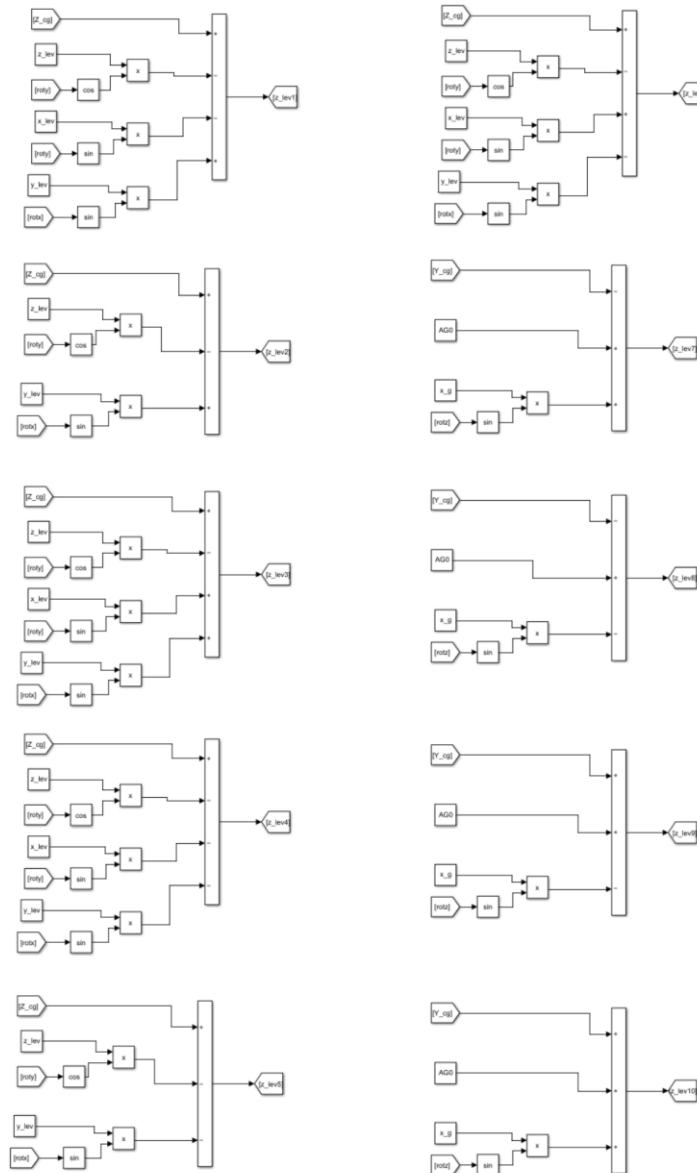


Figura 76. Obtención air gap modelo lineal

Con todos estos elementos se conforma el modelo a partir del cual linealizar para obtener el modelo en espacio de estados que se necesita para realizar el control. Este modelo se comprueba comparándolo con el lineal a fin de observar que su comportamiento se asemeja. Siendo este igual en la parte dinámica y solo variando en las fuerzas calculadas debido al uso de polinomios sencillos y con sentido físico empleados en este modelo.

4.3. Identificación del sistema

Ya se ha mencionado la importancia de los modelos para el sistema de control que se planea [21], inicialmente se realizan los modelos tomando como información datos de simulaciones ya que permiten definir la estructura y realizar simulaciones antes de tener el sistema físico y final y por lo tanto permiten adelantar ciertas carencias y corregirlas. Sin embargo, una vez el sistema final está diseñado y construido se debe realizar una identificación del sistema a fin de actualizar los datos del modelo y que este sea lo más parecido a la realidad posible de forma que las simulaciones que se realicen sean de calidad y permitan determinar con la mayor precisión cómo funciona el sistema de control y realizar una primera aproximación a su ajuste.

La primera caracterización que se realiza una vez llega tanto las unidades de levitación como de guiado es el cálculo de la resistencia de las bobinas, esto se realiza aplicando una tensión conocida y midiendo la corriente que aparece para distintos rangos de voltajes, las tablas con todas las medidas pueden encontrarse en los documentos adjuntos a este trabajo, a continuación, en la Tabla 9 se presentan los resultados finales.

Tabla 7. Resistencias unidades

Numero unidad	Tipo	Resistencia [Ω]
1	EMS	0,224
2	HEMS	0,316
3	HEMS	0,315
4	HEMS	0,310
5	HEMS	0,311
6	HEMS	0,320
7	HEMS	0,309
8	HEMS	0,314
9	HEMS	0,324
10	EMS	0,234
11	EMS	0,224
12	EMS	0,229
13	EMS	0,226
14	EMS	0,225
Tipo de Unidad		Resistencia media [Ω]
HEMS		0,315
EMS		0,227

4.3.1. Unidades de levitación (HEMS)

El primer sistema que se caracterizara y uno de los más importantes son las unidades de levitación ya que componen la base de todo el sistema de levitación. Dentro de las mismas se pretende realizar una caracterización de dos características principalmente la fuerza y la inductancia.

4.3.1.1. Caracterización fuerza

Una de las características más importantes para el sistema de control es la relación que existe entre la fuerza realizada por la unidad en función del air gap y la corriente que circula por ella. Para poder caracterizar esta se usará la propia bancada de levitación la cual mediante ciertos ajustes mecánicos se preparará para realizar el ensayo quedando como se puede ver en la Figura 77.

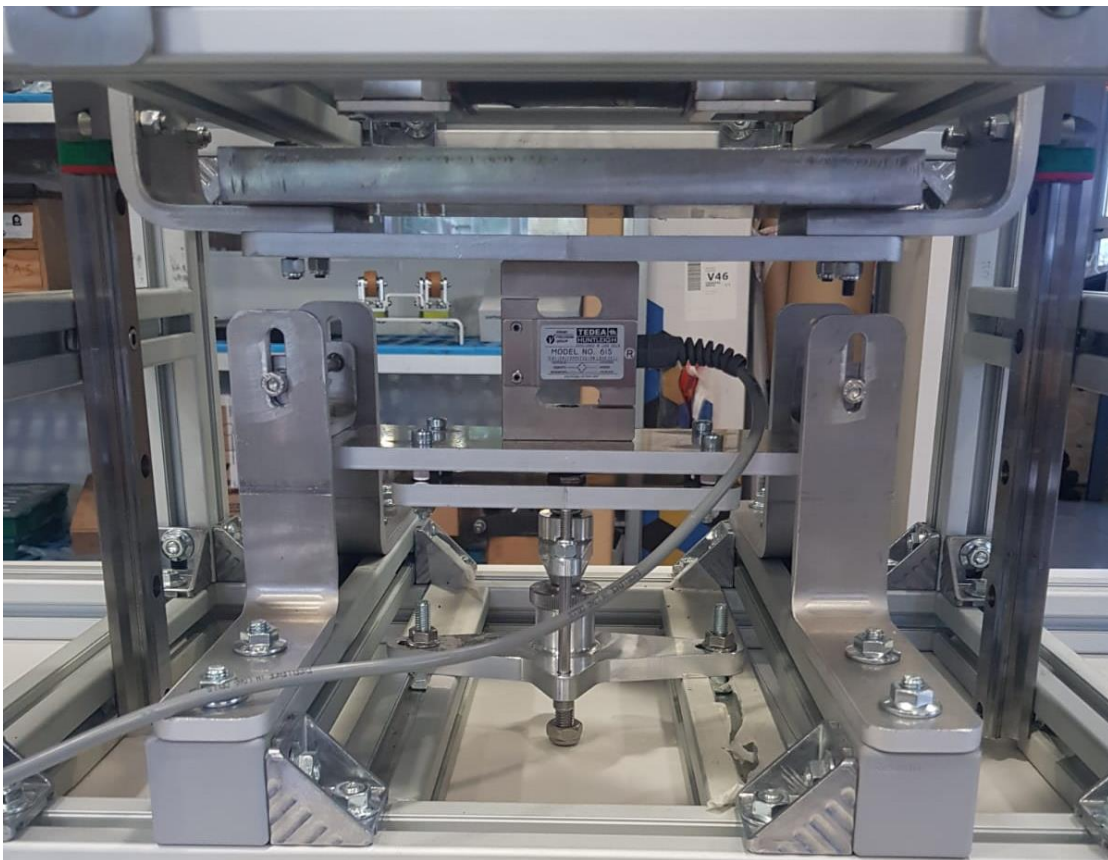


Figura 77. Bancada de levitación en modo caracterización

En este modo la unidad, así como el sensor se anclarán y dejarán fijos en la parte superior por el contra se dispondrá de una plancha de acero que simulara las que existen en el tubo la cual se unirá mediante un sistema mecánico y unos patines a la estructura, además para este modo se cuenta con un sistema mecánico adicional que permite fijar el air gap y anclar la plancha en esa posición de forma que se mantenga constante durante el ensayo.

Una vez se ha definido cual es la estructura se ha de definir como se hará el ensayo. El proceso para obtener la fuerza será mediante una célula de carga que estará unida entre la plancha de acero que simula el techo y el elemento mecánico que la fija (durante el diseño del mismo se tuvo en cuenta que se necesitaría la célula de carga por lo que está integrada dentro del sistema). Esta célula de carga es una célula comercial la cual será alimentada de forma externa mediante una fuente de alimentación que suministrara una tensión fija y la salida de la misma será leída por un ADC de 24 bits para que posteriormente de haber realizado la calibración devuelva la fuerza en newtons. Durante el ensayo se realizará un barrido de las corrientes desde -40 a 40 A a diferentes air gaps fijos realizándose así un mapeado. La corriente en la bobina será suministrada por otra fuente de alimentación para aumentar la precisión del ensayo.

El barrido que se realizará será variando el air gap un milímetro en cada ensayo desde los 22 a los 14 mm y con unas variaciones de corriente de 2 A desde 40 a 20 A y de 5 A a continuación. Este barrido se realiza varias veces para cada unidad y para distintas unidades a fin de obtener unos valores promedios que sean significativos y que se vean lo menos afectados posible por factores de temperatura, histéresis, ruidos, factores humanos, etc.

Cabe destacar que la diferenciación de saltos de corriente se realiza porque durante ensayos previos a la caracterización final se vio como a corrientes bajas la influencia del electroimán sobre la fuerza total era mucho menor que la del imán permanente y se vio también como para esta zona los resultados se aproximaban mucho a las simulaciones mientras que para mayores corrientes donde el electroimán toma más peso y se llega a la saturación del acero existían mayores diferencias por lo que se decidió hacer un mapeado más fino para esta zona.

En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de caracterización de un HEMS a 18 mm de air gap. No se presentan a continuación todos los ensayos realizados debido a la gran cantidad de espacio requerido y los datos procesados, pero si se puede consultar en los datos adjuntos al trabajo.

Tabla 8. Caracterización fuerza HEMS 8 air gap 18 mm

Corriente [A]	Fuerza [N]	Fuerza [Kg]
-40	79,269	8,08
-38	80,061	8,161
-36	81,841	8,343
-34	83,919	8,554
-32	85,996	8,766
-30	89,755	9,149
-28	93,415	9,522
-26	99,846	10,178
-24	103,456	10,546
-22	108,805	11,091
-20	114,289	11,650
-15	131,205	13,375
-10	149,201	15,209
-5	178,293	18,175
0	206,193	21,019
5	233,499	23,802
10	253,779	25,869
15	268,617	27,382
20	278,907	28,431
22	281,207	28,665
24	284,139	28,961
26	286,347	29,165
28	288,504	29,409
30	289,986	29,560
32	291,470	29,711
34	293,150	29,883
36	295,031	30,075
38	297,010	30,276
40	298,789	30,458

En esta tabla se puede ver lo que corresponde con un único ensayo para una única unidad sin embargo el total de los datos es demasiado amplio como para mostrarlo independientemente por lo que a partir de los ensayos se obtienen valores medios que se toman como los valores finales de la identificación de la fuerza de los HEMS.

A continuación, en la Figura 78 se muestra una comparación de estos resultados con las simulaciones que se realizaron

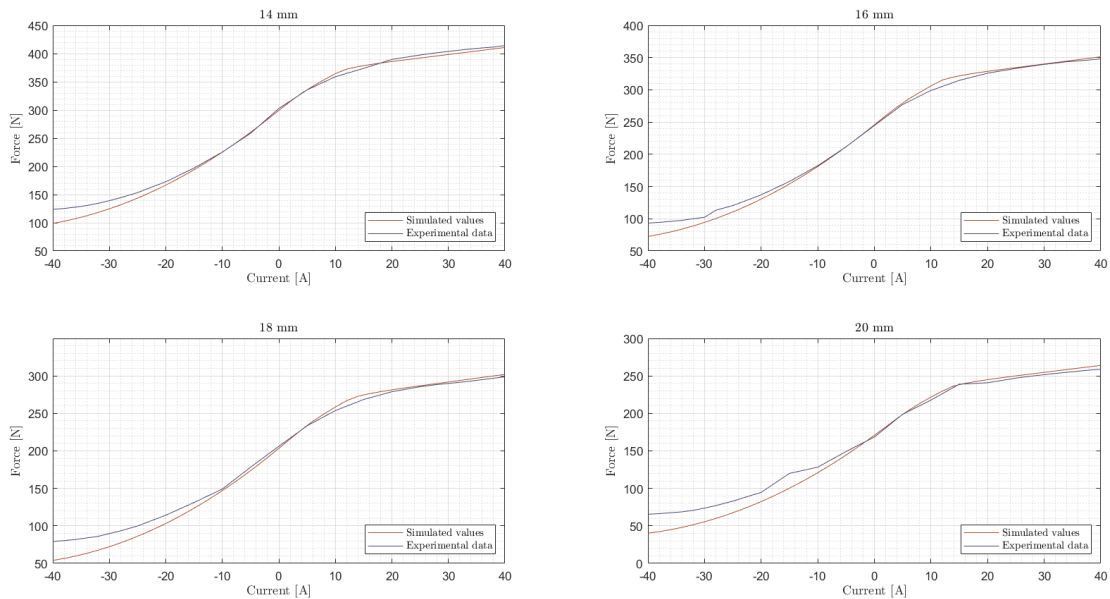


Figura 78. Comparativa experimentos vs simulación fuerza HEMS

En las imágenes se puede apreciar como en general las simulaciones concuerdan bastante con los resultados obtenidos, esto puede explicarse debido al alto grado de refinamiento usado en la malla para las simulaciones. Aun así, se puede apreciar como en la zona de corrientes más bajas donde predomina el imán permanente el ajuste es muy bueno en todos los casos. En la zona de corrientes positivas altas comienzan a aparecer algunas diferencias mayores, pero dentro de unos márgenes aceptables. En la zona de corriente negativa sin embargo sí que aparecen más diferencias que se apreciaron a lo largo del ensayo estas diferencias en esta zona podrían ser debidas al hecho de que para esta situación la bobina trata de crear un flujo magnético que se opone a uno ya existente por lo que puede que existiese algún fenómeno que no se contemplase durante las simulaciones.

Una vez obtenidos los datos se procede a realizar un nuevo modelo que será el final que se use para los modelos. En este caso a diferencia de cuando se hacía a partir de las simulaciones al estar los datos sujetos a variaciones propias del proceso experimental no se pueden considerar como datos de alta precisión por lo que forzar un ajuste polinómico no se considera una buena opción, en su lugar se opta por realizar una regresión para ajustarse a estos nuevos puntos lo mejor posible. El resultado de esta regresión se puede ver en la Figura 79.

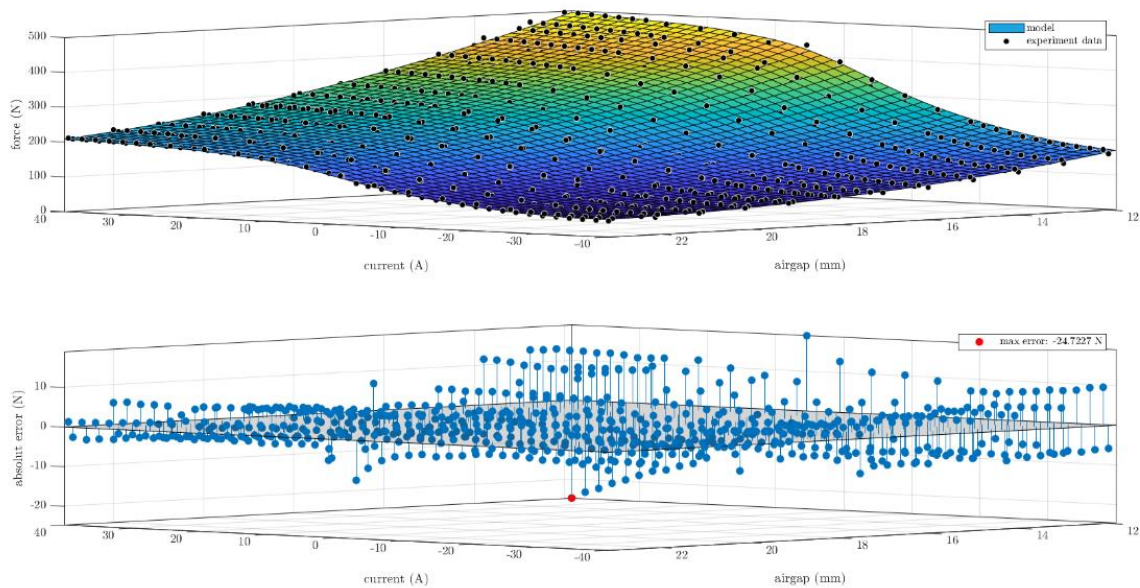


Figura 79. Modelo final basado en datos experimentales

En la figura se puede ver en la parte superior como a partir de los datos experimentales se obtiene el modelo mediante la regresión, se aprecia como la forma de este es similar a lo que teníamos lo cual concuerda con los resultados encontrados durante los experimentos. En la parte inferior se muestra la diferencia entre el modelo generado y los puntos experimentales obtenidos, se puede ver como al tratarse de una regresión hay puntos que se alejan, sin embargo, estos se encuentran en las zonas de no operación mientras que en las zonas en las que trabajaremos el ajuste tiene menos desviación por lo que se considerara el modelo como valido.

4.3.1.2. Caracterización inductancia

Otra variable importante a caracterizar es la inductancia de la bobina ya que el retraso en la corriente que esta origina podría hacer que el sistema se volviese incontrolable además de ser de valor variable lo cual complica su tratamiento. Por esto cobra importancia su caracterización a pesar de ser un proceso complicado. Para caracterizar este valor después de valorar varios experimentos y de realizar pruebas para comprobar su precisión se llegó a la conclusión de que la mejor forma de obtener este valor seria a través del tiempo de establecimiento que nos da para una tensión aplicada y una resistencia conocida la inductancia en función del tiempo que se tarde en alcanzar ciertos porcentajes del valor final.

Para esto se dispone de la bancada en el mismo modo que para la fuerza, pero esta vez se obtendrá la forma de la corriente al aplicar cambios en escalón a la tensión mediante un osciloscopio de forma que se pueda muestrear la señal con la suficiente frecuencia como para que la medida sea precisa. En la Figura 80 se muestra una imagen de esta corriente realizada para un ensayo.

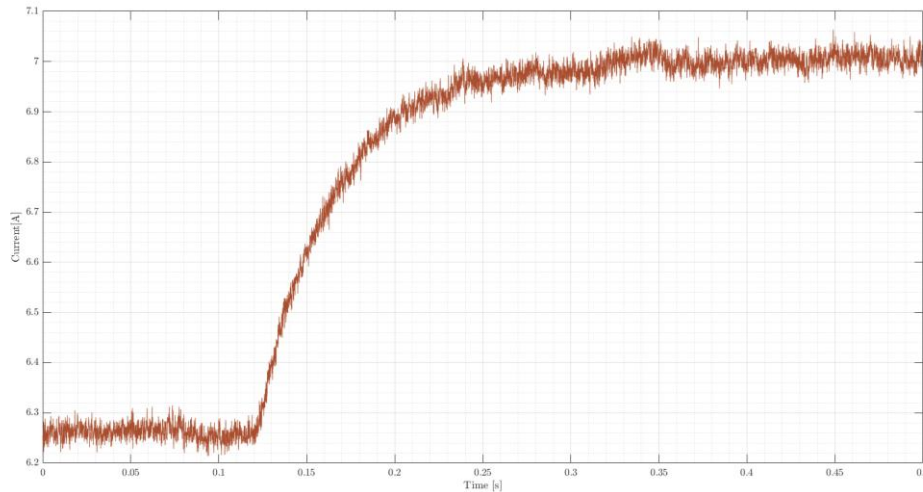


Figura 80. Forma de la corriente ante cambio escalón de la tensión

Como se puede apreciar la señal se ha muestreado a una frecuencia suficiente como para detectar de forma correcta el incremento de la corriente, pero tiene demasiado ruido por ello se le aplica un filtro de Bessel para eliminar parte de este ruido y dejar una señal más limpia como las que se presentan en la Figura 81.

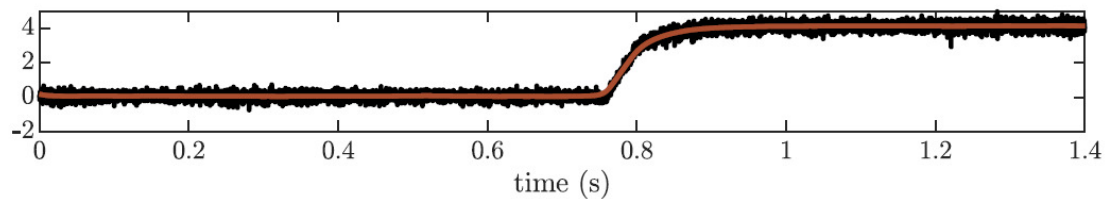


Figura 81. Forma de la corriente después de aplicar filtrado

Con esta señal si es posible aplicar el método previamente descrito. Al igual que se hizo para la caracterización de la fuerza el ensayo se hará manteniendo un air gap fijo y en este caso introduciendo variaciones constantes de tensión de 1 V y de nuevo esto se hará para varias unidades y se obtendrá unos valores promedios que se compararan con las simulaciones.

El resultado para un air gap de 18 mm se muestra en la Figura 82.

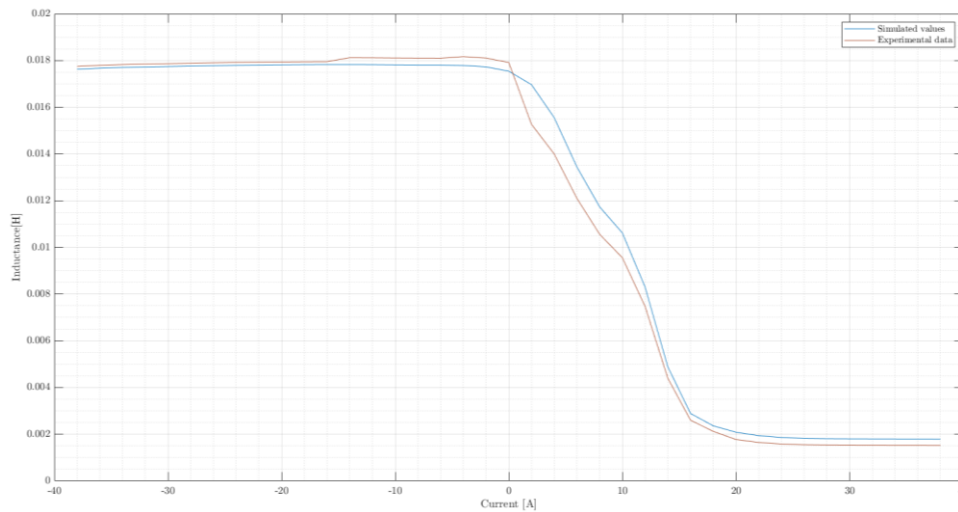


Figura 82. Comparativa experimentos vs simulación inductancia HEMS

A partir de la comparativa obtenida entre los datos experimentales y las simulaciones se aprecia cómo no existe una diferencia significativa entre los valores de inductancia, especialmente teniendo en cuenta que la precisión del método empleado es limitada. Ante esta limitación y los resultados obtenidos se decide que por simplicidad y robustez (la incertidumbre de los datos experimentales y su variabilidad no compensan la diferencia real que hay) se continuara usando el modelo obtenido en las simulaciones tomándolo como real. Cabe destacar que estas simulaciones son de tipo transien y que se realizó un mallado muy fino a fin de obtener los resultados más precisos posibles, esto podría explicar el hecho de que las diferencias no sean significativas respecto los datos reales.

4.3.2. Unidades de guiado (EMS)

Al igual que se hizo para las unidades de levitación se debe llevar a cabo una identificación para las unidades de guiado, durante este proceso se tratará de obtener los mismos datos. La mayor diferencia que existe entre este sistema y las unidades de levitación es que en este caso el rango de air gap será menor y solo se consideraran corrientes positivas (una corriente negativa produciría el mismo efecto puesto que no hay flujo de forma permanente).

4.3.2.1. Caracterización fuerza

Para la caracterización de la fuerza en las unidades el proceso que se seguirá será el mismo, manteniéndose la misma configuración de la bancada de levitación, pero variándose los anclajes de la unidad para que se adapten a la geometría propia de los EMS. De nuevo habrá una plancha de acero que simulará la plancha lateral y el air gap a la que se encuentra se fijará mediante un sistema mecánico ya descrito en la sección de los HEMS.

El proceso de caracterización será también similar al ya visto con el que se usará una célula de carga para medir la fuerza, la cual será alimentada mediante una fuente y la salida medida con un ADC. Diferenciándose únicamente en el barrido de datos que se realizará ya que en este caso la variación de air gap será también de un milímetro en un milímetro, pero en este caso se hará desde los 8 a los 12 mm y la variación de corriente se realizará de 0 a 40 A con variaciones de 2 A. Esto se decide así puesto que se vio en las unidades de levitación que las mayores diferencias aparecen cuando más presente está el electroimán, también puesto que el total de datos a barrer es más pequeño se puede hacer un mapeado más fino. Adicionalmente las simulaciones para este tipo de unidad no se realizaron con un mallado tan fino por lo que toma más importancia la identificación experimental del sistema.

Al igual que para el HEMS se presentará un ejemplo de los datos recogidos para una unidad y a un air gap fijo en la Tabla 11. Aunque los ensayos se realizaran varias veces por unidad y para varias unidades obteniéndose finalmente valores medios a fin de reducir errores y desviaciones.

Tabla 9. Caracterización EMS 14 a air gap 10 mm

Corriente [A]	Fuerza [N]	Fuerza [Kg]
0	0	0
2	1,748	0,178
4	5,651	0,576
6	11,199	1,141
8	19,007	1,937
10	29,075	2,963
12	40,992	4,178
14	55,683	5,676
16	71,813	7,32
18	90,408	9,215
20	111,776	11,394
22	135,200	13,781
24	160,883	16,399
26	185,334	18,892
28	213,997	21,814
30	241,633	24,631
32	267,624	27,280
34	288,580	29,416
36	332,887	33,933
38	330,185	33,658
40	345,387	35,207

Esta tabla muestra la información obtenida de un ensayo y para una unidad, para tener una mejor información de la relación entre los datos experimentales y los de las simulaciones se hará la comparativa de los datos experimentales medios para distintos air gaps como se puede ver en la Figura 83.

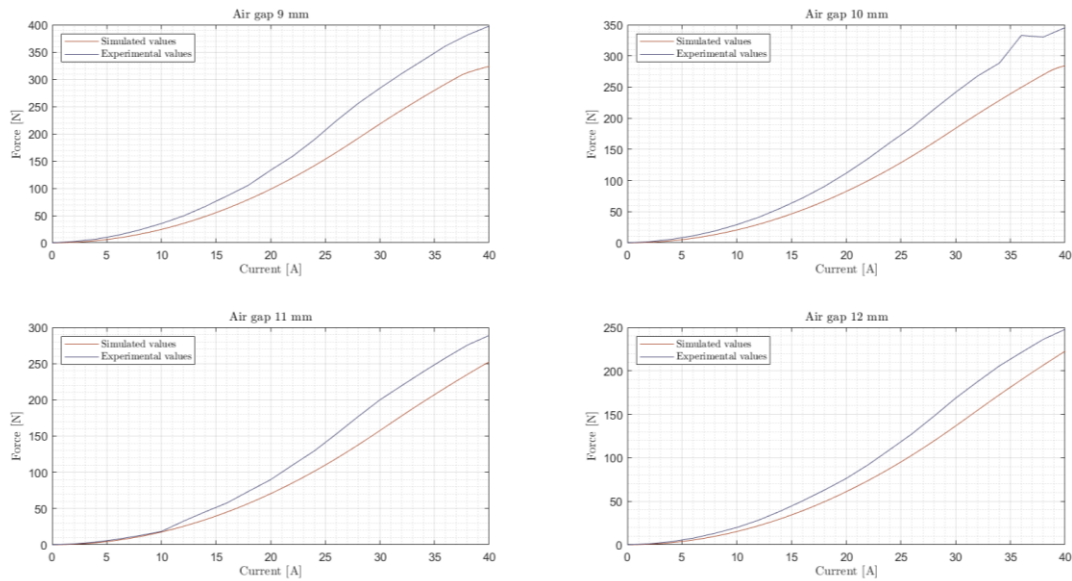


Figura 83. Comparativa fuerza simulación vs experimentos EMS

Se puede ver como a diferencia de lo que ocurría en los HEMS aquí sí que existe una mayor diferencia entre la fuerza simulada y la real, siendo esta diferencia mayor cuanto menos es el air gap y mayor es la corriente, esta desviación se puede deber a varios factores como que el refinado de la malla de estas unidades es menor o que existen más discrepancias en la construcción. En cualquier caso y ante los resultados presentados se toma la decisión de limitar la corriente que circulara por estas unidades de los 40 a 20 A a pesar de que en funcionamiento normal no se debería sobrepasar en ningún caso los 10 A ya que no existen grandes perturbaciones transversales, esto tiene la ventaja añadida de que a menores corrientes existe menor discrepancia entre experimentos y simulaciones.

Una vez se han obtenido estos nuevos datos se procede a su uso para obtener un nuevo modelo que será el que utilice para desarrollar el control final y su validación. Este nuevo modelo debido a que los datos pueden contener imprecisiones se realiza mediante una regresión en vez de un ajuste polinómico por las mismas razones que ya se expusieron para los HEMS. El resultado de este nuevo modelo se muestra en la Figura 84.

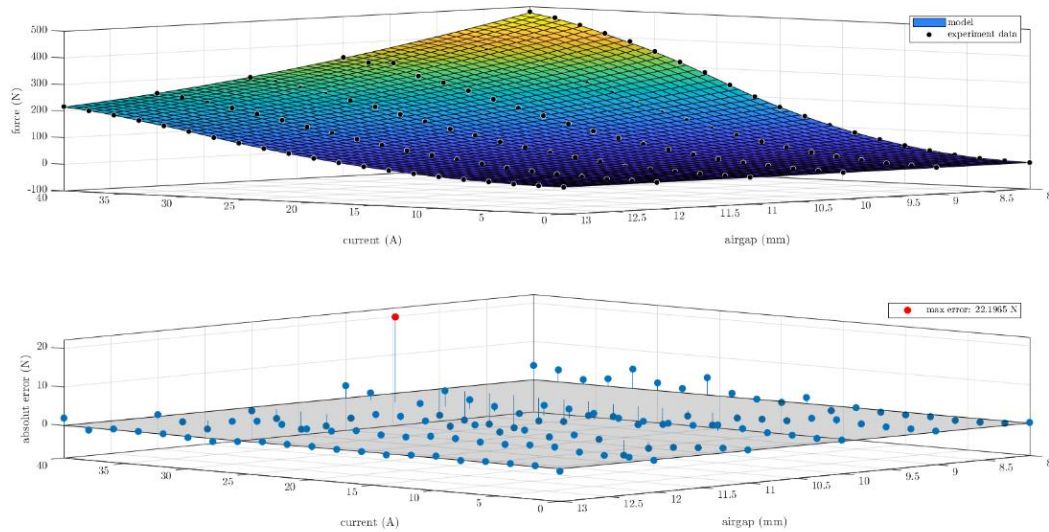


Figura 84. Modelo final fuerza EMS

Al igual que para los HEMS en la parte superior se muestra el nuevo modelo comparándolo con los datos experimentales y se puede apreciar como a pesar de que estos diferían en valor respecto a los experimentos la forma sigue siendo similar.

En la parte inferior se muestra la diferencia en fuerza de cada punto respecto del modelo final, en este caso la dispersión de los puntos es mucho más baja que la que existía en el HEMS a excepción de un punto específico. Por todo esto el modelo se considera como correcto y se usara a partir de ahora tanto en los modelos lineales como no lineales (realizando un ajuste previo como se mostró anteriormente, pero para estos nuevos valores).

4.3.2.2. Caracterización inductancia

De forma análoga a como se hizo en el HEMS se caracterizará la inductancia del EMS, el proceso será igual. Una vez fijada la unidad con el anclaje correspondiente y fijada la plancha a un air gap fijo se introducirán variaciones en escalón de tensión y se observará el tiempo de establecimiento de la corriente y al conocerse la resistencia de la unidad se podrá determinar de forma aproximada la inductancia. También como se comentó debido al ruido presente en la medición se aplicará un filtro de Bessel a fin de obtener una señal más limpia sin afectar en exceso a su comportamiento y que por lo tanto se puedan obtener datos significativos.

Igual que para las fuerzas se realizará este ensayo para varias unidades y con diferentes escalones (no se presenta imagen ya que la forma es idéntica a la de los HEMS) de forma que se obtendrá un valor medio que se asumirá como el global de todas las unidades. Este resultado promediado se comparará con los resultados obtenidos mediante las simulaciones para determinar si se realiza un nuevo modelado y como habría de hacerse este. La comparativa se presenta en la Figura 85.

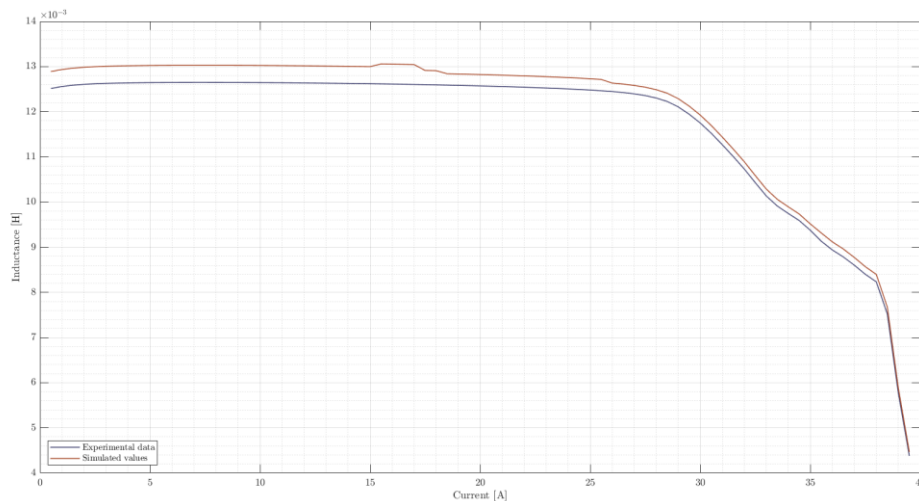


Figura 85. Comparativa inductancia simulada vs real EMS

Aunque se vio como para la fuerza si existía una diferencia entre la simulación y la realidad, para la inductancia no parece ser una diferencia tan significativa esto unido a la incertidumbre del método usado hace que se decida igual que se hizo para el HEMS no modificar el modelo en base a estos nuevos datos y por el contrario mantener el obtenido de las simulaciones tomándolo como correcto.

4.3.3. Sensores

Otro de los elementos a caracterizar serán los sensores que se usan para la obtención de datos, ya que durante la primera fase de diseño se usaron unos valores de ruidos estimados y en base a ellos se diseñaron los filtros correspondientes. Sin embargo, es vital conocer si el ruido que presentan estos sensores es mayor o menor que el que se había considerado para ajustar los filtros y el modelo en consecuencia. Existen dos tipos de sensores que se han de caracterizar los sensores de air gap y los de corriente.

4.3.3.1. Sensor de air gap

El sensor de air gap utilizado para medir la distancia es un sensor laser con un rango de medición entre 40 y 60 mm y una resolución teórica de $0,3 \mu\text{m}$ que se obtiene mediante un ADC de 12 bits y una frecuencia de muestreo máxima de 2 kHz. El sensor es comercial siendo el modelo SICK OD2-N50W10I2 y su apariencia es la que se muestra en la Figura 86. La ficha técnica de este sensor se puede consultar en el ANEXO 3.



Figura 86. Sensor de air gap

Inicialmente dado que ya se había trabajado con estos sensores previamente se asumió que el ruido del mismo incluyendo las etapas de adaptación y la electrónica implicada tendría una desviación estándar de $0,02 \text{ mm}$.

Para caracterizar el ruido de este sensor se preparó un soporte sobre el que se montaría el sensor de forma que quedase fijo en ese soporte, este se situaría en frente de una plancha negra a fin de que la reflexión del láser fuese óptima y a distintas distancias, tomándose muestras a 2 kHz (máxima frecuencia de muestreo) de forma que se tuviesen muchos datos durante un periodo de tiempo suficientemente largo como para tomar el valor estadístico de la desviación estándar. Durante el experimento se tomaron muchas mediciones obteniéndose valores para cada una y sacándose la desviación estándar final como media de estas siendo de $0,001485 \text{ mm}$. La comparativa entre el ruido estimado y el real se puede ver en la Figura 87.

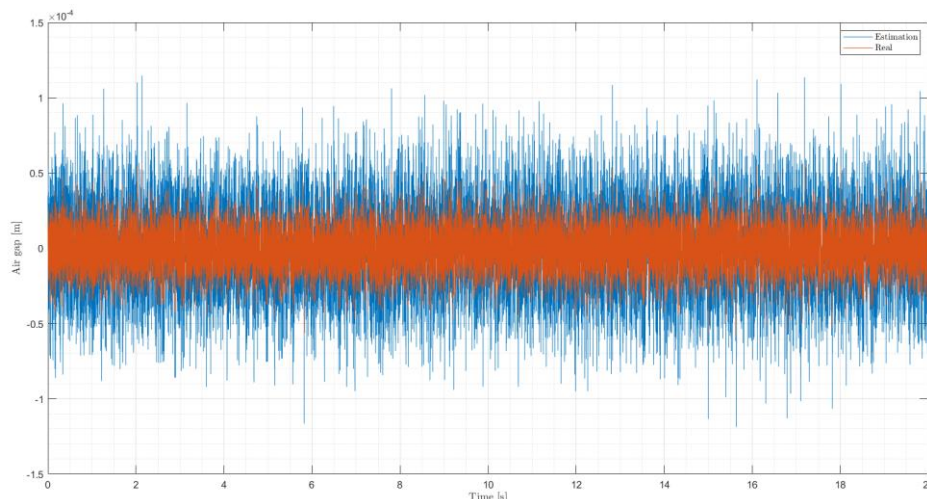


Figura 87. Caracterización ruido sensor air gap

Se observa como el ruido real del sensor es menor (aproximadamente la mitad) del estimado lo cual permite una mayor resolución real (máximo valor que puede distinguirse sin ser afectado por el ruido), siendo esta de aproximadamente de 0.05 – 0.1 mm. En base a esto se actualizo el ruido en los modelos de simulink, así como se realizó un estudio sobre en qué frecuencias se encontraba este ruido a fin de ajustar con más precisión los filtros.

4.3.3.2. Sensor de corriente

El sensor de corriente instalado en las LPU es de tipo shunt, este tipo de sensor se selecciona en lugar de un sensor de efecto hall debido a que el campo magnético podría afectar a la medida, además de que el shunt tiene una mayor precisión y ruido. La lectura de la caída de tensión se realizará mediante un ADC de 12 bits y contará con etapas de adaptación específicas para permitir la lectura de corrientes en ambos sentidos ya que este sensor se emplazará en el interior del puente en H en serie con la bobina.

Dado que de este tipo de sensores no se conocían dentro del equipo la estimación del ruido se realiza en base a valores que se habían obtenido con sensores de efecto hall determinándose que la variación de la medida debido al ruido estaría comprendida entre $\pm 0,4$ A.

Para la caracterización se hace pasar una corriente conocida (se fija mediante una fuente) alimentando mediante el puente en H una serie de resistencias preparadas para disipar potencia mientras se recoge información de este sensor. Una vez obtenidos estos datos para varios sensores y con varias corrientes se obtiene un valor medio de desviación estándar para este sensor de 0.025 A. En la Figura 88 se muestra el resultado de una de estas medidas para caracterizar.

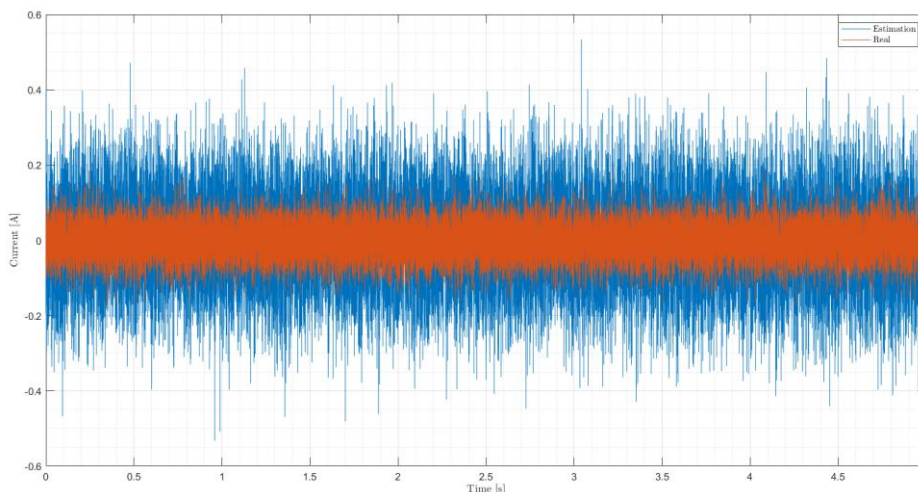


Figura 88. Caracterización sensor de corriente

4.3.4. Ajuste del modelo

Tras realizar la identificación del sistema se procede a la actualización de todos los modelos esta actualización y comparativas con los datos anteriores se ha ido mostrando a lo largo de cada una de las secciones por lo que no se mostrara aquí de nuevo.

Además de los elementos tratados a lo largo de esta sección se actualizan varios modelos más como son los del drag magnético, fuerza del motor, fuerza freno neumático, etc. Todo esto se hace en base a experimentos realizados, estos no se presentan ya que se entiende que esta fuera del marco de este trabajo.

Sin embargo, tras la fase de experimentación e identificación, aunque no se modifique la estructura del modelado hecha hasta ahora ya que se considera que es capaz de reproducir el comportamiento de los sistemas de forma correcta si se actualizan los parámetros de muchos modelos a fin de que se ajusten a los sistemas reales.

Los modelos mostrados basados en los datos finales a su vez tendrán que ser ajustados mediante los polinomios como se ha visto en el apartado de modelado, usándose el mismo proceso que se realizó para los datos de las simulaciones, pero con los datos nuevos, esto únicamente repercutirá en la modificación de constantes para ajustar esos polinomios por lo que no se considera relevante mostrar ese proceso ya que el criterio y resultados finales son muy similares a los ya mostrados.

Este ajuste repercutirá en una necesidad de recalcular gran parte del modelo de control realizado inicialmente basado en simulaciones, sin embargo, se presentará el diseño realizado ya para los modelos finales y las gráficas presentadas serán las realizadas sobre los mismos a pesar de que el diseño se realizase sobre las simulaciones.

4.4. Diseño del sistema

En esta sección se presentará cual ha sido el diseño de la arquitectura de control, incluyendo distintos bucles, tratamiento de variables, mejoras/consideraciones, etc. Esto ha sido presentado levemente en secciones anteriores, pero en este apartado se pretende entrar en profundidad en este tema sin tratar las simulaciones globales realizadas, presentando así el proceso de desarrollo y como se ha diseñado el modelo hasta que se considera correcto [23] [24].

Ya se ha mencionado que existen dos bucles de control en la arquitectura para favorecer la compresión se presentara el diseño de los bucles por separado, entendiéndose que la necesidad de esta separación ya ha sido expuesta a lo largo de las secciones anteriores.

Antes de entrar en la explicación de cada uno y como se ha mostrado antes se presenta el esquema de control con el diseño final en la Figura 89.

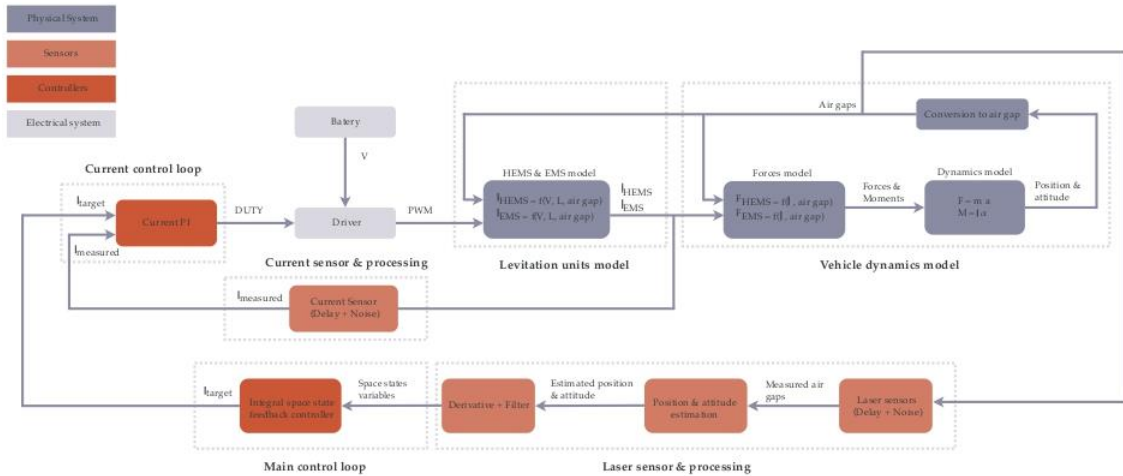


Figura 89. Esquema de control

Dentro de este esquema de control se distinguen varias partes, primero todos los elementos en color azulados componen los sistemas físicos y su tratamiento e inclusión en el esquema se ha plasmado en la sección del modelado. Los elementos en tonos rojizos representan la adquisición de datos y los controladores propiamente dichos y serán los elementos tratados en esta sección. A modo de resumen de lo que se ira presentando en la Tabla 12 se muestran las frecuencias a las que trabajara cada parte de los distintos “bloques” que hay en la imagen.

Tabla 10. Frecuencias de elementos del control

Nombre “bloque”	Frecuencia ejecución [Hz]
Laser sensor & processing	2000
Main control loop	1000
Current sensor & processing	5000
Current control loop	5000

En esta sección se tratará el diseño teórico, así como las decisiones adoptadas hecho sobre los sistemas ya caracterizados a partir de la información real, sin embargo, se asume que durante las fases de simulación e implementación se deberán realizar ajustes en los parámetros y distintos elementos, a pesar de ello la estructura se mantendrá tal y como se presenta a lo largo de esta sección.

4.4.1. Control de posición

El objetivo del bucle de control de posición será el de determinar a partir de la información que podemos recopilar del vehículo cual es la corriente necesaria para hacer que el vehículo levite en la posición y orientación deseada. Para esto dentro del bucle se distinguen dos partes la adquisición de datos para su posterior transformación hasta obtener todas las variables de estado necesarias para realizar el control y el propio control que será el encargado de a partir de esas variables determinar la corriente.

A lo largo de la sección se explicará cual fue el planteamiento y desarrollo del mismo en este caso puesto que el diseño esencialmente el mismo para la bancada de levitación como para Auran no se hará distinción entre ambos, aunque sí que se comentaran diferencias que puedan existir.

Toda esta parte del control se realizará en la LCU que será la encargada de realizar los cálculos y enviarlos mediante un bus CAN a las LPUs y mediante otro bus CAN al sistema principal para la visualización de los datos.

4.4.1.1. Adquisición de datos y obtención variables de estado

Como se ha mencionado repetidamente el control propuesto se basará en la posición y orientación global del vehículo, siendo estas variables junto a sus derivadas las que se usaran para el control mediante espacio de estados. A continuación, veremos cómo se realiza el proceso de obtención de las mismas a partir de los datos que se recogen.

Auran recoge la información obtenida por los diez sensores de posición laser que toman medidas de air gap, estas mediciones se realizan con una frecuencia de muestreo de 2 kHz ya que es la máxima permitida por el sensor. Esta medida naturalmente contendrá ruido por lo que a fin de mejorar su calidad se aplicará un filtrado.

El resultado de la señal filtrada después ha de ser procesada para obtener otras señales incluyendo la derivación de esta, el proceso de realización de una derivada se puede ver altamente afectado por el ruido contenido en una señal por lo que el objetivo de este filtro será el de dejar una señal lo menos afectada por este ruido intentando introducir el menor retraso posible en la misma.

Con estos objetivos en mente se decide usar un filtro de Butterworth de segundo orden principalmente por su simplicidad y porque permite una buena atenuación de ruidos de alta frecuencia sin modificar demasiado la señal y sin introducir demasiado retraso. Para determinar la frecuencia de corte se realiza un estudio en frecuencia del ruido del sensor de air gap, como resultado de este estudio se determina que la frecuencia de corte de este filtro será de 100 Hz, quedando por lo tanto la forma del filtro ya discretizado tal y como se muestra en la Ecuación 13.

$$\text{Filtro air gap} = \frac{0,02008 \cdot z^2 + 0,04017 \cdot z + 0,02008}{z^2 - 1,561 \cdot z + 0,6414} \quad (13)$$

Y el resultado de su aplicación comparando señal antes y después del filtrado se puede ver en la imagen 90.

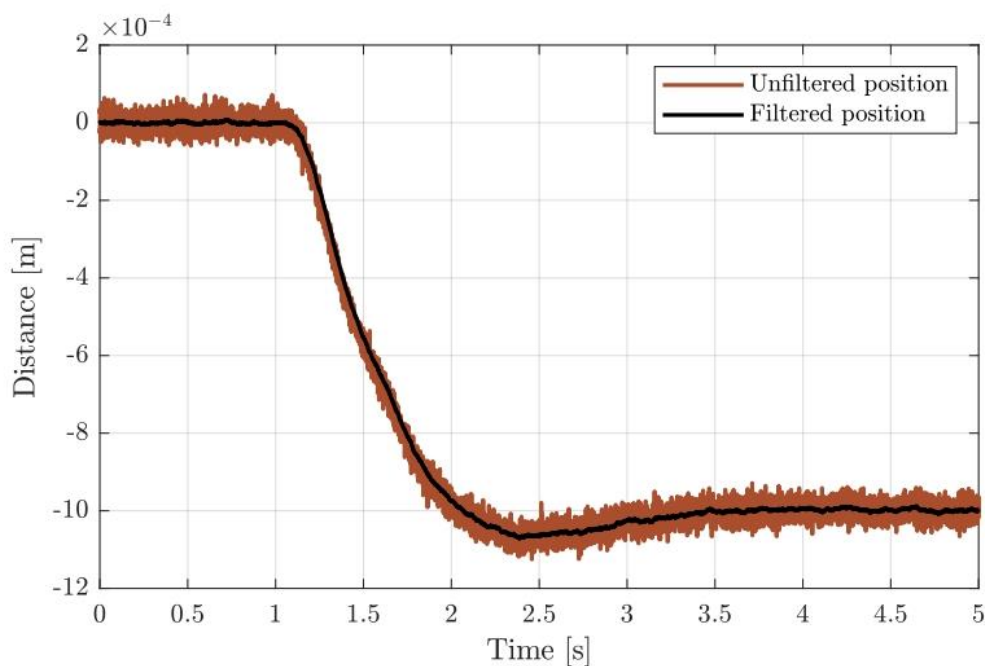


Figura 90. Señal air gap antes y después de ser filtrada

Queda evidenciado como el filtro es capaz de reducir en gran medida la presencia de ruidos de alta frecuencia haciendo que la señal final sea muy estable y limpia además de no introducir un retraso significativo.

Una vez obtenida esta señal podremos trabajar con ella en este punto existirá una diferencia entre el control planteado para la bancada de levitación y el control para Auran esta es que para la bancada de levitación el air gap ya es la variable de posición final y por lo tanto no se necesitan transformaciones adicionales mientras que en el caso de Auran si se deberán transformar los diez air gaps en posiciones y rotaciones. El proceso para hacer esto ya ha sido detallado en la sección de modelado ya que no es un elemento de sistema de control puramente sin embargo las señales obtenidas si lo serán y se debe tener en cuenta su calidad para el sistema. Estas ya se mostraron en la misma sección en las Figuras de la 68 a la 72 por lo que no se repetirán aquí. Esta transformación también se realizará a 2 kHz.

Considerando ahora que ya tenemos las dos posiciones y tres rotaciones (caso del vehículo completo), estas serán las variables sobre las que el modelo de espacio de estados trabajara esta es una de las razones por las que se busca que estas señales sean lo menos ruidosas posibles. La otra es que para el modelo de espacio de estados no necesitaremos solamente esas cinco variables sino sus derivadas (por la propia definición del modelado en espacio de estados).

Esto implica un problema inherente al diseño del vehículo y es que no se cuenta con ningún elemento capaz de realizar una medición de estos parámetros (velocidades lineales y angulares). Por ello, aunque no se trata de una solución óptima la obtención de las derivadas se hará a partir de las señales de posición, esto implica necesariamente el hacer la derivada de dichas señales lo cual al tratarse de señales con ruido es muy problemático por esto el especial hincapié puesto en obtener una señal lo más limpia posible. Además, a fin de reducir aún más el efecto del ruido (a costa de introducir retraso) la obtención de esta derivada que se calculara a 2 kHz de nuevo no se limitara a un solo incremento, sino que tomara varios incrementos y los promediara con el objetivo de reducir el efecto de derivar el ruido. En base a distintas pruebas realizadas se determina que para tener un buen equilibrio entre el retraso y la atenuación del ruido se tomaran cuatro muestras para obtener el resultado final.

Adicionalmente para mejorar la calidad de la señal se ponderará el peso de cada uno de los incrementos usados para obtener el promedio, siempre teniendo en cuenta que la ganancia ha de ser unitaria, incluyendo todos estos elementos la obtención de la derivada se realiza con una formula como la que queda en la Ecuación 14.

$$D = \frac{k_1 (z_t - z_{t-1}) + k_2 \frac{(z_t - z_{t-2})}{2} + k_3 \frac{(z_t - z_{t-3})}{3} + k_4 \frac{(z_t - z_{t-4})}{4}}{dT \cdot 4} \quad (14)$$

Donde k_n será el factor de ponderación, Z_n el valor de la señal en el instante n (siendo n el actual) y dT el periodo. En la Figura 91 se muestra los resultados de obtener la derivada de esta forma con y sin la ponderación comparado con el valor real.

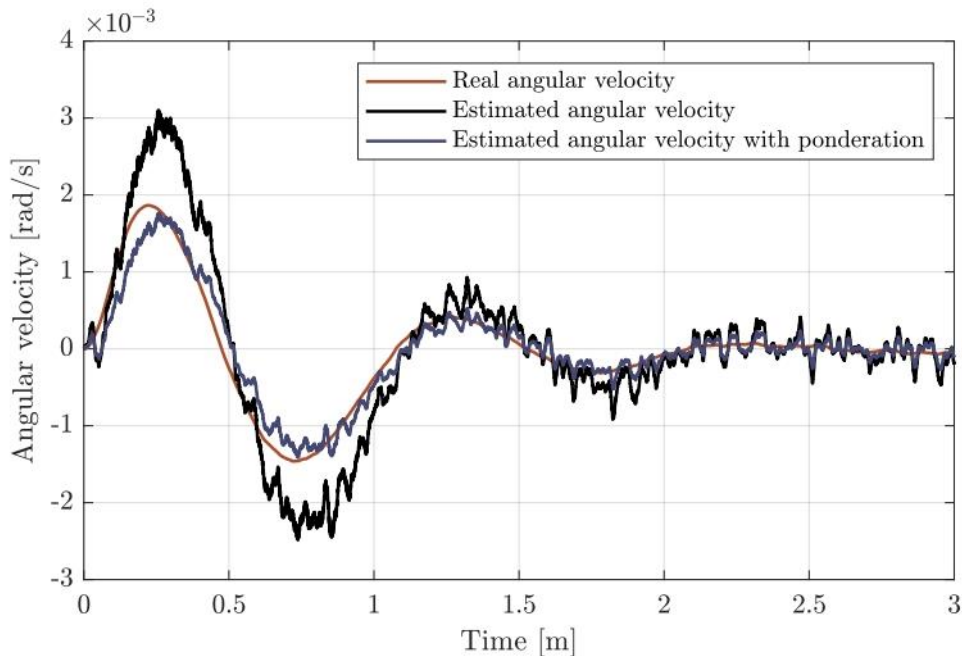


Figura 91. Estimación de la derivada

Se puede apreciar como al introducir la ponderación el valor estimado se asemeja mucho más al real cuando existen variaciones del mismo mientras que cuando está estable la respuesta es muy similar para los dos. También se ve como en ambos casos existe un retraso respecto a la variable real esto es debido al retraso que introduce el filtrado del air gap más el que introduce esta forma de obtener la derivada. A pesar de ello se vio en las simulaciones como el sistema era capaz de estabilizarse por lo que se decidió mantener esta estructura de momento. Planteándose para más adelante que en caso de que el retraso fuese demasiado usar tres valores en lugar de cuatro para obtener la estimación de la derivada a pesar de que esta se viese más afectada por el ruido.

Por último en el apartado de obtención de datos se procederá a hacer un filtrado de las derivadas obtenidas ya que el proceso de derivación ha hecho que estas vuelvan a presentar oscilaciones bruscas, en este caso se usará al igual que para la señal de air gap un filtro paso bajo de Butterworth aunque en este caso el filtro será de primer orden y la frecuencia de corte mayor ya que se quiere evitar introducir un mayor retraso en la señal pero dejarla lo más limpia posible. En la Figura 92 se muestra el resultado de este filtrado.

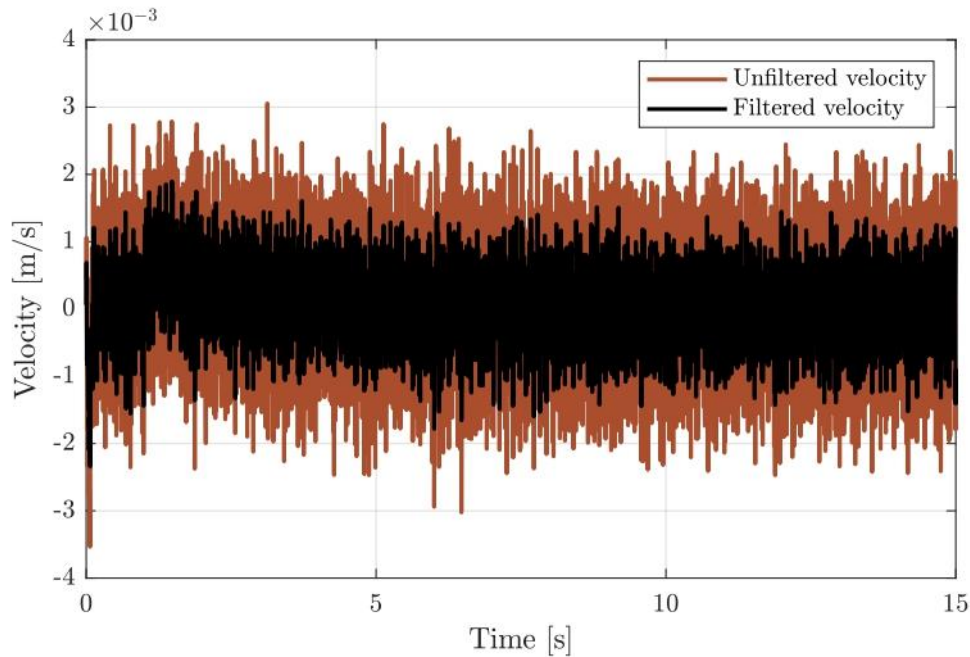


Figura 92. Filtrado de la derivada

A través de todo el proceso aquí presentado se ha llegado a la obtención de las posiciones y orientaciones, así como de sus derivadas, este conjunto de diez variables serán las necesarias para el control por espacio de estados por lo que se ha puesto especial atención en que la calidad de las mismas fuese buena y que no hubiese grandes retrasos a fin de que esto permitiese que el control funcionase correctamente y fuese robusto.

4.4.1.2. Control por espacio de estados

Las variables de estado sobre las que trataba la anterior sección son definidas por el modelo en espacio de estados, esto implica que, aunque se esté presentado esta sección más tarde por concordancia el modelo se hizo primero y en función de eso se ajustó la adquisición.

Como se explicó el tipo de control que se realizará será un modelo basado en espacio de estados ya que cumplía con las necesidades impuestas para el sistema. Este tipo de control necesita como es natural de un modelo de espacio de estados que mediante los valores numéricos de cuatro matrices denominada A, B, C y D describirán el comportamiento del sistema en función de las entradas y estados actuales en torno a un punto definido.

Estos valores numéricos se obtienen a partir de la linealización en torno a cierto punto de las ecuaciones que modelaran el comportamiento del sistema. Las ecuaciones que se usaran para la obtención de las matrices ya se presentaron en los apartados de los modelos lineales. En lo consecuente se asumirá que la información básica sobre este tipo de sistemas es conocida (los fundamentos pueden ser consultados en [25])

Lo primero que debemos hacer es definir cuáles serán los estados, entradas y salidas del sistema. Teniendo en cuenta que el hecho de que si las salidas coinciden con los estados la matriz C se simplificara bastante. Para nuestro caso definiremos las salidas como las dos posiciones y tres orientaciones y las haremos coincidir con los estados. Esto nos lleva a que deberemos por definición usar también sus derivadas estas son las velocidades lineales y angulares. Así mismo definiremos las entradas como cada una de las corrientes que será necesaria en cada unidad. Quedando las entradas, salidas y estados como se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}
 u &= [I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}] \\
 x &= [z, \dot{z}, y, \dot{y}, \Phi, \dot{\Phi}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}] \\
 v &= [z, y, \Phi, \theta, \varphi]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Donde Φ es la rotación en X, θ la rotación en Y y φ la rotación en Z

Estas variables se escogen teniendo en cuenta la definición del sistema ya que nuestra forma de actuar sobre el serán las corrientes y las variables que queremos controlar la posición y orientación. Por lo tanto, debemos buscar la forma de relacionar estas variables entre sí. Para esto haremos uso de la información obtenida durante el modelado (ecuaciones 5, 6, 7) de forma que obtengamos una relación entre las corrientes y las fuerzas. Y mediante las fuerzas y los respectivos momentos que generan y considerando el vehículo un sólido rígido podemos relacionar la fuerza con la aceleración de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{F}{m} \\
 \gamma &= \frac{M}{I}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Donde a es la aceleración, F la fuerza lineal, m la masa del sistema, γ la aceleración angular, M el momento y I la inercia. Estas ecuaciones se presentan de forma genérica y han de particularizarse para cada variable.

A partir de las aceleraciones lineales y angulares la obtención de la velocidad y posición las cuales son las variables de estado seleccionadas es trivial mediante integración.

Para simplificar la representación en las matrices de estado reorganizaremos la información de los polinomios que describen la fuerza separando las partes dependientes de las corrientes y de las posiciones.

$$\begin{aligned}
 F_{HEMS_z} &= \frac{p_1}{(p_2 + z)^2} + \frac{1}{(k_3 \cdot z - k_2)^2} \\
 F_{HEMS_I} &= k_1 \cdot I \\
 F_{EMS_y} &= \frac{1}{(y + b_2)^2} \\
 F_{EMS_I} &= b_1 \cdot I
 \end{aligned} \tag{17}$$

Con todo lo anterior definido se puede pasar a la definición de las matrices de estados que determinan el comportamiento del sistema. Como se pudo ver en la Tabla 8 la distancia que existe desde los EMS en el eje Z al centro de gravedad es muy pequeña, esto unido a la relativa poca fuerza que han de ejercer hace que se tome la decisión de no considerar el efecto que tienen estas unidades sobre el alabeo, de forma que a fin de separar dinámicas para evitar interferencias que aparecen por soluciones numéricas se diferencian las dinámicas que controlaran las unidades de levitación y guiado y se separaran en dos modelos independientes. Los grados a controlar por cada tipo de unidad serán los siguientes.

- La posición en el eje Z, el alabeo y el cabeceo serán controlados por los HEMS
- La posición en el eje Y y la guiñada serán controlados por los EMS

Con esta distinción se obtendrán los siguientes dos modelos en espacio de estados, considerando que las matrices D serán nulas en ambos casos.

Para simplificar la visualización se hará uso de las expresiones presentadas anteriormente. Además, no se representará el efecto de las distintas unidades (cada una tendrá su propio air gap z o y), ni el distinto efecto que tendrá en el momento es decir para el alabeo se debería considerar la fuerza hecha por cada unidad con su air gap específico y por la distancia a la que se encuentre sin embargo se representará de forma genérica, aunque en el cálculo real de estos parámetros si estará integrado todo esto.

$$\dot{\underline{x}}_{HEMS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{HEMS,z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{HEMS,z} x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{HEMS,z} y \end{pmatrix}$$

$$\dot{\underline{x}}_{EMS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{EMS,y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{EMS,y} x \end{pmatrix}$$

$$u_{HEMS} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{HEMS,l} & F_{HEMS,l} & F_{HEMS,l} & F_{HEMS,l} & F_{HEMS,l} & F_{HEMS,l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{HEMS,l} x_f & F_{HEMS,l} x_c & F_{HEMS,l} x_r & F_{HEMS,l} x_f & F_{HEMS,l} x_c & F_{HEMS,l} x_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{HEMS,l} y & F_{HEMS,l} y & F_{HEMS,l} y & F_{HEMS,l} -y & F_{HEMS,l} -y & F_{HEMS,l} -y \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$u_{EMS} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{EMS,l} & F_{EMS,l} & F_{EMS,l} & F_{EMS,l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{HEMS,l} x_f & F_{HEMS,l} -x_r & F_{HEMS,l} -x_f & F_{HEMS,l} x_r \end{pmatrix}$$

$$v_{HEMS} = \begin{pmatrix} z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta & 0 \end{pmatrix}$$

$$v_{HEMS} = \begin{pmatrix} y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi & 0 \end{pmatrix}$$

Donde x_f será la distancia de las unidades delanteras, x_c la distancia de las unidades centrales y x_r la distancia de las unidades traseras.

Una vez tenemos definidas estas matrices antes de poder realizar el control deberemos linealizarlas para obtener los valores numéricos, esta linealización se hará con el comando `linmod` de MATLAB sobre modelos de simulink que se preparan para este propósito y que se mostraron durante la sección del modelado lineal.

Adicionalmente a esto se comprueba el resultado mediante el software Wolfram Mathematica para asegurar que el resultado sea correcto. Los valores tomados para la linealización son los siguientes

- Posición $z = 0,37725$ mm. Se corresponde con la distancia teórica a la que no es necesario consumir corriente para levitar considerando la distancia de las unidades y la que hay desde las mismas al centro de gravedad (se toma en cuenta la distancia de trabajo real de las unidades)
- Posición $y = 0$ m. Se toma este valor ya que se trabaja con la posición del centro de gravedad y se desea que esta esté centrada (se toma en cuenta en el modelo que la distancia para las unidades es de 10 mm)
- Rotación en $X = 0$ rad. Queremos trabajar en el punto en el que el vehículo no sufra ninguna rotación
- Rotación en $Y = 0$ rad. Queremos trabajar en el punto en el que el vehículo no sufra ninguna rotación
- Rotación en $Z = 0$ rad. Queremos trabajar en el punto en el que el vehículo no sufra ninguna rotación

De la misma forma todas las velocidades serán 0 ya que queremos que el vehículo este completamente estable y quieto en ese punto. Y por último las corrientes también serán 0 dado que para los HEMS buscamos el punto en el que no es necesario consumir corriente para levitar y en los EMS solo deberán activarse ante perturbaciones no en su funcionamiento nominal.

Con todo esto en cuenta y tras aplicar la linealización las matrices quedan de la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 A_{HEMS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 868,184 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -9,3865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 A_{EMS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 B_{HEMS} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,0275 & -0,0275 & -0,0275 & -0,0275 & -0,0275 & -0,0275 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0074 & -0,0001 & -0,0071 & 0,0074 & -0,0001 & -0,0071 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,0023 & -0,0023 & -0,0023 & 0,0023 & 0,0023 & 0,0023 \end{pmatrix} \quad (19) \\
 B_{EMS} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0033 & 0,0033 & 0,0033 & 0,0033 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8,59E-4 & -8,21E-4 & -8,59E-4 & 8,21E-4 \end{pmatrix} \\
 C_{HEMS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
 C_{EMS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Estos valores son los que representan el comportamiento del sistema en el punto de equilibrio en el cual queremos operar y a partir de los cuales se realizara el control.

Antes de proseguir con el diseño del control se debe realizar una comprobación de que el sistema que estamos representando realmente se ajusta a la realidad que asumimos que es el modelo no lineal. Para realizar esta comprobación se debe comparar la variación de las variables en bucle abierto ante la misma entrada del modelo en espacio de estados y del modelo no lineal y verificar que esta es lo suficientemente similar como para dar por bueno el modelo por espacio de estados y proseguir con el proceso de diseño. Estas graficas comparativas se mostrarán en las figuras subsecuentes. La primera figura hará referencia al modelo de la bancada de levitación el cual no se ha explicado previamente ya que el proceso es el mismo que el seguido para el vehículo y por lo tanto se ha considerado más interesante la inclusión de este.

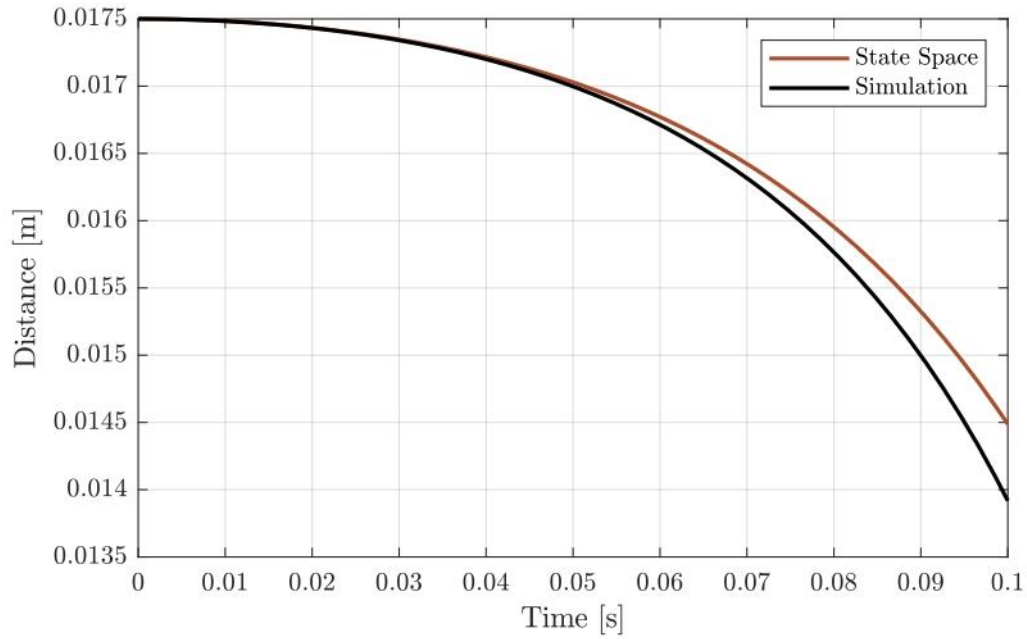


Figura 93. Comparativa posición Z modelo espacio estados y modelo no lineal

Se puede apreciar como al inicio la similitud es muy alta, aunque se va separando según se aleja del punto de linealización en cualquier caso la similitud es suficientemente alta como para darlo por valido.

A continuación, se mostrará el mismo proceso, pero para la posición y rotación del vehículo, para facilitar la comparativa las gráficas se obtienen a partir de distintos inputs.

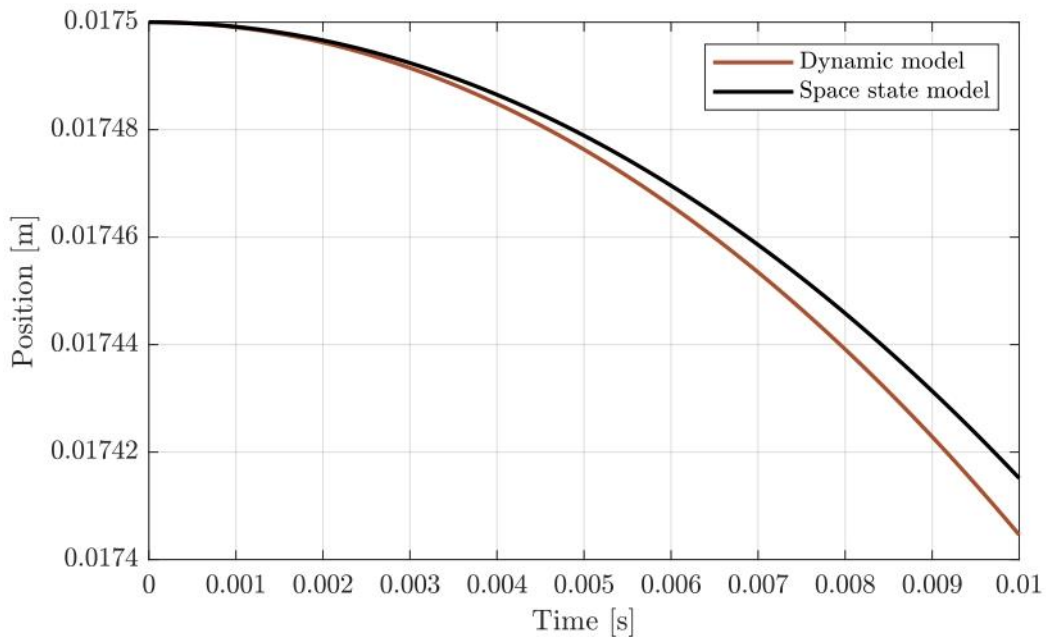


Figura 94. Comparativa posición Z modelo espacio estados y modelo no lineal

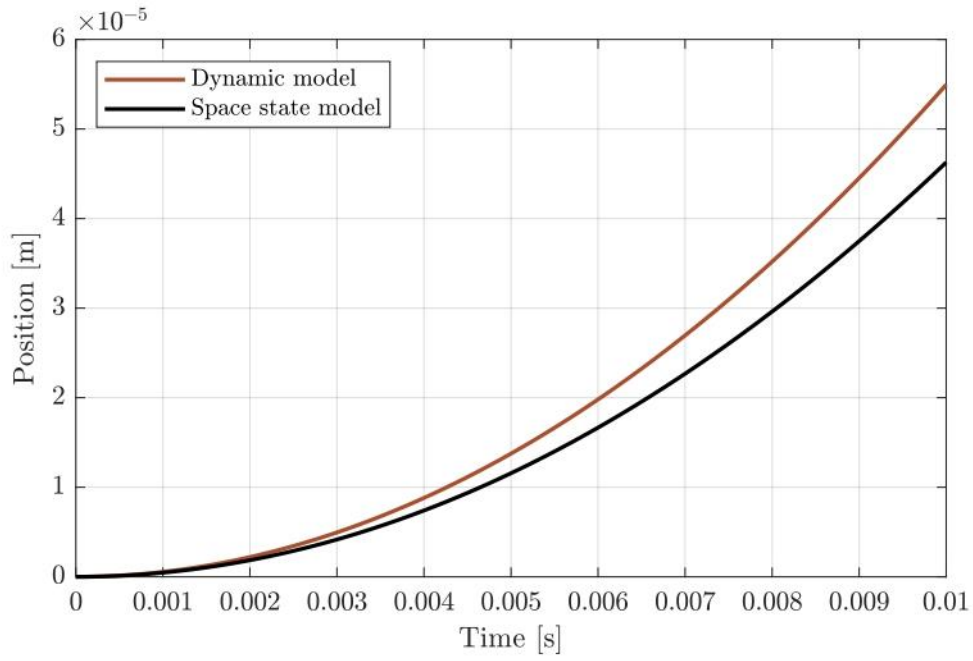


Figura 95. Comparativa posición Y modelo espacio estados y modelo no lineal

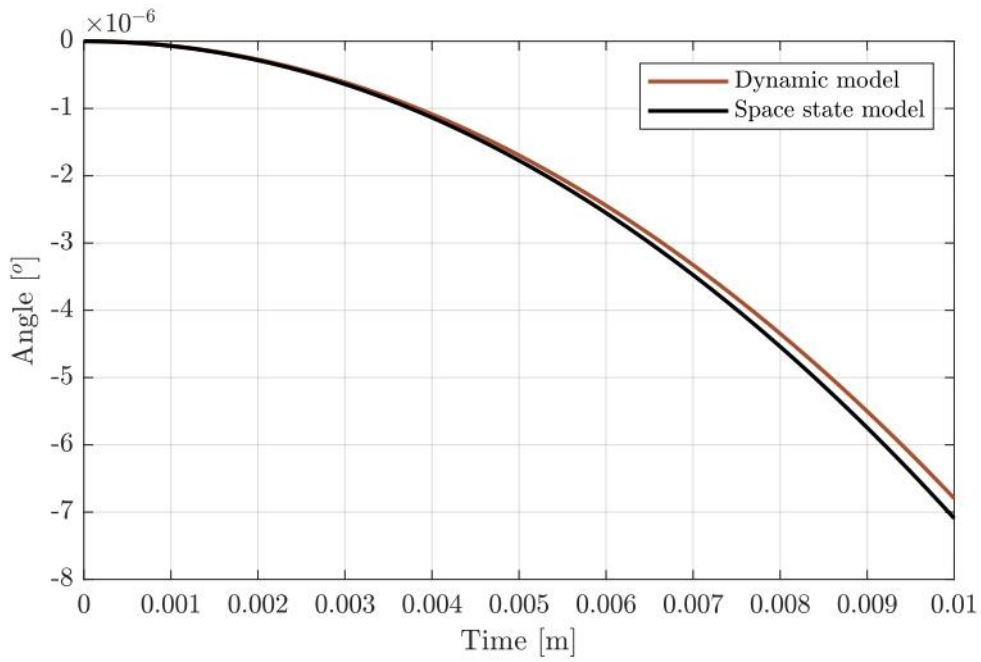


Figura 96. Comparativa rotación X modelo espacio estados y modelo no lineal

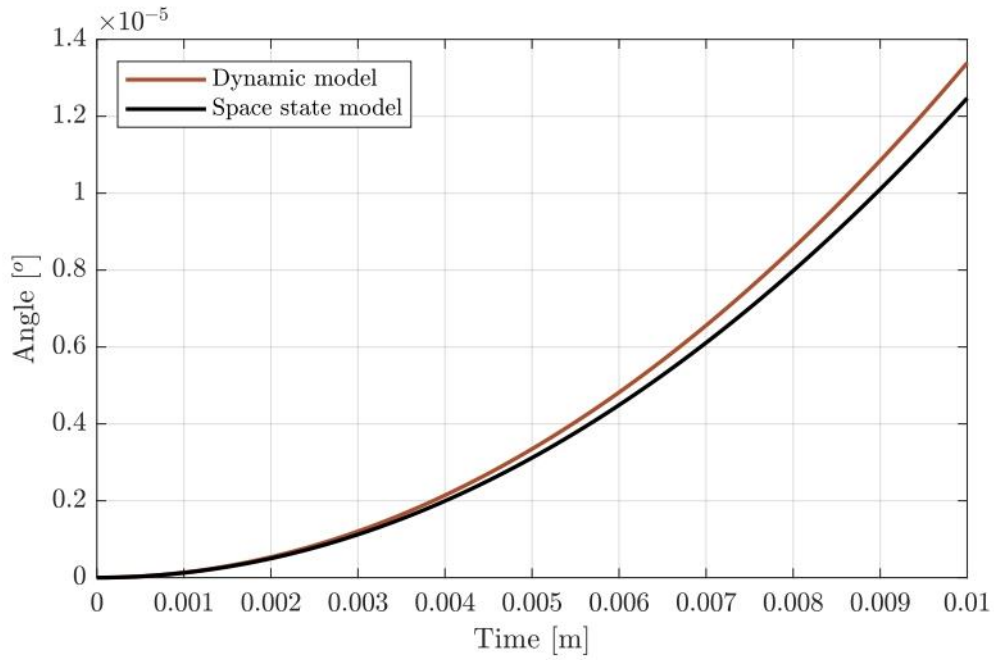


Figura 97. Comparativa rotación Y modelo espacio estados y modelo no lineal

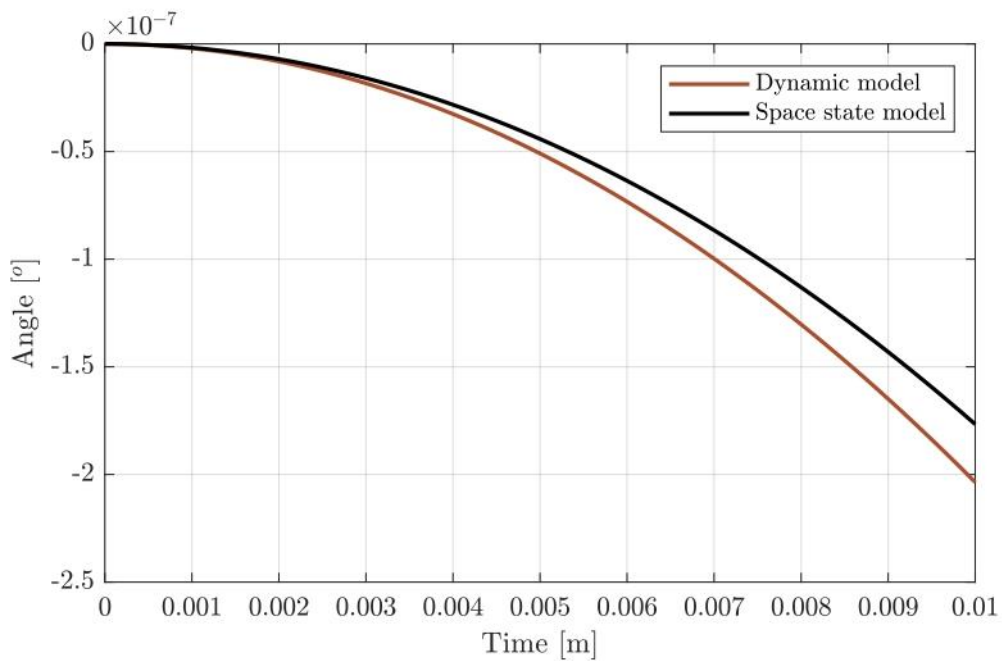


Figura 98. Comparativa rotación Z modelo espacio estados y modelo no lineal

Se aprecia como en este caso existe una mayor diferencia entre la estimación y el modelo no lineal, esto se deberá principalmente a que este sistema es bastante más complejo y mas no lineal por lo que el sistema linealizado deja de asemejarse antes. En cualquier caso, los resultados se consideran lo suficientemente aceptables como para usarse para el control.

El control basado en este modelo se ejecutará a 1 kHz e ira integrado también en la LCU. Este tipo de control se basa en aplicar una serie de ganancias que permitan que el comportamiento del sistema en bucle cerrado se ajuste al diseño esto se consigue mediante la matriz de ganancias K que se integra con las matrices presentadas de la siguiente forma.

$$Polos_{bc} = (A - B \cdot K) \quad (20)$$

Y esta matriz K se relacionará con las salidas del sistema de la siguiente forma

$$u = -K \cdot \underline{x}' \quad (21)$$

Esta expresión nos daría las constantes necesarias para realizar un control por espacio de estados, sin embargo, dado la naturaleza de nuestro sistema es necesario el incluir acción integral para las variables de posición y orientación de forma que podamos modificar su valor y se asegure que en régimen permanente no exista error. Para poder incluir esta acción es necesario “ampliar” las matrices de forma que se incluya un nuevo “estado”, definiendo ese nuevo estado intermedio (de forma general) como

$$\dot{x}_I = v - r \quad (22)$$

Definiéndose r como la referencia que se desea seguir. Una vez se ha definido este nuevo estado la forma que se sigue para realizar la ampliación de las matrices (de nuevo de forma genérica)

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \dot{x}_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ x_I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (23)$$

Y para obtener las constantes del control deberemos ahora considerar en la ecuación 15 las matrices A y B como las ampliadas obtenidas en la ecuación 18 obteniéndose así ganancias adicionales que corresponderán a las acciones integrales.

Una vez tenemos las matrices con los valores y hemos visto como ampliar las mismas y obtener la matriz de ganancias K que compondrá nuestro controlador a partir de los polos que nosotros marquemos debemos determinar estos polos.

Los polos que seleccionemos tendrán una relación directa con el comportamiento que tendrá el sistema, y por lo tanto se deben ajustar en función de las especificaciones. Típicamente estas especificaciones se definen en base a un tiempo de establecimiento y una sobreoscilación. Existen además varias formas de determinar estos polos, una de ellas es a partir de las especificaciones obtener típicamente dos polos complejos conjugados que hagan que el sistema cumpla con las mismas, estos polos serán los dominantes situándose en resto al menos cinco veces más “lejos” para que no afecten demasiado al comportamiento deseado para el sistema.

Otra forma de determinar estos polos es el uso de técnicas de control óptimo como puede ser el LQR. El uso de este método se basa en la resolución de la ecuación de Ricatti que minimiza el coste penalizando o no el uso de algunas de las acciones y valorando en mayor o menor medida el resultado de algunas salidas.

Para el diseño del control se llevan a cabo en paralelo ambos métodos y posteriormente se comprobará cual da mejores resultados a partir de las simulaciones, para el método LQR se decide dar un peso extra a la posición en Z y al cabeceo ya que se consideran las variables más críticas, valorándose cinco y tres veces más que el cabeceo. Para el guiado también se da mayor peso a la posición en Y pero siendo esta vez únicamente el doble que la guiñada. En cuanto a las velocidades estas se ponderan de peor forma ya que existen dinámicas en el sistema que harán que las especificaciones varíen. Respecto a las acciones de control estas se ponderarán todas al mismo valor.

Para el método de seleccionar los polos manualmente se toma de forma arbitraria y teniendo en cuenta que posteriormente habrá más dinámicas en el sistema que afectaran los polos correspondientes a un tiempo de establecimiento de 2 segundos y una sobreoscilación del 10%.

Tras realizar pruebas usando las ganancias obtenidas mediante ambos métodos con el modelo del sistema completo, que cuenta con más elementos que añaden dinámicas que no están contempladas, se observa como para este caso en concreto el control creado a partir de la selección manual de los polos daba mejor resultado por lo que este es el método final que se toma, a continuación, se describen los requerimientos con los que se calcula

- Tiempo establecimiento HEMS = 1,5 seg
- Sobreoscilación máxima HEMS = 10 %
- Tiempo establecimiento EMS = 3 seg
- Sobreoscilación máxima EMS = 15 %

Debido a la construcción del sistema al ajustar los polos de esta forma estaremos fijando en parte este comportamiento más dominante a las variables de posición, sin embargo, estas se consideran especialmente críticas por lo que se acepta esta condición.

También se puede ver como las especificaciones tomadas son más estrictas para los HEMS esto es debido a que se considera que los EMS solo corregirán pequeñas perturbaciones por lo que no se desea que su comportamiento sea demasiado agresivo.

Los polos resultantes de estas especificaciones son los siguientes

$$P_{HEMS} = [-2,66 + 3,638 i, -2,66 - 3,638i, -10,66, -11,66, -12,66, -13,66, -14,66, -15,66, -16,66] \quad (24)$$

$$P_{EMS} = [-1,33 + 2,208 i, -1,33 - 2,208i, -6,66, -7,66, -8,66, -9,66]$$

Por último, una vez obtenidos los polos se obtendrá la matriz de ganancias K a partir de los mismos, las matrices A y B ampliadas y el comando de MATLAB “place” que resolverá la ecuación 16 devolviendo las matrices K para el HEMS que será de 6x9 y la matriz K para el EMS que será de 4x6. Una vez hecho esto se comprueba mediante un modelo de simulink usando el bloque de espacio de estados y con las ganancias que la respuesta del sistema modelado es efectivamente la que se había impuesto mediante la selección de polos. Por lo que se da por finalizado el “diseño” de control por espacio de estados.

Adicionalmente y como ya se había comentado los límites de corrientes serán de -40 y 40 A para el HEMS y de 0 a 20 A para el EMS. Esto también se incorpora al control de forma que la salida de las corrientes de referencia este saturada entre esos valores.

Cabe destacar que a pesar de que el diseño como tal finalice aquí, en el modelo real existen muchas dinámicas que no aparecen en este modelado (por diferentes razones) por lo que la respuesta teórica no será la que obtengamos al probar el control en el modelo no lineal, en cualquier caso el diseño se considera como correcto y capaz de alcanzar el objetivo propuesto y durante el proceso de simulaciones e implementación se harán modificaciones en el sistema de control (tunning) para hacer que el sistema final se comporte de la forma esperada.

Durante las fases de simulación y testing se comprobó cómo el momento más crítico desde el punto de vista del control era el despegue ya que se comienza lejos del punto de linealización y se ha de llegar a este de forma controlada, vigilando siempre que no se produzca una sobreoscilación excesiva que llevaría a la desestabilización del sistema.

Para solucionar este problema se buscó realizar un buen ajuste de los parámetros especialmente el derivativo a fin de compensar el pico de acción de control inicial que aparecerá para el despegue. Adicionalmente a este ajuste se implementó un sistema tipo “bumpless transfer”

En este sistema lo que se obtienen son dos matrices de ganancias uno para el punto de linealización base que hemos tomado hasta ahora y otra con las ganancias correspondientes a un punto de linealización intermedio. Al inicio del despegue se aplicarán las ganancias del punto intermedio de forma que al estar más cerca el punto de partida del de linealización la acción aplicada será menos brusca y la respuesta del controlador mejor. Este control será el encargado de comenzar el movimiento de forma más controlada y después mediante la modificación de la referencia se hará que se continúe aumentando la distancia hasta que nos encontremos más cercanos al punto de linealización final en este momento se realizara el cambio de las constantes aplicadas y al estar el sistema en un punto más cercano será capaz de alcanzar el punto de operación final de forma menos abrupta y más controlada.

El punto más crítico durante este proceso es el cambio de ganancias dado que cada una se corresponde a un punto de linealización y cuando se hace el cambio también ha de tenerse en cuenta este punto, así como la acción integral que teníamos acumulada de forma que realizar este cambio de forma directa resultaría en una discontinuidad en la acción de control que provocaría un comportamiento abrupto lo cual resultaría probablemente en la pérdida de control del sistema. Para evitar esto se debe realizar en el instante previo al cambio el valor de integral necesario para que no haya discontinuidad entre la acción de control y por lo tanto no se produzca ese fenómeno.

Para obtener el valor del integrador necesario se ha de tener en cuenta como se calculan cada acción de control de los dos grupos de ganancias. Se denotará como con el subíndice 1 todo lo relacionado con el control para el punto intermedio y con 2 todo lo relacionado con el control para el punto de operación final.

$$\begin{aligned} u_1 &= k_{p1}(z - z_{01}) + k_{d1} d + k_{I1} Int_1 \\ u_2 &= k_{p2}(z - z_{02}) + k_{d2} d + k_{I2} Int_2 \end{aligned} \tag{25}$$

Donde u serán las acciones de control, k_p , k_d y k_i las ganancias, z el valor de la variable en el instante actual, z_{0x} el valor de linealización de esa variable, d la derivada de esa variable y Int_x el valor del integrador. Para u y d no se aplica la resta del punto de linealización ya que este punto es 0 para ambos controles.

Para obtener el valor de Int_2 el cual debemos actualizar igualaremos u_1 y u_2 y dado que el resto de variables serán conocidas la resolución y obtención del valor será trivial. Y aplicando este valor a la integral en el instante anterior al cambio de las ganancias se asegurará que el bumpless transfer se realiza correctamente resultando en un mejor y menos abrupto control, como se puede ver en las siguientes figuras.

La transición entre un conjunto de ganancias y el otro se realiza cuando se pase de una cierta posición, para evitar problemas en caso de que se supere este valor durante un instante se implementara un comparador con histéresis de forma que se debe superar el valor fijado durante un numero de ciclos y entonces es cuando se realizara el cambio.

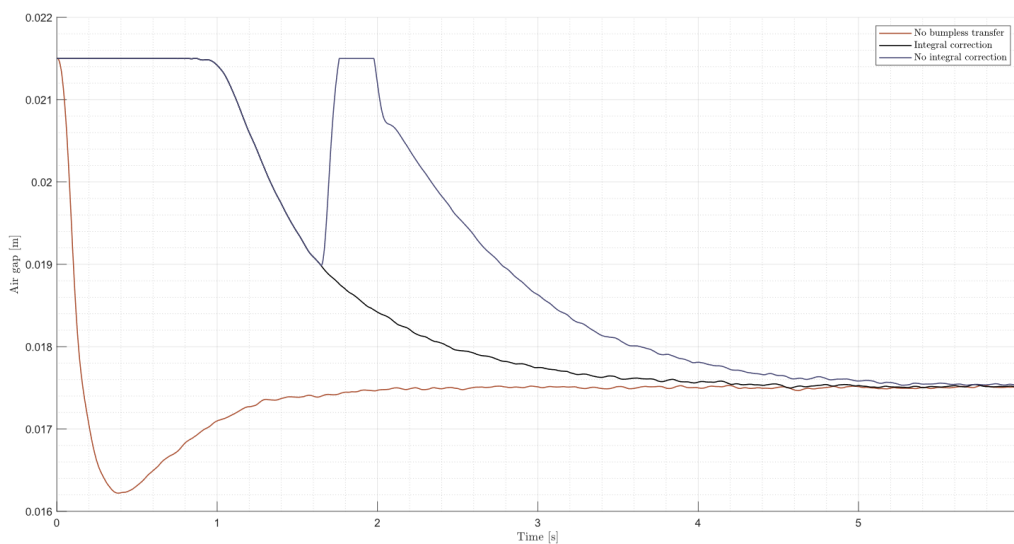


Figura 99. Comparativa posición bumpless transfer

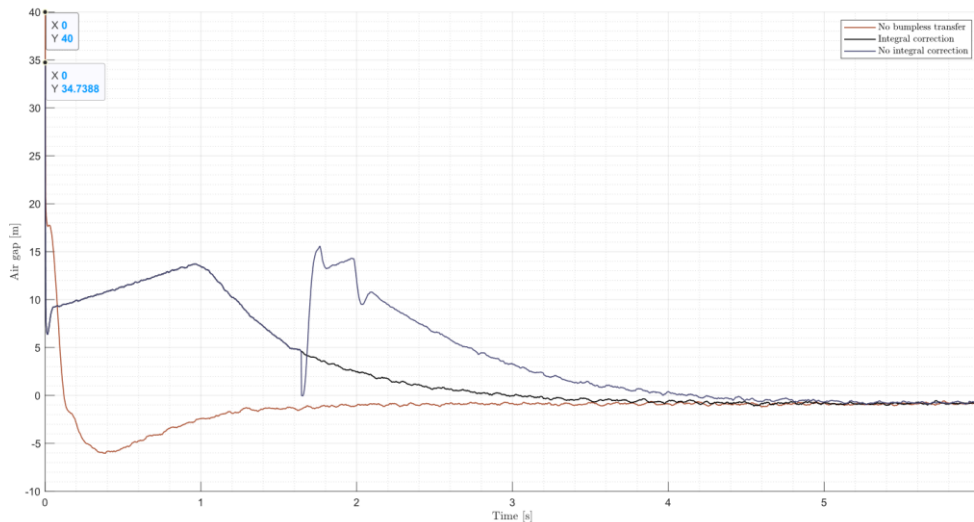


Figura 100. Comparativa corriente bumpless transfer

Se puede apreciar como el uso de esta técnica bien aplicada resulta en que el despegue y aproximación hasta el punto deseado se realiza de forma mucho menos abrupta lo cual es deseable ya que no se produce sobreoscilación, aunque el tiempo de establecimiento aumenta en parte debido a que las referencias se aplican de forma que el cambio sea más suave. También se ve como si no se realizase la corrección de la integral no solo no funcionaría el control bien, sino que se desestabilizaría tocando contra el suelo y después ya recuperando.

Respecto a la corriente el uso del bumpless reduce la corriente pico demandada y también el salto de la misma lo cual de nuevo es deseable. Para el caso de no implementar la corrección se ve la discontinuidad en la acción de control que se comentó y que desestabiliza el sistema haciendo que caiga.

4.4.2. Control de corriente

El bucle de corriente que se ejecutara de forma individual en cada una de las 10 LPUs a partir de la información enviada por la LCU mediante CAN tiene el objetivo de asegurar que la corriente real aplicada en las bobinas es la calculada por el espacio de estados y que esta se alcanza con el menor retraso posible. Este bucle de control será mucho más sencillo que el que el bucle principal que se encuentra en la LCU sin embargo si el seguimiento de la corriente de referencia no fuese correcto el control no sería capaz de alcanzar la levitación.

Es importante recordar que a diferencia de lo que se ha planteado para el bucle principal este control será más sencillo al tratarse de un sistema SISO y deberá ejecutarse más rápido (5 kHz) para que el control se realice correctamente, esto unido a los problemas intrínsecos de derivar una señal de corriente con ruido hacen para este bucle se opte por el uso de un PI.

4.4.2.1. Adquisición de datos

Para poder realizar el control de la corriente real aplicada a la bobina es necesario ser capaz de medir la que está circulando por la misma, para esto las LPU cuentan con un sensor de corriente tipo shunt que mediante su correspondiente etapa de adaptación nos dará las mediciones de corriente. En este caso no será necesario realizar ninguna transformación con la misma ya que esta será la variable que usemos directamente en este caso al igual que pasaba con el sensor de air gap se realizará un filtrado de la señal para mejorar su calidad, el filtro utilizado será un filtro paso bajo de Butterworth de primer orden con una frecuencia de corte de 500 Hz con la siguiente expresión.

$$Filtro\ corriente = \frac{0,2452 \cdot z + 0,2452}{z - 0,5095} \quad (26)$$

El resultado de aplicar este filtro se muestra en la Figura 101.

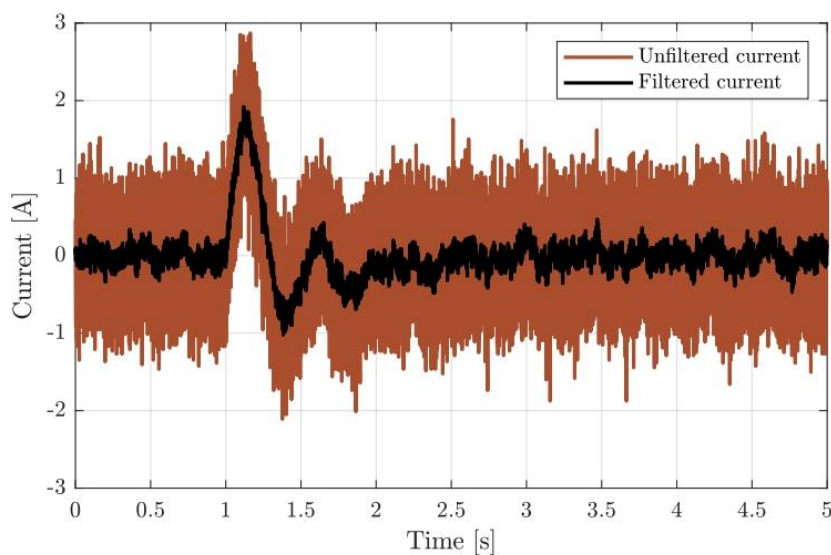


Figura 101. Filtrado de la corriente

La señal resultante es de la suficiente calidad como para ser usada para el control por lo que se considera que el diseño de este filtro es suficiente, además de que no introduce un retraso demasiado grande.

4.4.2.2. Control PI

El control que se usa para el bucle de corriente es un PI, esto se decide puesto que no es buena idea incluir la acción derivativa y este es el tipo de control más simple que permitirá que se siga la referencia sin error. Este tipo de control usará el error calculado en este caso como la corriente de referencia menos la corriente real para calcular la acción de control a aplicar.

La acción de control será el duty de la señal PWM que se usará para aplicar tensión a la bobina, de forma que un incremento en esta tensión resultará en un incremento de la corriente. Sin embargo, el mayor problema que ha de tratar este bucle para obtener un correcto seguimiento es la inductancia ya que como se vio es un parámetro que variará a lo largo del rango de trabajo.

Esto implica que el diseño del PI ha de ser hecho haciendo énfasis en su robustez, de forma que sea capaz de trabajar correctamente en todo el rango de inductancias para lograr esta robustez se realizará el diseño mediante técnicas LQR tomándose como valor de inductancia la máxima y después comprobando su funcionamiento para otros valores. Otra consideración importante es que se desea que este controlador actúe lo más rápido posible para que el seguimiento sea bueno, esto unido a que la acción de control será el duty hará que se requiera un control agresivo que previsiblemente generará una alta saturación.

Para poder realizar el control primero debemos obtener el modelo, en este caso el modelo se hará considerando la bobina como un circuito RL cuya función de transferencia es la siguiente.

$$f_{dt_{bobina}}(s) = \frac{\frac{1}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (27)$$

Una vez hecho este modelado se procederá a la obtención del controlador PI, en este caso el diseño se realizará mediante LQR usando el toolbox rltool de MATLAB donde se diseñará el controlador para el caso de inductancia máxima y después se comprobará que su respuesta se adecuada para otros valores intermedios. Todo este control PI se ejecutará a una frecuencia de 5 kHz a fin de que sea capaz de responder a la velocidad necesaria para actuar sobre la corriente. Finalmente, tras el diseño y su posterior testeo para los diferentes valores de inductancias los controladores PI quedan de la siguiente forma

$$\begin{aligned}PI_{HEMS} &= \frac{29,712 (s + 379.3)}{s} \\PI_{EMS} &= \frac{14,575 (s + 219)}{s}\end{aligned}\tag{28}$$

Este proceso se realiza de forma iterativa hasta dar con una solución que satisfaga los requerimientos, siendo la respuesta obtenida con el mismo controlador la siguiente ante las distintas inductancias que puede presentar el sistema considerando que la resistencia no varía.

Se ha comentado ya que se desea además que este control sea lo más rápido posible por lo que se buscara que el comportamiento sea agresivo a pesar de que esto produzca saturación en la acción de control. Puesto que se requerirán cambios rápidos y bruscos de la corriente la acción de control pasara de valores máximos a mínimos de forma muy rápida sin estar apenas tiempo en valores intermedios. Esto puede ocasionar un problema con la acumulación de la acción integral por lo que se incluye un sistema anti-wind up para evitar este fenómeno y permitir que el comportamiento del controlador sea correcto a pesar de la saturación. El diseño de este sistema anti wind-up se realiza mediante el método back cálculo usando la constante K_p del propio PI como valor. Esto se realiza así debido a la simplicidad de implementación y menor consumo de recursos respecto a otros sistemas como el clamping. La implementación de este sistema en simulink se realiza mediante el esquema que se puede ver en la Figura 102.

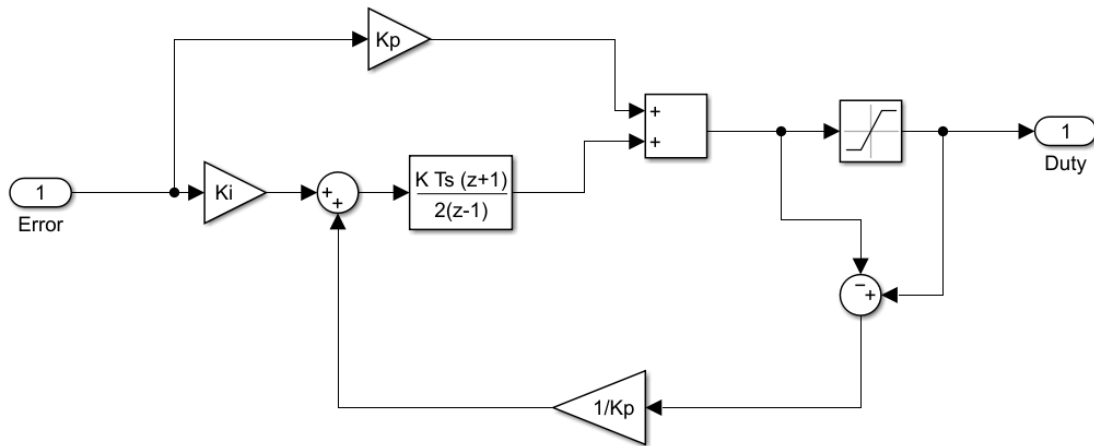


Figura 102. Implementación anti wind-up

El funcionamiento de este sistema se basará en que cuando la acción de control supere el umbral de saturación que estará fijado para este control entre -1 y 1 correspondiéndose con valores del 0 al 100% de duty para corriente positiva o negativa, la diferencia entre la salida y el cálculo se le restará al integrador después de pasar por un factor (k_p en este caso) de forma que no se siga acumulando acción integral y cuando se salga de la zona de saturación esta acumulación no ralentice la correcta respuesta del sistema.

Con todo lo presentado previamente se considera que el control necesario para asegurar el seguimiento de la corriente para todo el rango de trabajo se cumple, así como la calidad de la señal adquirida también es correcta por lo que se considera el diseño de este bucle como finalizado.

4.5. Simulaciones

A lo largo de todos los puntos anteriores se ha ido presentando todos los elementos y pasos seguidos para obtener el sistema de control de la levitación y los modelos sobre los que se validará.

A lo largo de esta sección se presentarán los resultados de las simulaciones realizadas sobre los modelos no lineales actualizados que se usaron para la validación del control previa a su implementación. Durante el proceso se realizaron varios ajustes sobre el sistema muchos de los cuales se han comentado en sus respectivas secciones. Los resultados presentados aquí por otro lado corresponderán a las versiones finales de todos los elementos de forma que se verá el resultado más refinado obtenido durante esta etapa.

Se distinguirá dentro de esta sección las simulaciones realizadas para la bancada y también para el vehículo distinguiendo dentro de esta última categoría varios casos de funcionamiento que se corresponden con las demostraciones que Hyperloop UPV realizó en la EHW 2022.

También es relevante mencionar que las simulaciones presentadas a fin de que aproximen lo máximo posible a la realidad se realizaron teniendo en cuenta la implementación del control esto implica que se usaran los controles y elementos ya discretizados incluyendo controladores, filtros, procesado de señales, etc.

4.5.1. Bancada de levitación

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control en la bancada de levitación se realizaron diferentes simulaciones realizando ajustes hasta obtener la respuesta deseada. Una vez se obtuvo esta respuesta se procedió a realizar una simulación para validar el sistema completo, esta simulación comenzara con la plancha de acero en reposo a una distancia que simulara el suelo y se hará que el control la lleve a la distancia de levitación marcada, una vez en esta posición se introducirá una perturbación y también se realizara un cambio de referencia a fin de determinar que el sistema de control es adecuado para gobernar el comportamiento de la unidad de levitación.

El modelo usado para esta simulación se muestra en la siguiente Figura.

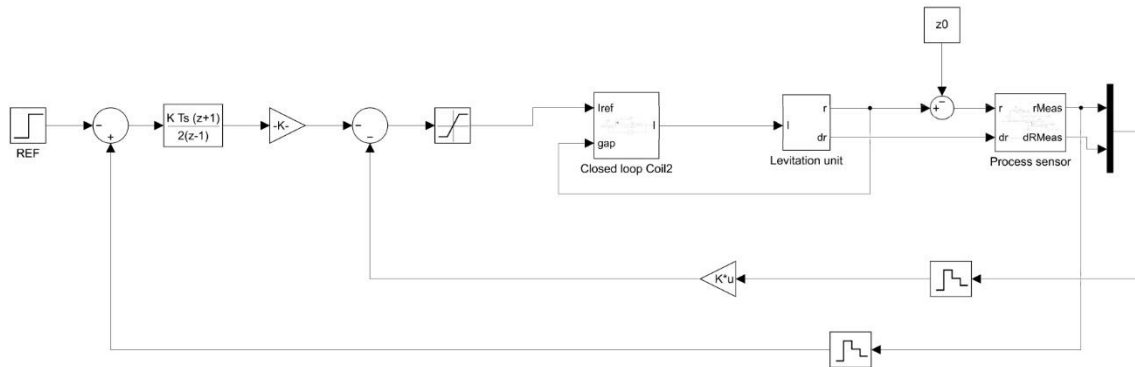


Figura 103. Modelo simulink bancada de levitación

En este modelo se distinguen varias partes, en el centro en el bloque “levitation unit” se encuentra el modelo de la fuerza de la unidad así como el modelo dinámico, de este la salida de posición pasara al bloque de “process sensor” que contara con la dinámica del sensor de air gap así como el cálculo de la derivada y su filtrado, estas variables se usaran para el control por espacio de estados que en este caso se compondrá de unas ganancias dos para el air gap y su derivada y la que se obtiene a partir de la acción integral, el resultado de esto será la corriente de referencia la cual entrara al bloque “closed loop coil” el cual realiza los cálculos del controlador PI aplicando voltaje al modelo de la bobina resultando en la corriente final aplicada a la unidad, en este bloque también se incluye la dinámica del sensor de corriente.

Los resultados de las simulaciones se presentarán a continuación comenzando con la variación de air gap.

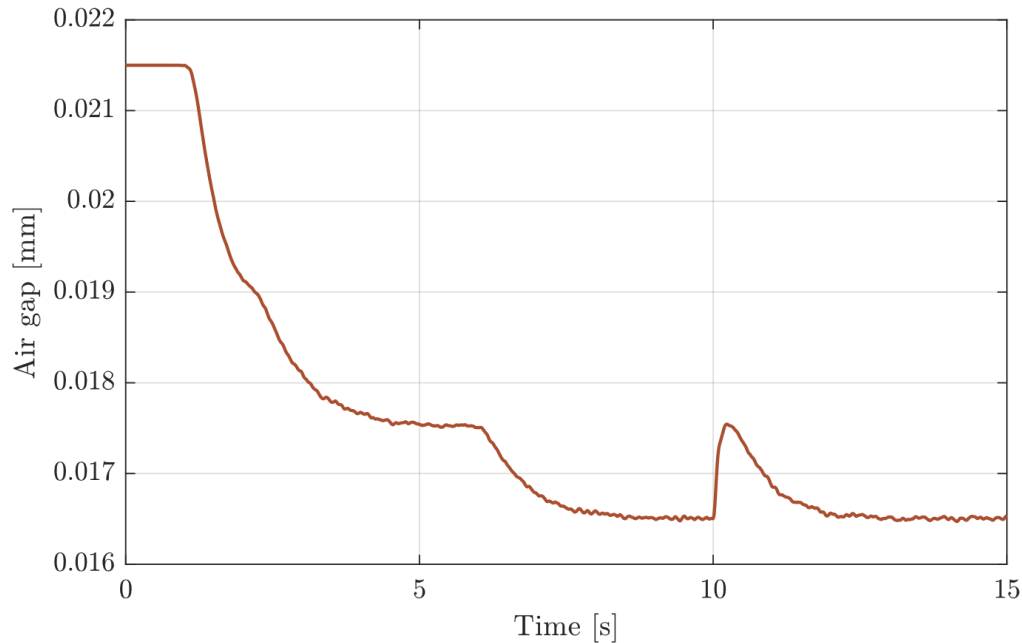


Figura 104. Variación air gap simulación bancada de levitación

En esta grafica se puede observar el efecto ya tratado del bumpless transfer que permite que se realice un despegue suave hasta alcanzar la distancia de levitación nominal, en este caso el despegue se considera que se realiza desde 21,5 mm.

Una vez estabilizado el sistema en esta distancia de levitación se introduce un cambio de referencia el cual tiene un tiempo de establecimiento de alrededor de 2,5 segundos algo mayor al impuesto mediante el diseño de los polos, pero no presenta sobreoscilación (sistema sobreamortiguado), se ve como la referencia se sigue sin problemas y de nuevo se estabiliza en torno al nuevo valor.

Una vez estabilizado se introduce una perturbación, para este caso se determina que la perturbación será la correspondiente a añadir un peso de 1 kg extra al sistema, se observa como la aplicación de esta perturbación provoca una variación en el air gap de aproximadamente un milímetro para después corregir y volver a la referencia un tiempo de alrededor de 3 segundos. Este comportamiento podría hacerse más agresivo de forma que la respuesta sea más rápida pero dado que el objetivo es validar el sistema de control en sí y no existen unos requerimientos específicos se dará por valido.

La corriente en la unidad se muestra a continuación.

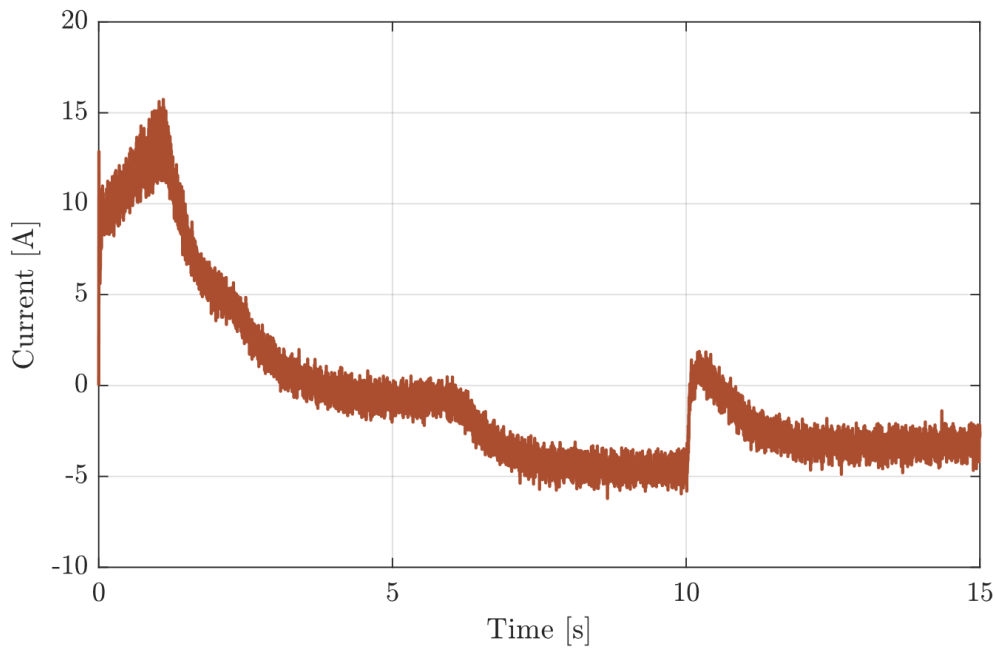


Figura 105. Corriente aplicada simulación bancada de levitación

En esta grafica se aprecia la que la corriente necesaria para el despegue es de aproximadamente 14 A y también como existen picos en la corriente aplicada por lo que se podría buscar un mejor comportamiento del control de corriente para reducirlos. Al margen de esto tras el pico producido para el despegue se aprecia como el control se estabiliza en la referencia indicada con un consumo de corriente cercano a cero y como este aumenta para seguir la referencia y su cambio para corregir la perturbación. Como se ha adelantado la acción de control aplicada para corregir la perturbación podría aumentarse para obtener una mejor respuesta.

Respecto al seguimiento de la corriente la simulación se muestra en la siguiente gráfica.

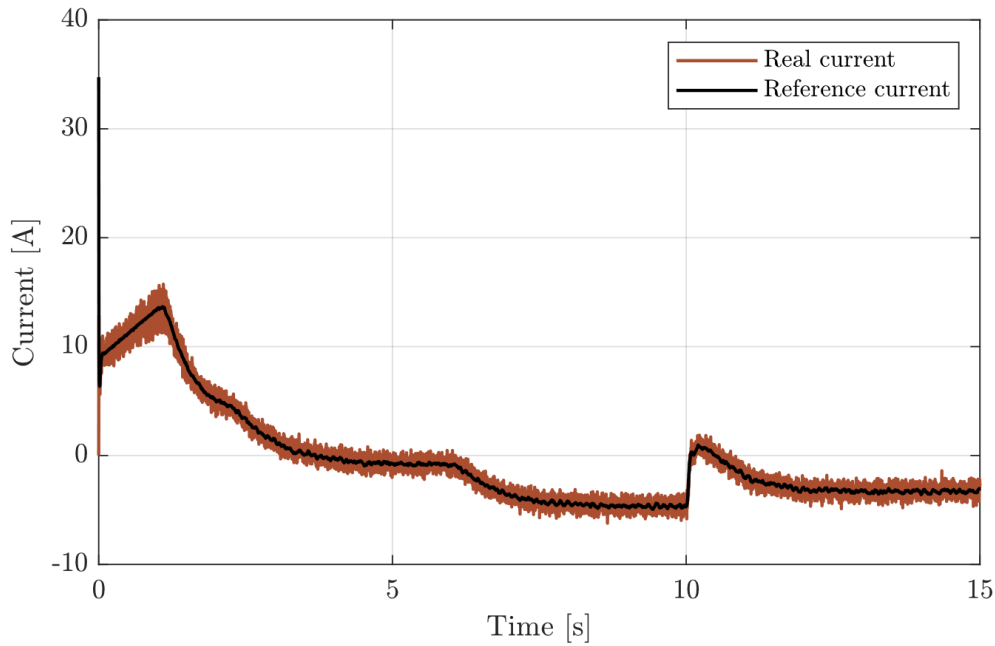


Figura 106. Seguimiento de la corriente simulación bancada de levitación

Se puede apreciar como la corriente aplicada tiene unos picos mayores que la referencia y aunque se produzca un seguimiento de la misma se buscara mejorar el comportamiento del bucle de corriente para limitar este efecto.

Con todo lo presentado se da por valido el control para la bancada de levitación ya que el objetivo de esto era demostrar que el sistema de levitación puede gobernar el comportamiento de la unidad basada en la tecnología de levitación más que obtener el mejor comportamiento posible para esta bancada. Por todo esto se decide emplear una mayor cantidad de tiempo y recursos en las simulaciones del vehículo completo que ya incluirán alguna posible mejora detectada durante las simulaciones de este sistema.

4.5.2. Levitación estática Auran

Una vez comprobado y validado el comportamiento de la bancada de levitación se pasará a la levitación del vehículo completo, dentro de la cual se distinguen principalmente dos modos de funcionamiento. Uno de ellos y el que se presenta a lo largo de esta sección es la levitación en estático, durante esta no se producirá activación del motor por lo que no habrá desplazamiento a lo largo del tubo con todas las fuerzas que esto implica (propulsión motor, drag, fuerzas transversales, etc.). El modelo completo usado para esta simulación que coincide con el que se usara para la levitación dinámica es el que se muestra a continuación.

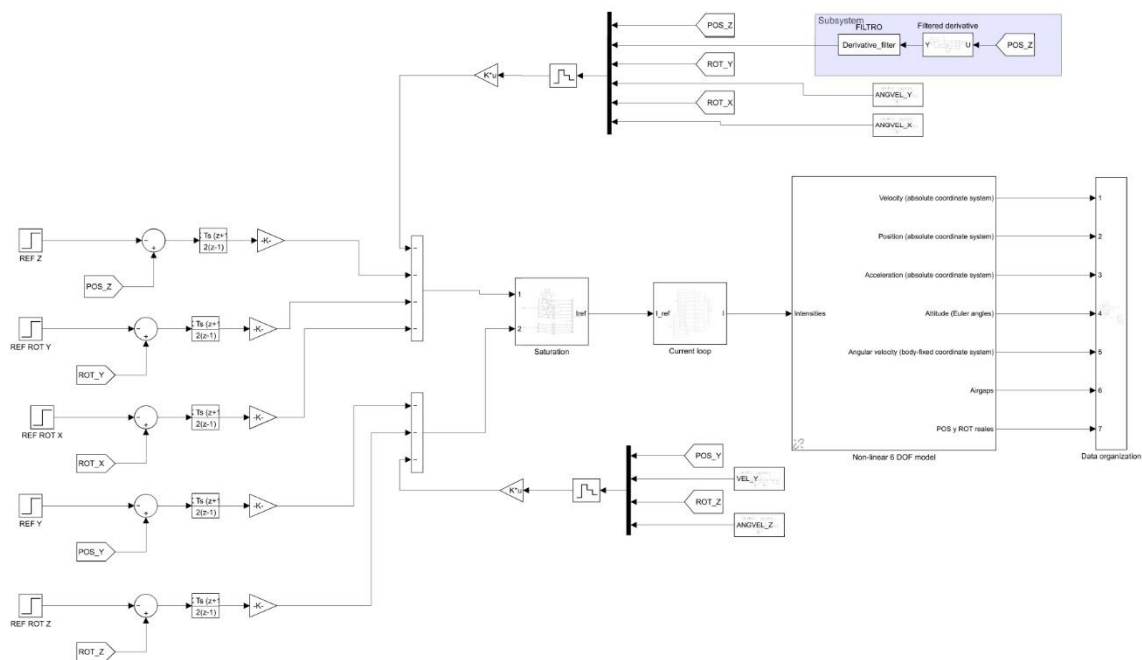


Figura 107. Esquema simulink modelo no lineal

Dentro de este esquema podemos distinguir varios elementos, en el centro el bloque llamado “Non-linear 6 DOF model” contiene todos los modelos de fuerzas, bloque del comportamiento dinámico y dinámica del sensor de air gap presentados en la sección del modelo de Auran, las salidas de este bloque que serán tanto las reales como las estimaciones entrarán a un bloque que se usa para redistribuir los datos mediante diferentes etiquetas, así como para la visualización de los mismos mediante scopes.

Estos datos serán usados en el modelo mediante etiquetas, en la parte superior del bloque no lineal se puede apreciar las variables de estado del control de los HEMS, así como la expansión de uno de los bloques que muestra la obtención de la derivada a partir de esa variable. En la parte inferior se realiza el mismo proceso para el control del EMS. Esta información se discretiza y se multiplica por sus respectivas matrices de ganancias para posteriormente que se le sumen las acciones integrales, calculadas en la izquierda del todo del modelo para cada una de las variables. Todo esto resulta en el cálculo final de los controles por espacio de estados, esto es las corrientes de referencia.

A estas corrientes de referencia que están separadas entre HEMS y EMS se les aplica la saturación correspondiente, lo cual se hace en un subsistema por claridad y serán la entrada a otro subsistema que se corresponderá con el bucle de corriente, obteniéndose a la salida las diez corrientes reales que se aplicaran.

Dentro del bloque del bucle de corriente lo que se realiza es la separación de las corrientes de referencia, entrando cada una de ellas a otro bloque que simulara el control PI y la dinámica de la bobina (de nuevo este modelo fue detallado en la sección de modelado). En cada uno de estos bloques se calculará la salida de corriente teniendo en cuenta el voltaje aplicado, la inductancia en cada momento, así como estará la dinámica del sensor de corriente y el controlador PI.

Una vez presentado el modelo global que se usara y habiéndose presentado todos los elementos que lo componen se pasa a presentar las simulaciones realizadas. Para las cuales también se han de tener en cuenta ciertas consideraciones

- Los ejes considerados son los presentados en la Figura 55
- El control usara la posición del centro de gravedad en el eje Z sin embargo para simplificar la compresión y dado que las características geométricas son constantes se presentarán los valores referenciados al air gap con límite entre 22,5 y 10 mm
- Igualmente, la posición en Y se referenciara en su posición inicial como cero indicando que está totalmente centrado y el desplazamiento máximo permitido es de ± 2 mm
- Para el cálculo de las rotaciones máximas permitidas se tendrá en cuenta la geometría total del vehículo para determinar los límites.

4.5.2.1. Validación del control

Previo a realizar las simulaciones de las demostraciones que se pretenden realizar se ha de verificar que el control es capaz de controlar el sistema de forma eficaz, así como de tener un buen comportamiento ante cambios de referencia y especialmente ante perturbaciones.

En esta simulación se valida el funcionamiento del control iniciando con el sistema en el punto de funcionamiento este serán 17,5 mm que se correspondía con el punto aproximado en el que no se requería corriente para levitar y introduciendo inicialmente un cambio de referencia en la posición en Z de 1,5 mm dejando el vehículo a 16 mm. Se escoge este cambio de referencia y no uno para los ángulos (también se testean para comprobar, pero no se presentarán los resultados) dado que es el caso que se dará en el despegue, además de que podemos querer variar la distancia de levitación sin embargo de forma normal nunca queremos cambiar la orientación del vehículo puesto que queremos que este se encuentre “plano”.

Tras el cambio de referencia y una vez el sistema se ha estabilizado se introducirá una perturbación de 0,5 mm en la distancia de levitación. Se escoge esta perturbación en lugar de una perturbación en la fuerza ya que este tipo de perturbaciones serán más agresivas además que responden mejor a lo que podría ocurrir en la realidad (desalineamientos entre planchas).

Todos los resultados presentados se corresponderán con la posición y orientación reales del vehículo, no las estimadas. Esta decisión se toma considerando que la variable de interés que queremos tomar como referencia para validar el control serán los valores reales.

En la Figura 108 se presenta la variación en la posición en Z, está a pesar de ser la distancia del centro de gravedad respecto de la plancha superior dado que la distancia entre la cara del imán y ese punto es fija se mostrará relativa al air gap medio. De forma que se consigue una mayor comprensión de que ocurre en el sistema.

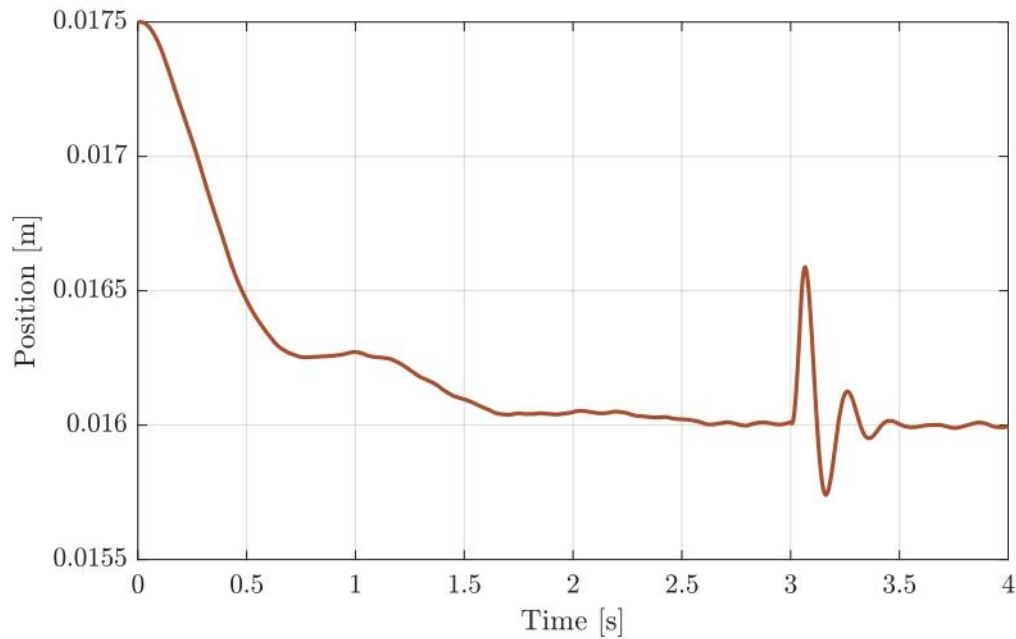


Figura 108. Posición Z simulación validación control

Se puede apreciar como el cambio de referencia se sigue sin error aunque el tiempo de establecimiento es superior al impuesto por especificaciones, de la misma forma se puede observar como el modelo no lineal es un sistema sobreamortiguado ya que no se llega a producir sobreoscilación en ningún momento, esto puede representar una ventaja ya que la sobreoscilación forzaría al uso de corrientes negativas para compensar y ya se vio como la dinámica de estas debido a la inductancia era más lenta además de que se necesita más corriente para el mismo incremento de fuerza que si lo comparamos con corrientes positivas.

Tras el seguimiento de la referencia se introduce la perturbación, en este caso se ve como el sistema actúa de forma mucho más rápida y agresiva sobre la misma logrando compensarla en poco tiempo a coste de que se presente una ligera oscilación. En cualquier caso, se considera que la respuesta ofrecida ante la misma es buena en términos de lo que se espera en el sistema real.

Otra variable que se verá especialmente afectada por ambos cambios es la rotación en Y (cabeceo) cuyo comportamiento se muestra aquí

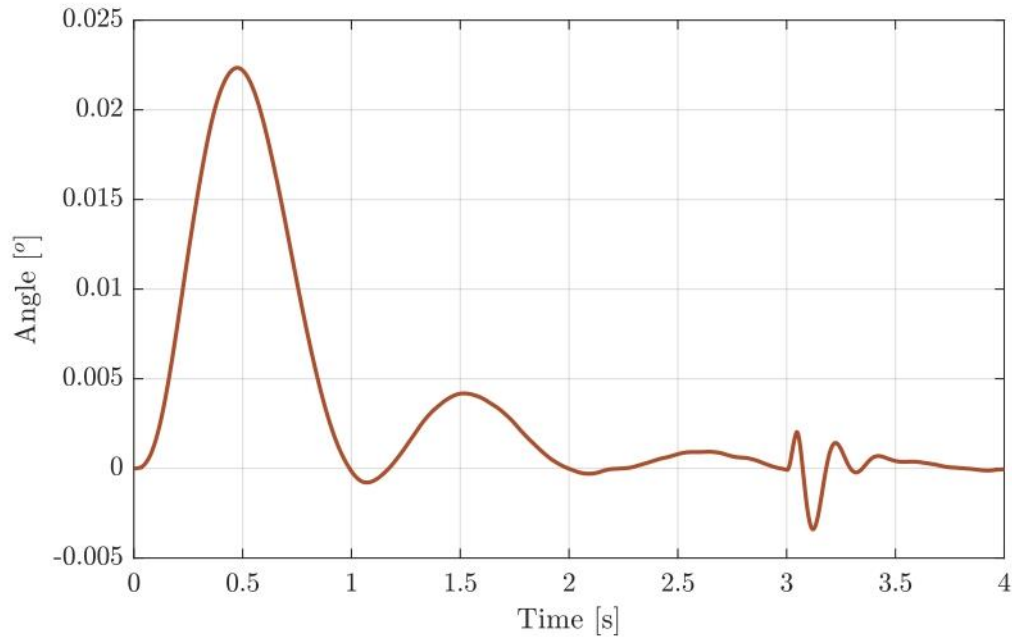


Figura 109. Rotación Y simulación validación control

A partir de esa grafica se puede apreciar como el cambio de referencia lleva asociada una perturbación en esta rotación (los movimientos están altamente acoplados) y como el sistema trata de compensar antes provocando en la posición en Z una pequeña zona “plana” que se corresponderá con el momento en el que estabiliza la rotación. Una vez superada esta perturbación cuyo valor es menor que el máximo permitido que son dos grados el sistema se estabiliza y es capaz de llevar tanto la posición en Z como la rotación a las referencias de forma controlada.

Respecto a la perturbación se puede ver como esta tiene un menor efecto sobre el ángulo fenómeno que se puede achacar a que se ha considerado que la perturbación se aplica igual para todo el vehículo, sin embargo, se ve como también para la rotación el sistema compensa esta perturbación de forma rápida a coste de una pequeña sobreoscilación, de nuevo el comportamiento observado se considera como valido.

La siguiente variable mostrada es la posición en Y, en este eje no existen fuerzas de perturbación para esta simulación.

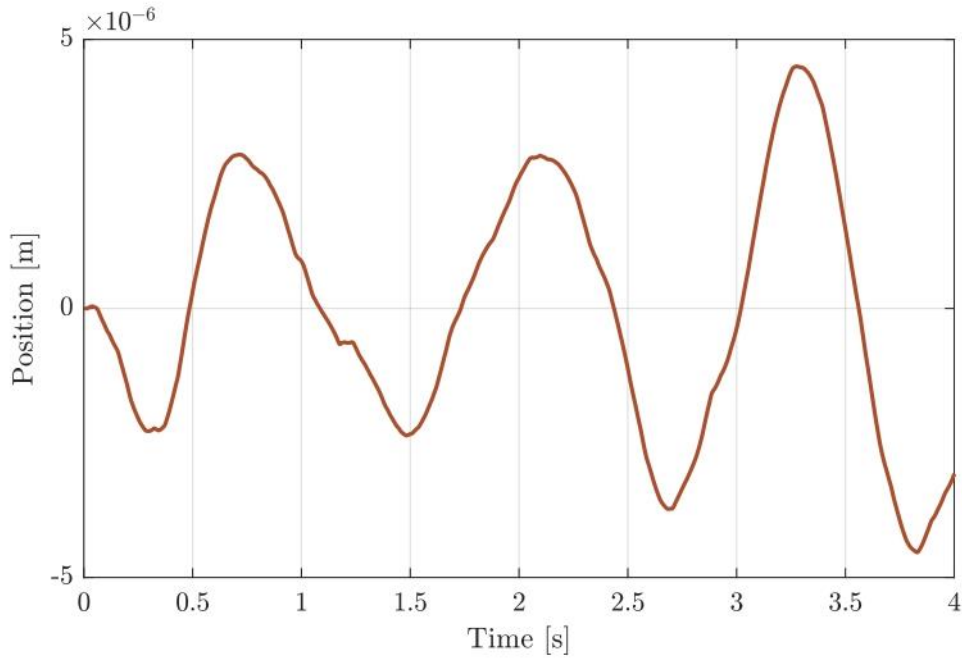


Figura 110. Posición Y simulación validación control

Se aprecia como a pesar de no haber perturbaciones se da una cierta oscilación en la posición en este eje (parece que aumenta, pero en simulaciones más largas se ve como se mantiene), esto se puede explicar debido a que los EMS se activan por el ruido de los sensores, variaciones en la estimación, inestabilidades numéricas del modelo, etc. En cualquier caso, si nos fijamos en el orden de magnitud de esta variación no es significativo como para considerar ya que se puede asumir que el vehículo está quieto en el eje Y.

Por último, dado que no existen grandes perturbaciones se mostrarán juntas las variaciones en las rotaciones del eje X y Z

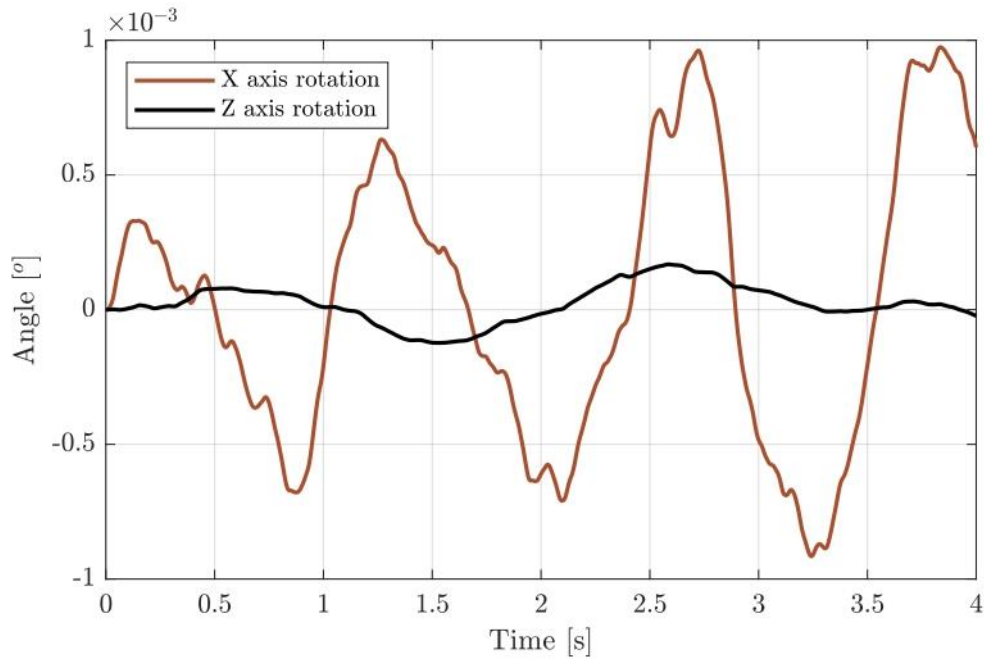


Figura 111. Rotaciones X y Z simulación validación control

La guiñada por las mismas razones expuestas para la posición en el eje Y no sufre grandes perturbaciones, en cambio el alabeo si se ve más afectado ya que recordemos que es accionado principalmente por los HEMS por lo que la acción de estos hace que se produzcan variaciones en esta variable, sin embargo y aunque presenta un comportamiento oscilante y no llega a estabilizarse de la misma forma que el cabeceo la oscilación se produce en torno a valores bajos. Durante el resto de las simulaciones se tendrá en consideración el comportamiento de esta variable en caso de que fuese necesario realizar alguna acción correctiva.

Una vez se ha presentado el comportamiento de las principales variables de interés para esta simulación se revisará las corrientes reales aplicadas. Estas se pueden separar en seis corrientes de HEMS y cuatro de EMS. Para simplificar la visualización y dado que las unidades se han considerado “gemelas” se presentará únicamente tres valores de corriente para los HEMS ya que los valores de los otros tres serán prácticamente idénticos (únicamente existirán pequeñas diferencias por la aleatoriedad del ruido).

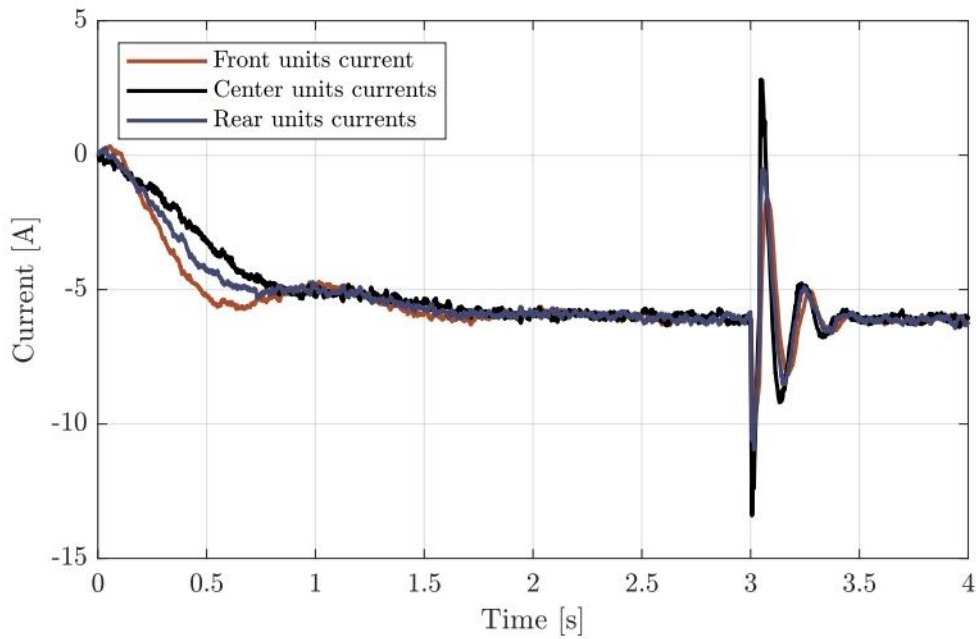


Figura 112. Corrientes HEMS simulación validación control

En esta figura se ve como la corriente durante el cambio de referencia inicial tiene distinto valor para las unidades delanteras, centrales y traseras, esto responde a que se trata de compensar el cabeceo, una vez conseguido las tres toman un valor más homogéneo hasta llegar a una corriente para la cual se puede mantener la nueva referencia impuesta de forma estable.

Cuando aparece la perturbación se aprecia la dinámica más agresiva que habíamos visto produciéndose un cambio brusco en el valor y posteriormente una compensación de este hasta llegar al punto de estabilidad de nuevo. En esta respuesta agresiva se puede ver cómo además de querer compensar el cambio de posición se tiene en cuenta el cabeceo. Los valores de corriente empleados por el sistema para compensar esta perturbación aún están lejos de los límites situados en 40 y -40 A respectivamente por lo que se considera su valor correcto ya que corresponde a una respuesta rápida a la perturbación y se observa que a pesar de esta el sistema recupera su estabilidad de forma correcta.

Respecto al seguimiento de la corriente, se compara la corriente calculada con la real para una de las corrientes mostradas (de nuevo por facilitar la visualización).

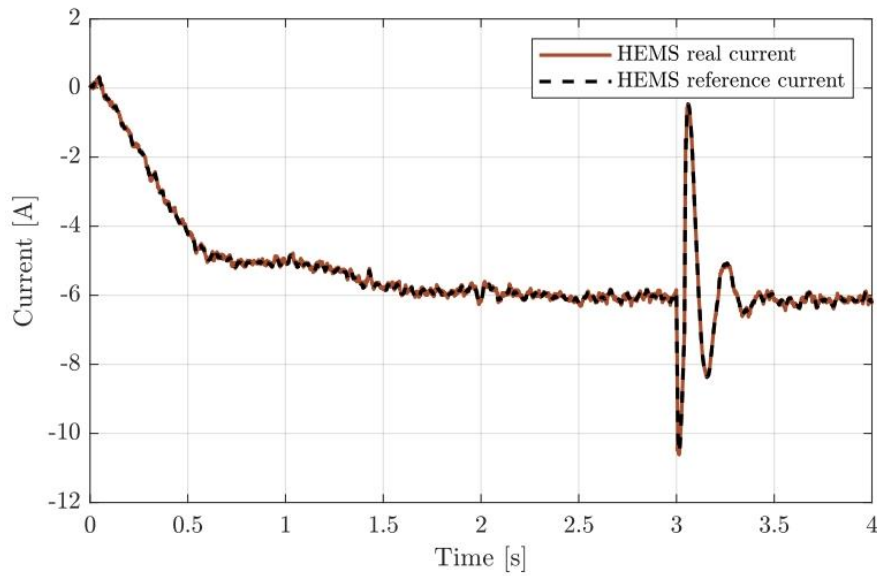


Figura 113. Seguimiento corriente HEMS simulación validación control

A pesar de que la escala no permita apreciarlo de forma correcta se obtiene un seguimiento de la corriente bastante bueno a pesar de los ruidos presentes y el efecto del retraso introducido no es demasiado significativo por lo que se considera que el bucle de corriente está funcionando de forma correcta.

Ahora se repetirá este proceso para los EMS, primero mostrando la corriente real en este caso para las cuatro unidades.

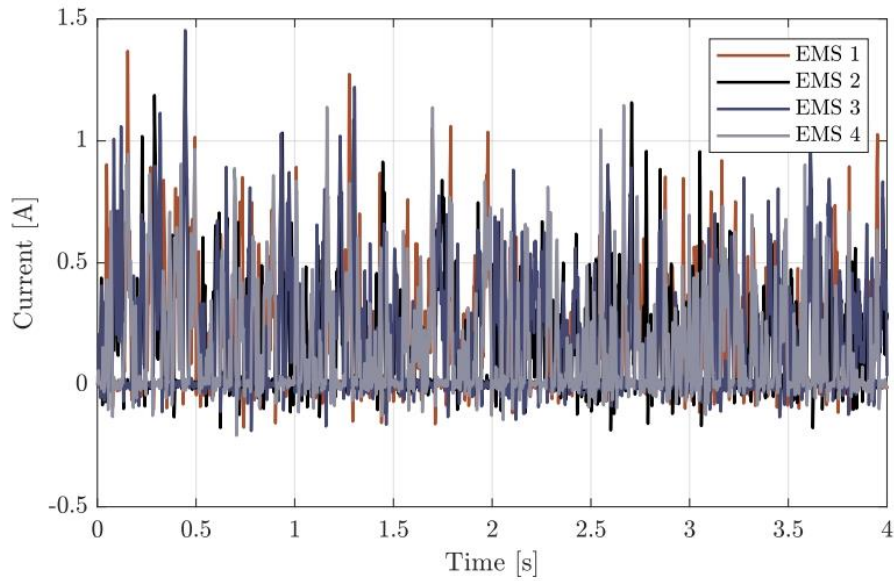


Figura 114. Corrientes EMS simulación validación control

Las corrientes en este caso dado que no había perturbaciones son muy bajas y obedecen a la respuesta ante ruidos y otros elementos. También se puede apreciar como a pesar de que la corriente en estas unidades está limitada a 0 A se producen picos negativos esto es debido a los mismos factores (ruidos, retrasos, etc.) ya que no tiene sentido el uso de corriente negativa puesto que produce el mismo efecto que la positiva.

Si comparamos la corriente real aplicada con la de referencia veremos que al igual que para el HEMS el seguimiento es bueno y el retraso no es significativo, apreciándose además el fenómeno de que la corriente está limitada a 0A cuando es calculada por el control.

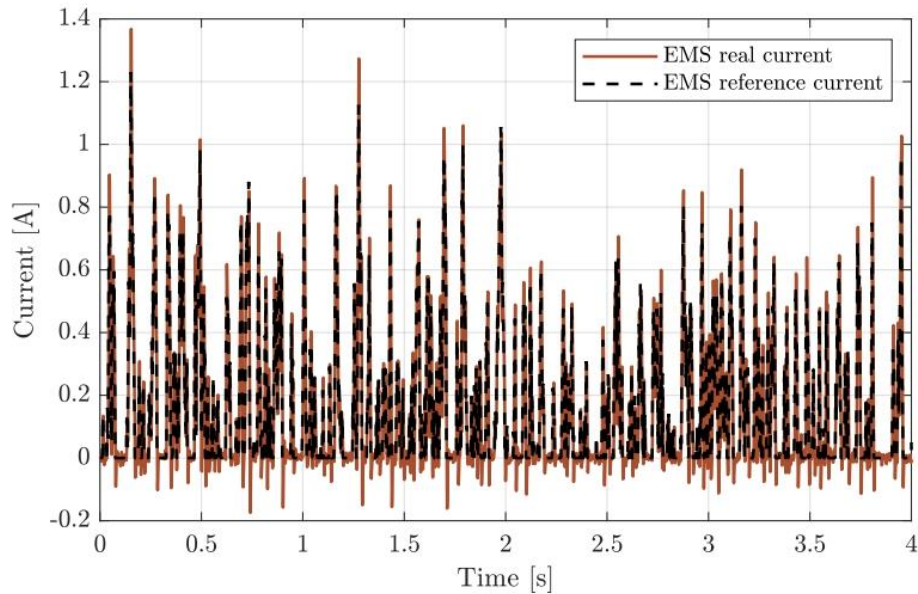


Figura 115. Seguimiento corriente EMS simulación validación control

A partir de toda la información presentada en este apartado se concluye que el sistema de control es capaz de realizar su función alcanzándose una levitación robusta y estable con un buen comportamiento ante perturbaciones. Por lo que se procederá a realizar otras simulaciones necesarias para llegar a las demostraciones de levitación estática y dinámica.

4.5.2.2. Despegue

Una vez validado el control se realizará la simulación correspondiente al despegue al ser este uno de los momentos más críticos. Para esta simulación se considerará que el vehículo comienza a 22,5 mm y ha de alcanzar la posición nominal de levitación que se encuentra a 17,5 mm.

Durante las simulaciones presentadas no se usará un incremento de la referencia gradual para lograr un comportamiento más suave, sino que se dejará que el control trate de llegar lo más rápido posible a la posición deseada a pesar de que esto produzca sobre oscilaciones en el sistema. Esto se elige así ya que será el peor escenario posible y por lo tanto si el control es capaz de estabilizar el vehículo en este caso se asume que será también capaz de hacerlo para el caso del despegue más suave. A continuación, se muestra la variación de la posición en Z.

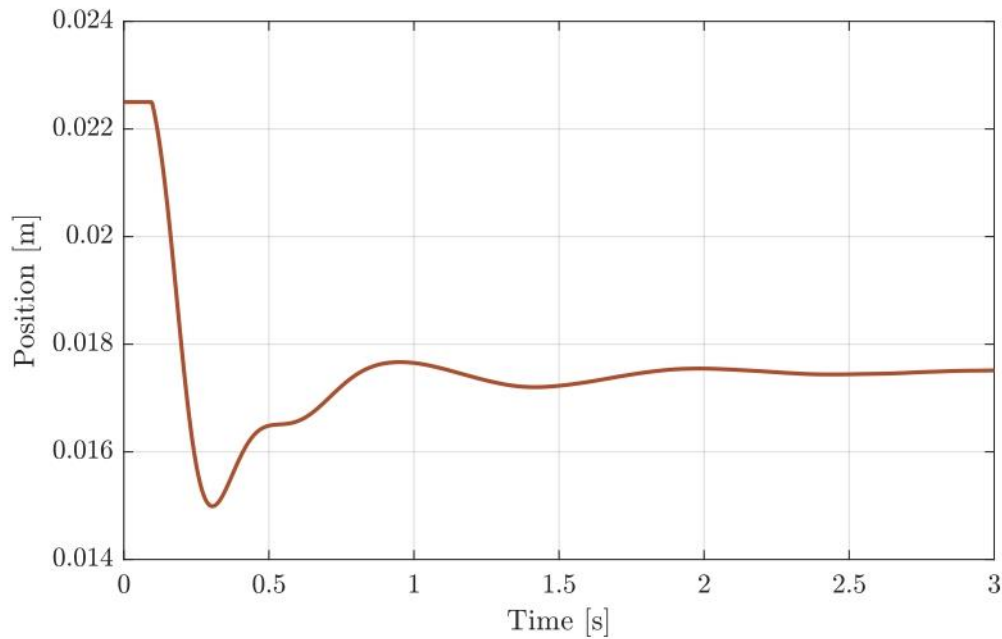


Figura 116. Posición Z simulación despegue

En la imagen se puede ver como al inicio el vehículo se mantiene en el suelo mientras se acumula la acción integral hasta llegar a la corriente necesaria para comenzar el movimiento, una vez se alcanza este punto el vehículo sube rápidamente sobreoscilando hasta algo menos de 15 mm para después recuperar y llegar a la posición requerida en aproximadamente 2 segundos. Si comparamos este comportamiento con el que habíamos determinado al elegir los polos vemos que el sistema tiene un tiempo de establecimiento en torno a 0,5 segundos mayor y una sobreoscilación mayor de lo esperado (sistema subamortiguado). A pesar de todo esto el control es capaz de mantener el control y de estabilizar el sistema mientras se mantiene aún a una distancia suficiente del límite del rango de control que se encuentra en torno a los 10 mm.

Otra variable crítica por el propio funcionamiento del despegue será la rotación en Y cuya evolución se muestra en la siguiente figura.

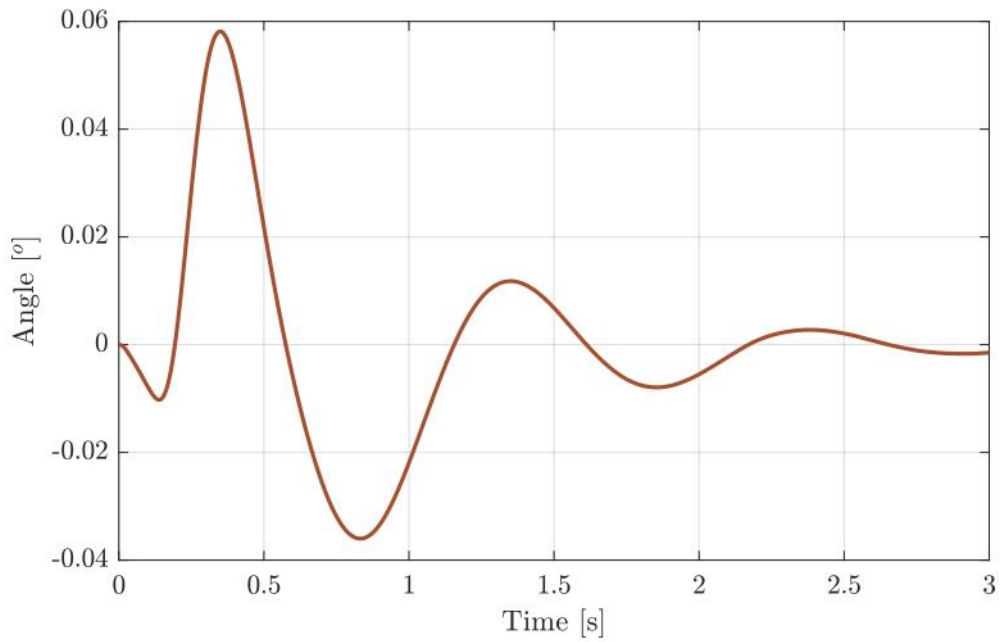


Figura 117. Rotación Y simulación despegue

Se aprecia como en esta ocasión esta rotación se ve mucho más afectada (vimos que está ligada a las variaciones de posición Z) produciéndose una perturbación inicial que llega a su máximo aproximadamente en el mismo momento que la posición en Z. Sin embargo, a partir de ese punto el valor se consigue amortiguar y se consigue estabilizar la variable en torno al punto deseado que en este caso será cero.

Durante esta simulación al igual que la anterior no se activará el motor por lo que no habrá fuerzas transversales, resultando en cambios mínimos en la posición en Y cómo se puede ver

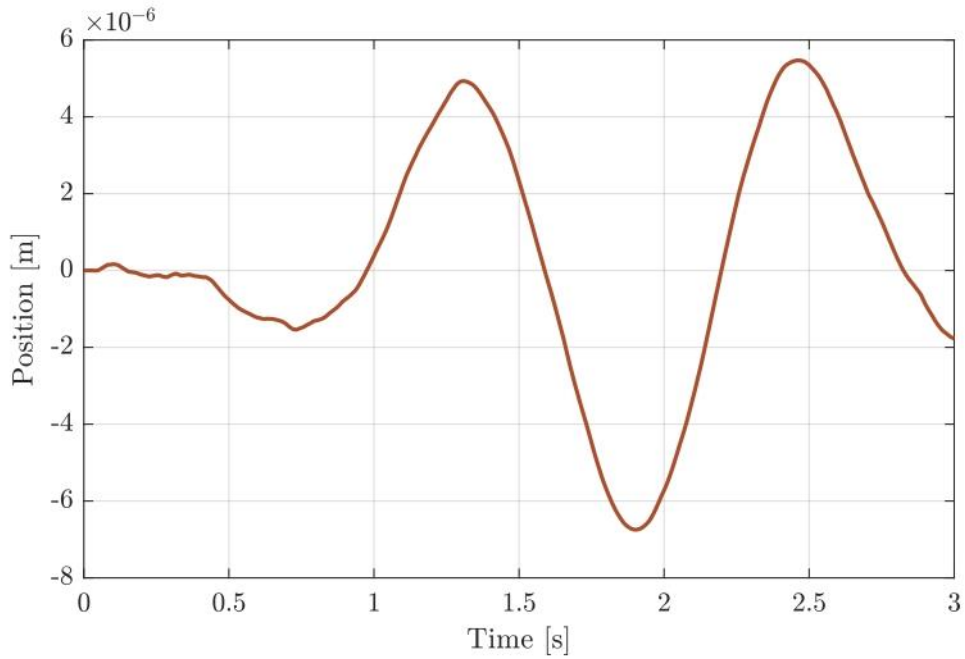


Figura 118. Posición Y simulación despegue

El comportamiento de esta variable es muy similar al ya descrito en la sección de validación, produciéndose pequeñas oscilaciones debidas a ruidos, posibles inestabilidades numéricas, etc. Pero al ser la magnitud de estas muy pequeña no se consideran relevantes y se asume que la variación en esta variable es mínima.

Por último, el alabeo y guiñada se ven afectados de la siguiente forma

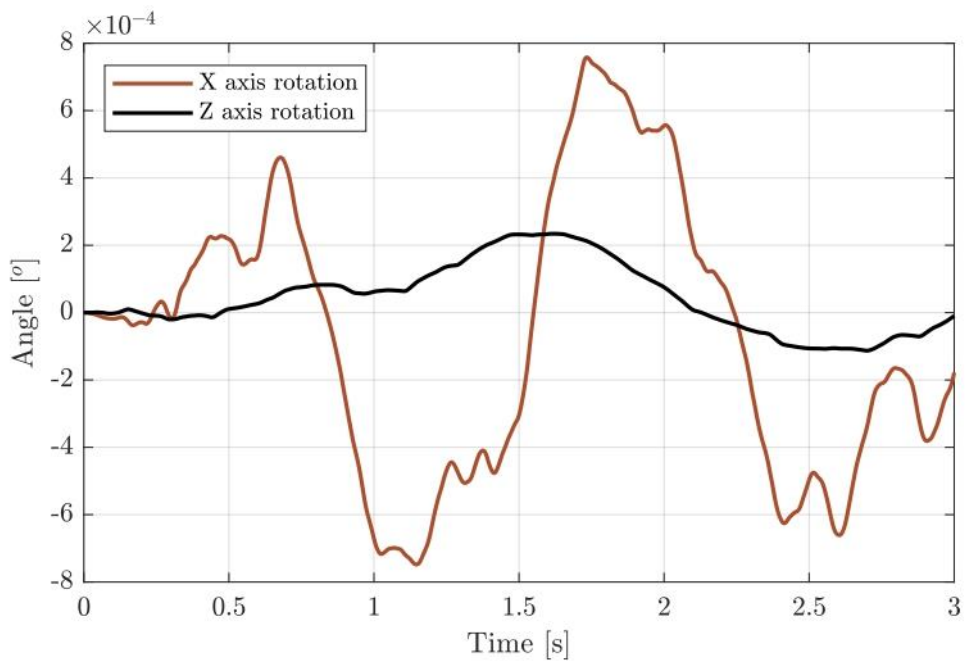


Figura 119. Rotaciones X y Z simulación despegue

La guiñada no tiene grandes perturbaciones al no estar el motor activo mientras que para el alabeo se aprecia cómo se presenta un comportamiento oscilatorio que ya habíamos visto en la validación, en este caso de mayor magnitud confirmándose que por el diseño del vehículo y el posicionamiento de las unidades esta variable tendrá problemas para estabilizarse de forma efectiva, a pesar de ello puesto que las oscilaciones no son de gran magnitud se consideran aceptables.

Ahora se presentará la corriente que se necesita para lograr el comportamiento presentado, mostrándose primero la de los HEMS ya que es la principal usada. Igual que antes por simplicidad se mostrará unidamente tres corrientes correspondientes a las unidades delanteras, centrales y traseras.

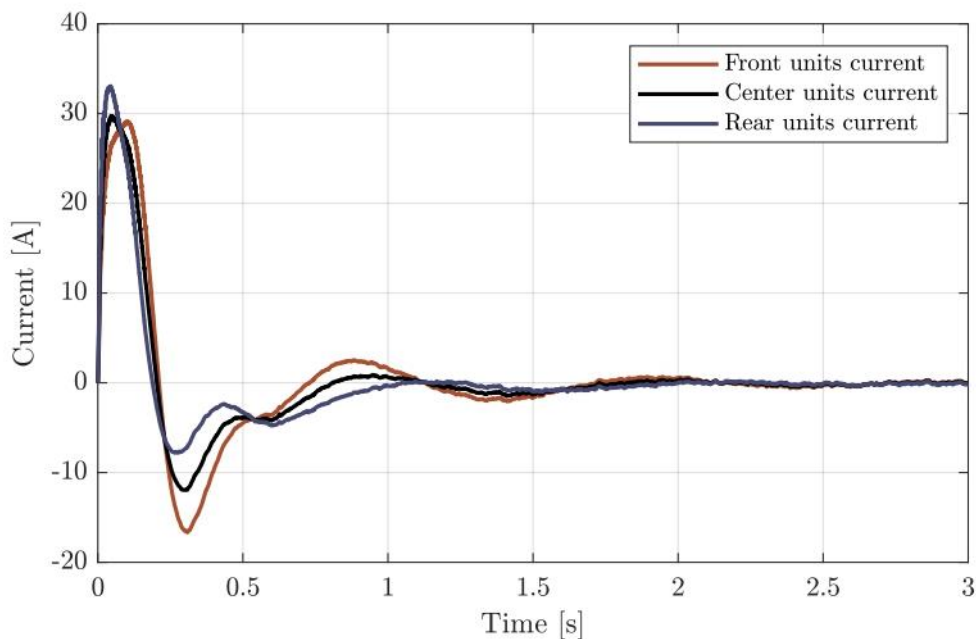


Figura 120. Corrientes HEMS simulación despegue

En esta grafica se aprecia cómo se necesita un pico alto de corriente para comenzar a realizar el despegue, esto tiene sentido puesto que estamos prácticamente en la zona límite del rango de control.

Este alto valor de corriente pico unido a los retrasos en el sistema son los principales causantes de que la corriente no decrezca lo suficientemente rápido como para que el control actúe a tiempo, produciéndose la sobreoscilación ya vista. Como medida correctiva para ayudar a corregir esa sobreoscilación se aplica corriente negativa consiguiéndose con esto estabilizar el sistema de forma más rápida, también se aprecia una zona en la que las corrientes que tenían diferentes valores convergen esto se explica por la necesidad de corregir principalmente la rotación en Y.

A pesar del pico de corriente y de la variación brusca de la misma, el sistema se consigue estabilizar dentro de los márgenes especificados y cumpliendo los requerimientos. También se puede apreciar cómo una vez el sistema está estabilizado en la distancia nominal de levitación y estabilizado el consumo de corriente es muy cercano a cero cumpliéndose otro de los requerimientos impuestos.

También se mostrará cómo se realiza el seguimiento entre la corriente real aplicada y la calculada por el control.

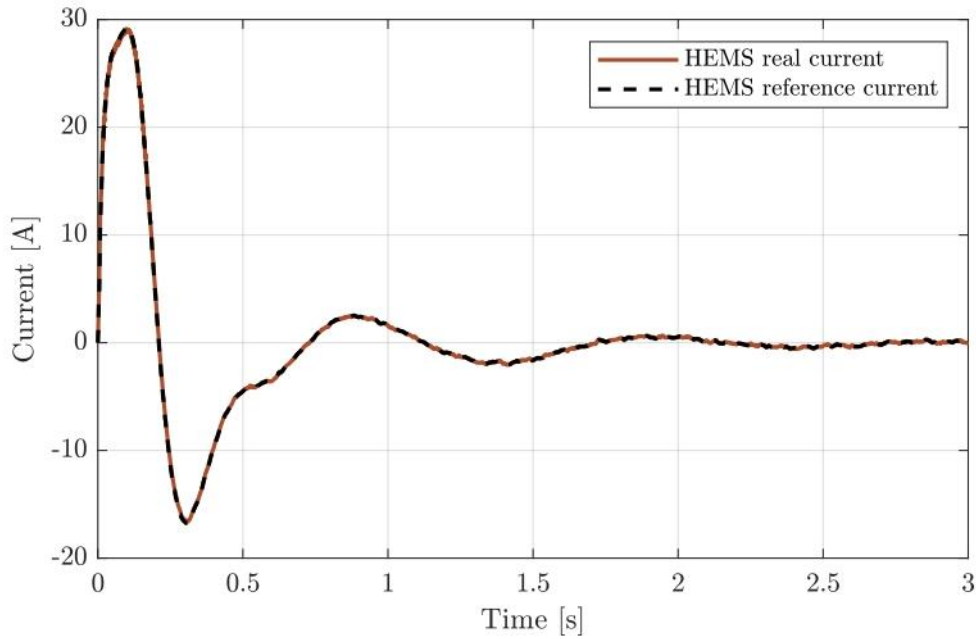


Figura 121. Seguimiento corriente HEMS simulación despegue

Al igual que en la simulación anterior se aprecia como el seguimiento de la corriente de referencia es muy bueno, existiendo un pequeño desfase que no es apreciable.

El mismo proceso se realiza para los EMS, presentándose primero las corrientes consumidas.

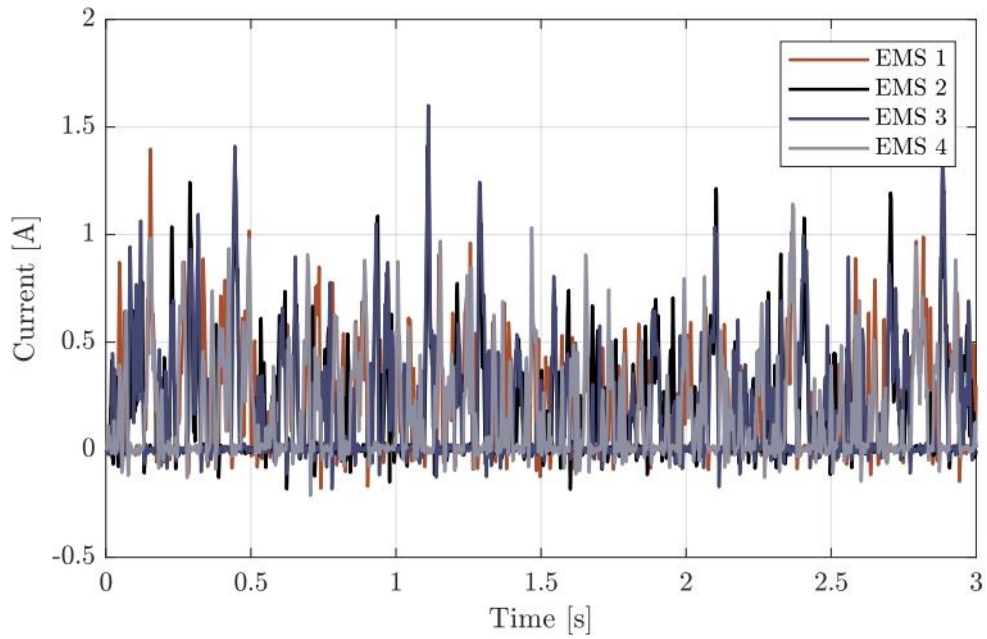


Figura 122. Corrientes EMS simulación despegue

De nuevo puesto que no existen perturbaciones la corriente necesaria es teóricamente nula, habiendo pequeños picos de activación debido a ruidos, retrasos etc. Estas pequeñas activaciones también pueden verse como perturbaciones, pero no lo suficientemente relevantes. Por último, se muestra el seguimiento de la referencia para estas unidades.

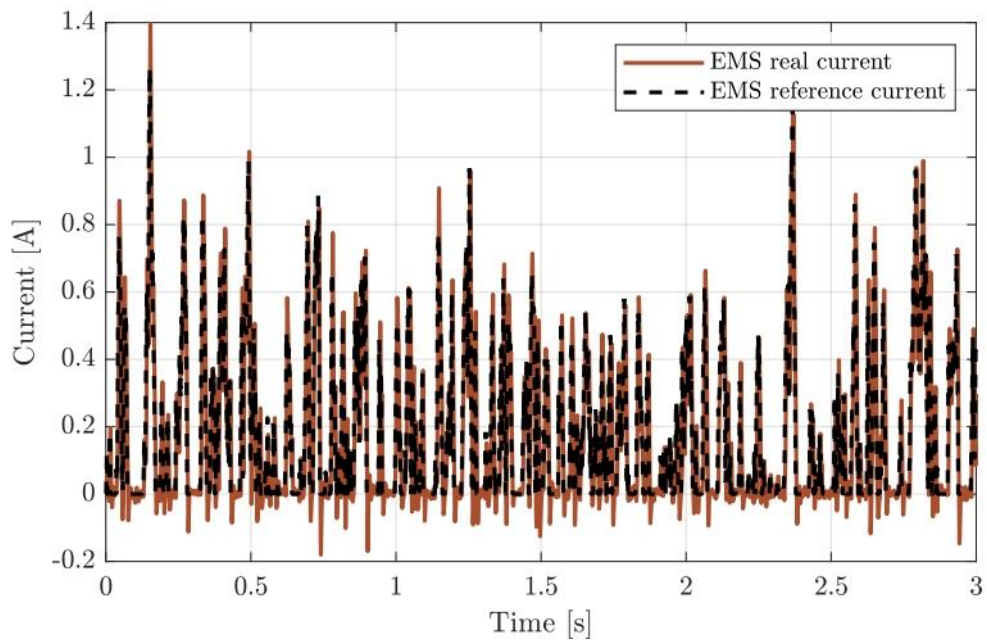


Figura 123. Seguimiento corriente EMS simulación despegue

En este caso se puede apreciar mejor el efecto de los retrasos y del ruido ya que la corriente de referencia está limitada a 0 A pero se puede ver como se sobrepasa, ocurriendo esto también para valores pico. También se aprecia mejor el retraso que existe, aunque de nuevo el seguimiento de la corriente es bueno.

4.5.2.3. Aterrizaje

Como última simulación de las diferentes fases se hará una simulación de cómo se realiza el aterrizaje del vehículo, en este caso se pasará de la distancia de levitación nominal de 17,5 mm a los 22,5 que se considera el suelo. Para realizar este aterrizaje se modificará la referencia mediante un cambio de rampa de forma que se haga de la forma más suave posible.

La variación de la posición en Z es tal como se muestra a continuación.

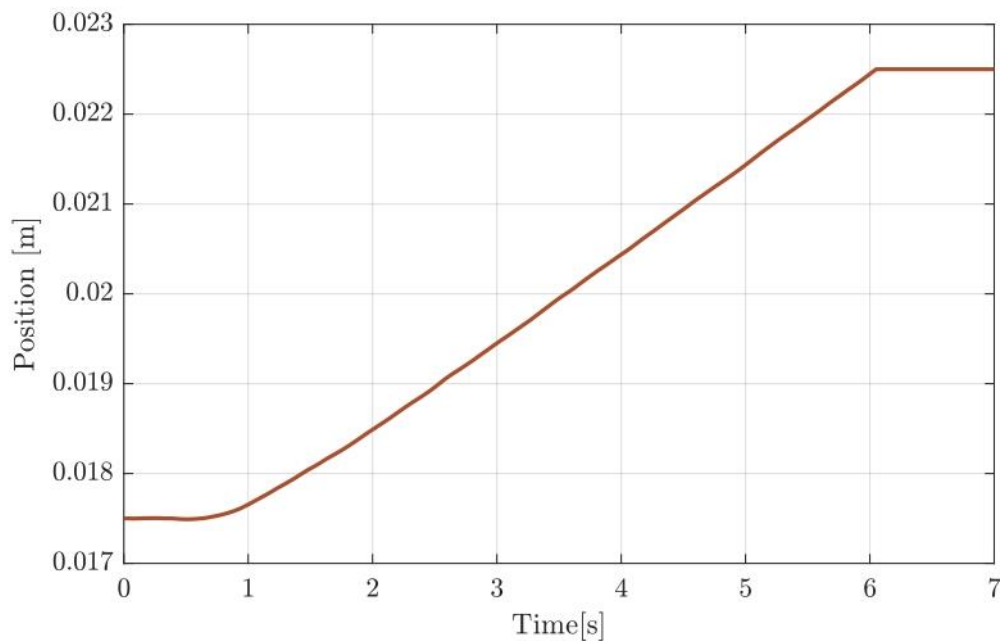


Figura 124. Posición Z simulación aterrizaje

Se aprecia como el seguimiento de la referencia de rampa se sigue de forma correcta y se realiza un aterrizaje suave. Respecto al cabeceo los resultados de la simulación son los presentados.

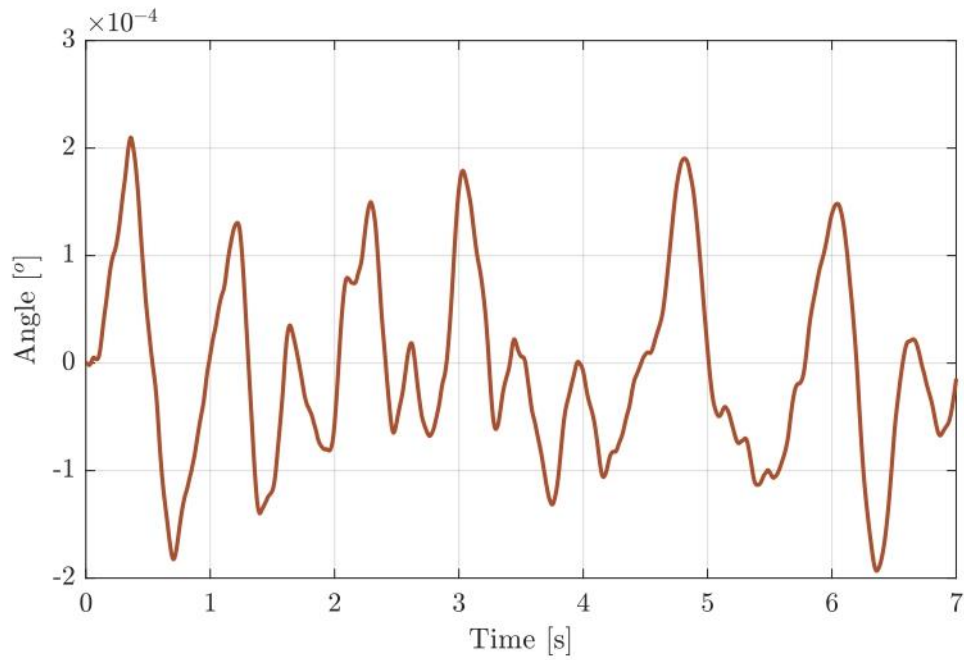


Figura 125. Rotación Y simulación aterrizaje

Existe una variación debido a que el control trata de estabilizar la rotación, pero el cambio de referencia le afecta de forma que no consigue que el valor se estabilice en torno a cero, en cualquier caso, la oscilación es pequeña y no debería ser un problema de cara al aterrizaje.

La posición en Y no se verá afectada por fuerzas externas y el comportamiento que presenta será muy similar a la vista anteriormente. Si bien es cierto que una vez se “alcanza” el suelo se produce una perturbación debido a como se implementó este elemento por lo que no se considerara un problema.

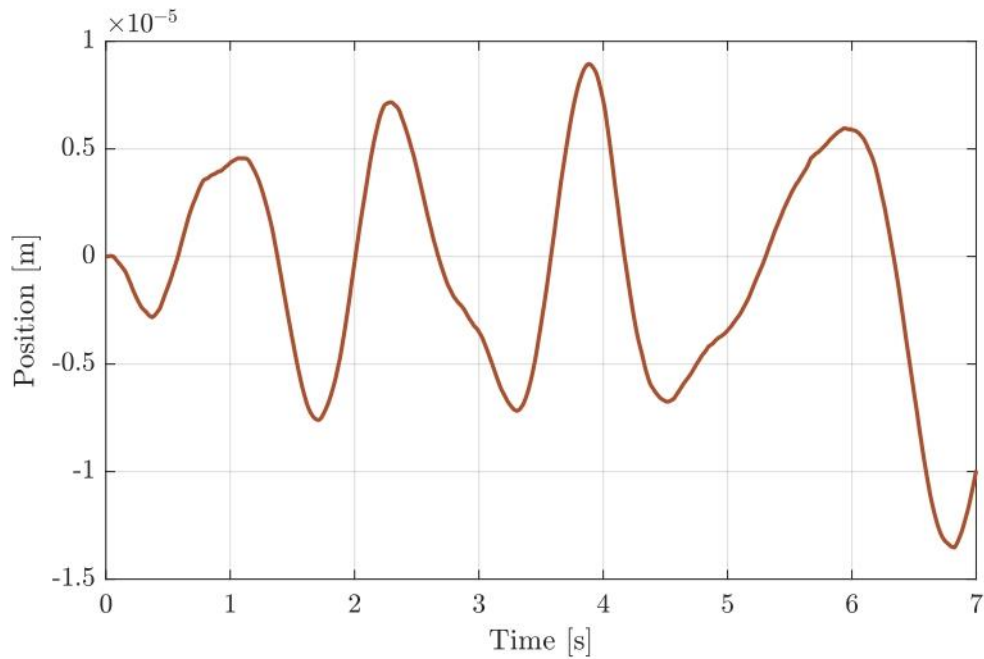


Figura 126. Posición Y simulación aterrizaje

Por último, se consultará la variación de las dos rotaciones restantes

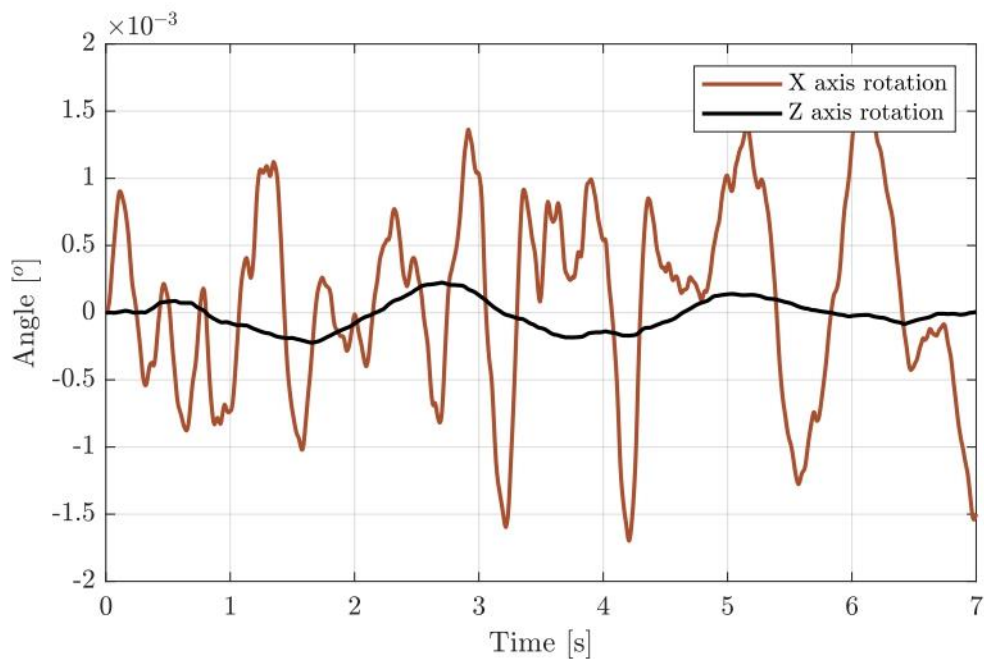


Figura 127. Rotaciones X y Z simulación aterrizaje

Se aprecia como la guiñada no presenta grandes oscilaciones, sin embargo, el alabeo si siendo de magnitud mayor que las vistas hasta ahora debido a los problemas de diseño que ya se comentaron. A pesar de ello la magnitud de la rotación hace que no se considere un problema.

A continuació, se presentarà la corrent consumida en el HEMS per a este procés.

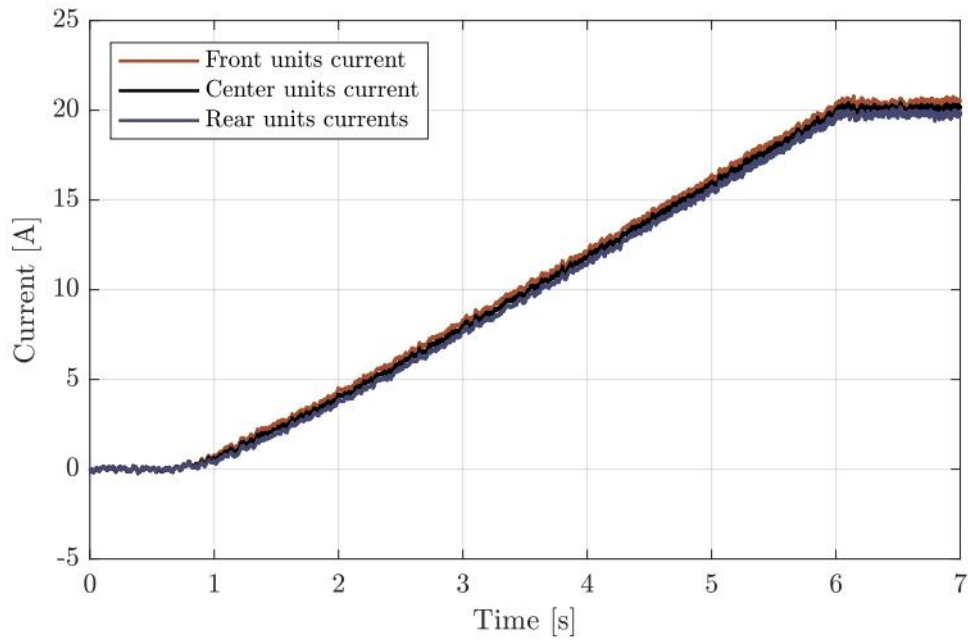


Figura 128. Corrientes HEMS simulació aterrizaje

Se aprecia cómo se parte del punto en el que no se consume corriente y esta va aumentando progresivamente para lograr alejarse de forma controlada hasta que se estabiliza en 20 A que es la corriente que se corresponde para esa distancia, en la realidad aquí se apagarían las unidades, aunque en la simulación se continua. También se comprobará el seguimiento de la corriente.

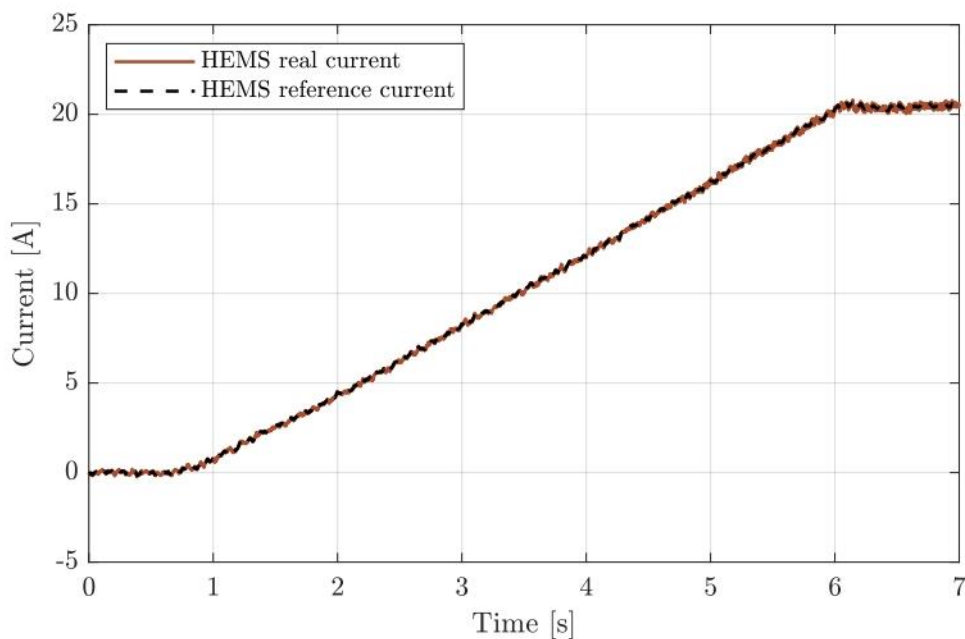


Figura 129. Seguimiento corriente HEMS simulación aterrizaje

Se aprecia igual que en el resto como el seguimiento de la misma a pesar de los ruidos, retrasos, etc. es buena. También puesto que no hay perturbaciones transversales se decide no presentar la corriente en los EMS ya que su comportamiento es idéntico al presentado para el resto de las simulaciones.

4.5.2.4. Levitación estática completa

En la última simulación se presentará el ensayo completo de la levitación que se planea de duración de 60 segundos. En este ensayo se comenzará con el vehículo en el suelo, se realizará el despegue, se mantendrá la levitación durante el tiempo necesario para determinar que es estable y se aterrizará. Los objetivos a demostrar mediante este ensayo son los siguientes:

- Demostrar que el sistema de control desarrollado para la tecnología de levitación es capaz de estabilizar el vehículo.
- Probar que el vehículo es capaz de despegar desde el suelo de forma autónoma.
- Probar que el vehículo es capaz de mantenerse estable a la distancia de levitación marcada con un consumo de corriente casi nulo.
- Probar que el vehículo es capaz de realizar el aterrizaje de forma autónoma.
- Demostrar que el sistema de control es capaz de gobernar el comportamiento del vehículo en todo el rango de operación y bajo las condiciones impuestas.

La siguiente simulación se trata únicamente de una composición de las vistas anteriormente, las cuales se deciden presentar de forma independiente para mejorar su visualización. Sin embargo, el comportamiento será idéntico al presentado en estas para el despegue y aterrizaje. Durante la fase de levitación estable al no existir más perturbaciones que las inestabilidades que se pueden generar por los ruidos y los retrasos. Por esto no se hará especial hincapié en las explicaciones de la simulación conjunta al considerarse que ya se han explicado de forma más detallada.

La posición en Z durante toda la simulación se muestra a continuación.

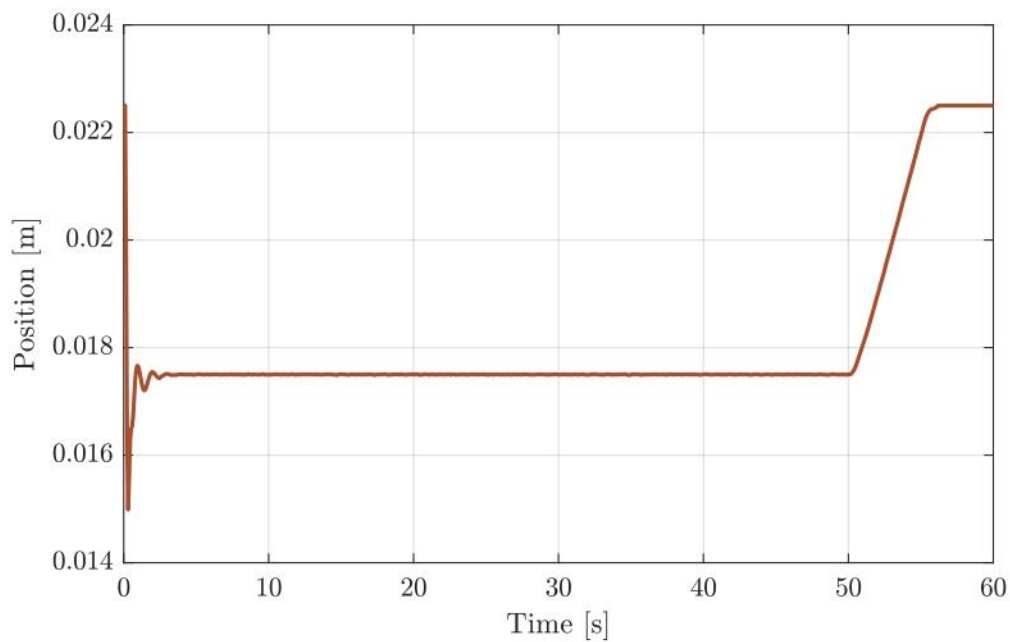


Figura 130. Posición Z simulación levitación estática

Se puede ver como el comportamiento en el despegue y aterrizaje es idéntico al presentado y como durante la fase intermedia la levitación es muy estable siendo las inestabilidades tan pequeñas que no pueden apreciarse debido a la escala.

De la misma forma la posición en Y es tal y como se muestra.

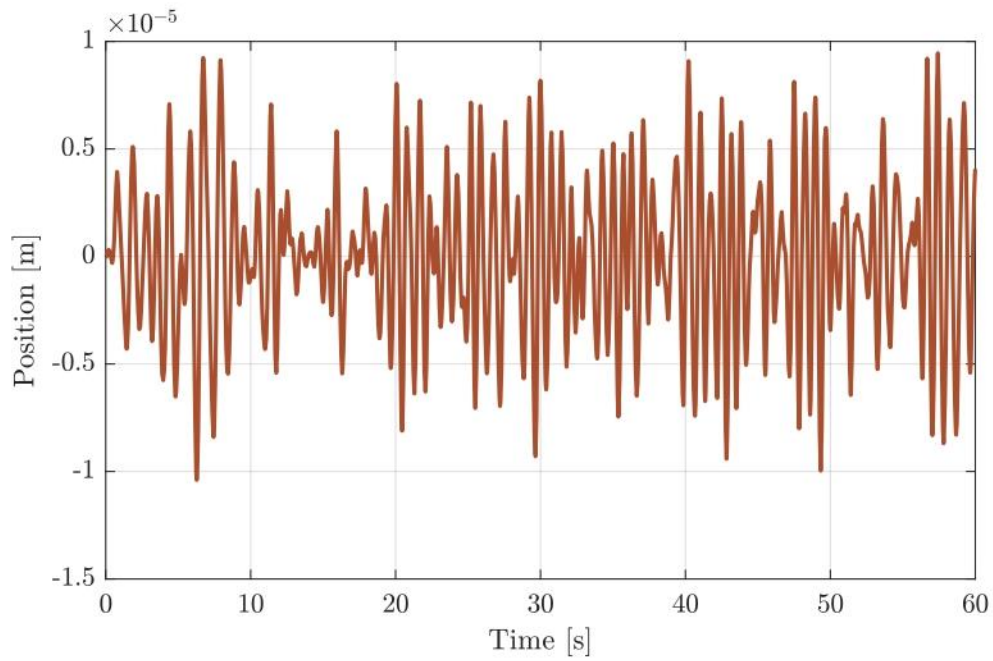


Figura 131. Posición Y simulación levitación estática

Se aprecia como existe el comportamiento oscilatorio ya presentado y comentado, que se comprueba cómo se mantiene dentro de esos valores y de nuevo al ser la magnitud pequeña se da como valido.

El comportamiento del cabeceo a lo largo del ensayo es el siguiente

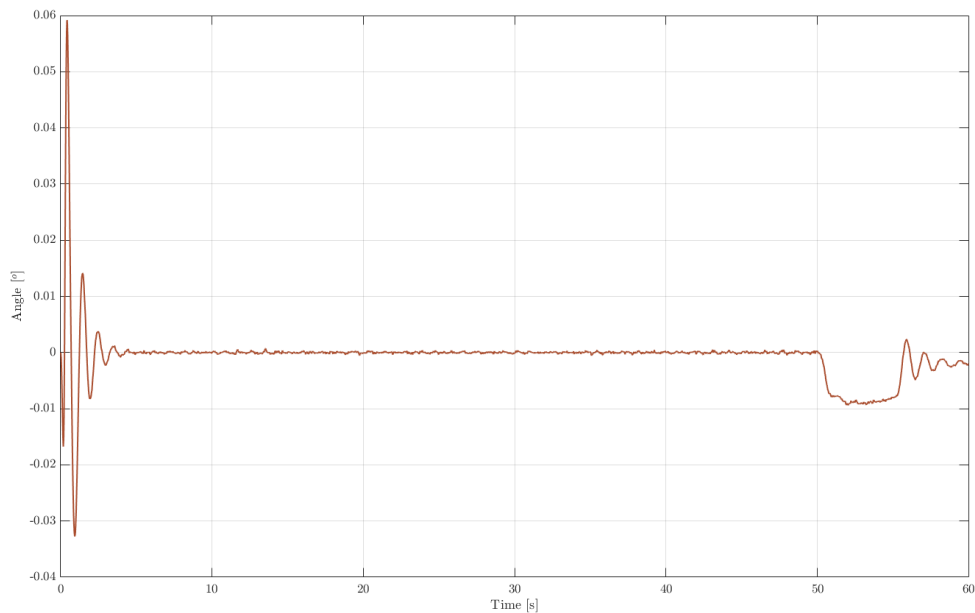


Figura 132. Cabeceo durante simulación levitación estática

Se puede apreciar como a diferencia de la simulación del despegue por separado en este caso existe una mayor perturbación de este ángulo esto puede ser debido a que como el control durante el periodo de tiempo anterior hubiese acumulado acción integral y que por lo tanto al realizar la rampa afecte de distinta forma a esta variable, aun así, los valores de la misma no son demasiado grandes y no supondrán un problema durante el aterrizaje.

Por último, se presenta la variación del alabeo y guiñada

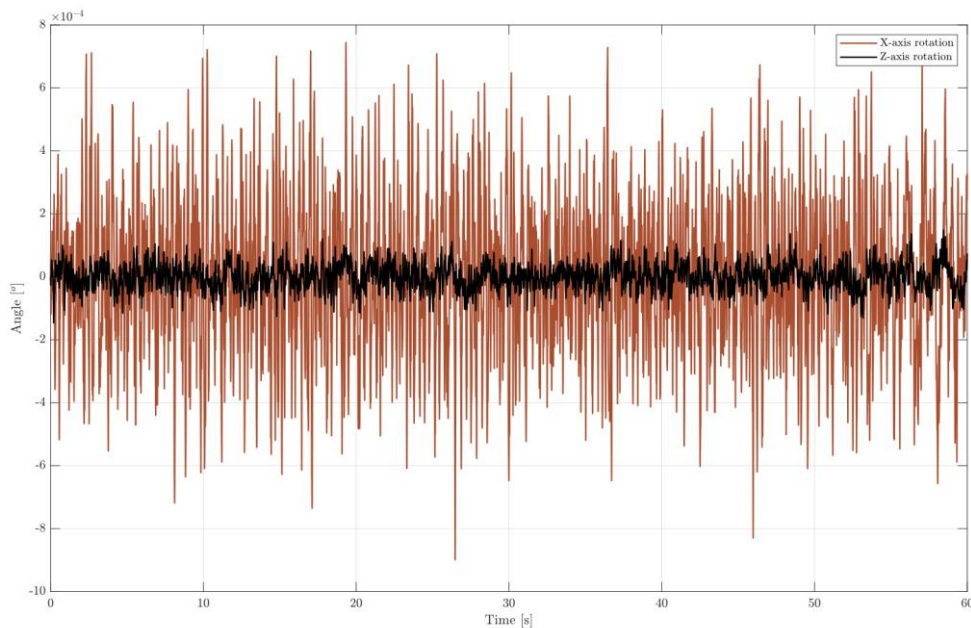


Figura 133. Evolución guiñada y alabeo durante simulación levitación estática

Se ve como se esperaba que estas dos variables presentan un comportamiento irregular debido a los ruidos y retrasos, sin embargo, igual que para las simulaciones más detalladas la magnitud de estas oscilaciones es pequeña y está estabilizada en esos valores por lo que no se considera un problema.

También se presentará la corriente en los HEMS con el mismo formato que hasta ahora.

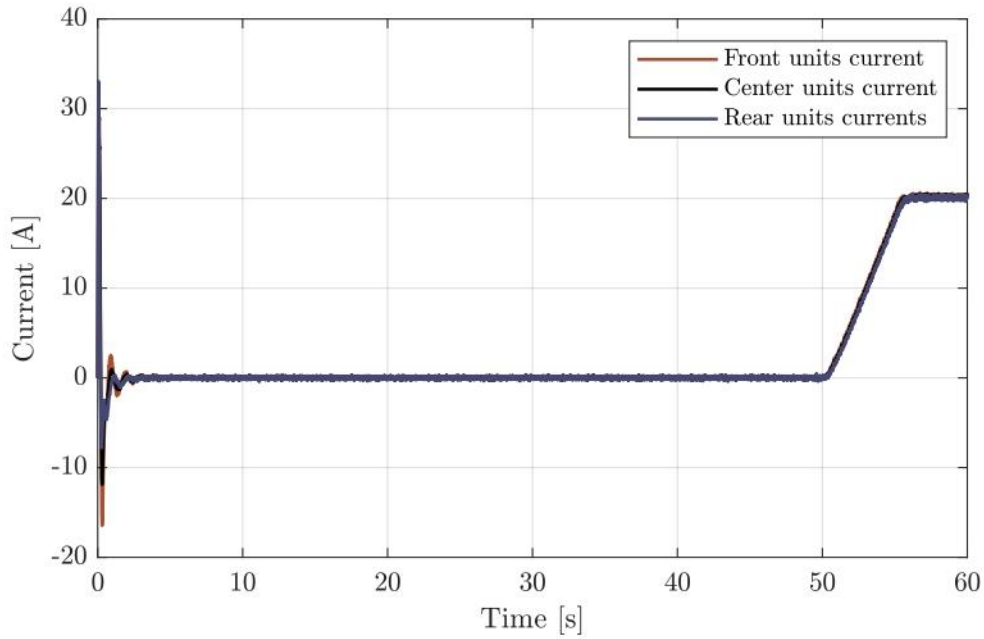


Figura 134. Corrientes HEMS durante simulación levitación estática

Se aprecia también como el comportamiento durante aterrizaje y despegue es igual. Y durante la fase de levitación se consigue que esta se realice con un consumo casi nulo de corriente. El seguimiento de la corriente no se muestra en este caso puesto que es idéntico al presentado durante los ensayos previos.

La corriente en los EMS es la siguiente.

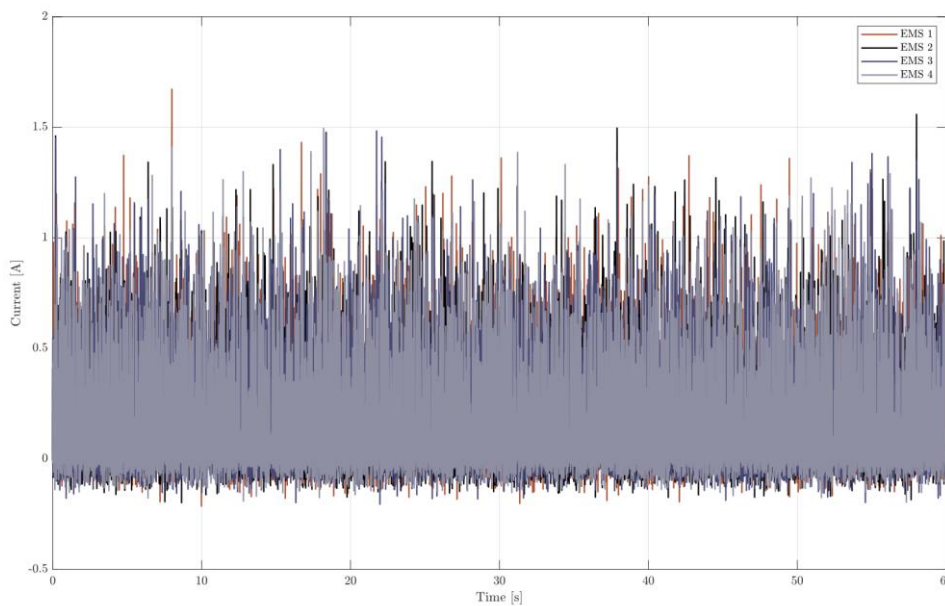


Figura 135. Corriente EMS durante simulación levitación estática

Al no activarse el motor durante este ensayo no existen perturbaciones significativas y como se vio en el resto de simulaciones la activación de estas unidades es mínima.

Por último, se recogerán algunos de los valores más significativos obtenidos para esta simulación.

Tabla 11. Valores levitación estática

Parámetro	Valor
Posición despegue	22,5 mm
Tiempo de establecimiento despegue	2 seg
Sobreoscilación despegue	14,857 %
Posición máxima alcanzada	14,9 mm
Corriente pico máxima HEMS	33,4 A
Corriente pico máxima EMS	1,73 A
Consumo corriente medio levitación	1,34 A

4.5.3. Levitación dinámica Auran

Para las simulaciones de la levitación dinámica, es decir con el motor activo y por lo tanto todas las fuerzas que aparecen debido al movimiento. El modelo usado para esta simulación será el mismo que el que usamos para la levitación estática, en este caso se activara un flag que hará que se incluyan las fuerzas correspondientes a la dinámica. Sin embargo, las consideraciones son las mismas que ya se consideraron.

En este ensayo no se presentarán fases intermedias ya que son las mismas que para la levitación estática, siendo la dinámica una “ampliación” de esta. La simulación se iniciará con el sistema ya en el punto de levitación nominal y se procederá con el accionamiento del motor que acelerará y frenará mientras que el sistema de control debe soportar la perturbación introducida por este. Adicionalmente se plantea por seguridad que durante la última etapa de la simulación la referencia se modificara para que esté más cerca del suelo en el momento que se produzca el freno neumático, de forma que se garantiza que el vehículo cae al suelo y no se pega el techo.

Las fases específicas de esta simulación serán las siguientes:

- Comienzo de la simulación en el punto de levitación nominal
- Comienzo de la fase de aceleración hasta que se alcanzan los 15 km/h

- Una vez alcanzada comienza la fase de frenado magnético que durara hasta que se frena a 1,5 km/h
- En ese momento se desactivará el motor y se dejará que el vehículo se desplace por inercia hasta que cambia la referencia y está estabilizado
- El vehículo se frenará usando el freno neumático para asegurar que se detiene totalmente, en este momento se desactiva la levitación y propulsión

Todo este proceso se realizará teniendo en cuenta que el tubo cuenta únicamente con 20 m de longitud total y que se debe dejar un margen de seguridad en caso de fallo de alguna de las fases.

El perfil de velocidad y aceleración que se espera obtener durante el recorrido es el siguiente

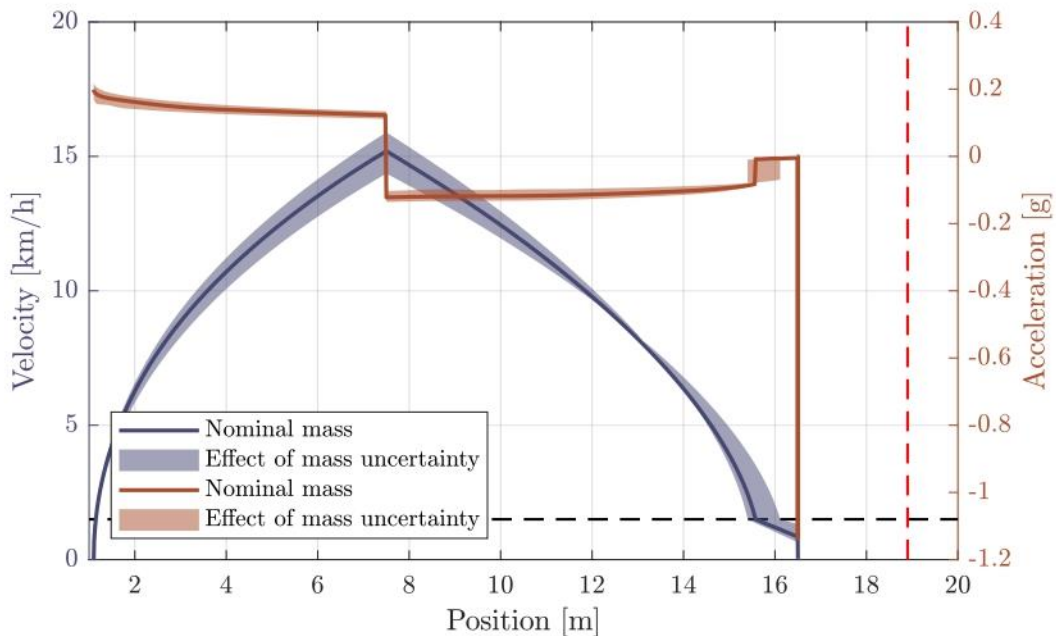


Figura 136. Perfil de aceleración y velocidad esperados en levitación dinámica

Y sus principales valores los que se presentan a continuación

Tabla 12. Valores esperados durante demostración

Parámetro	Valor
Distancia total recorrida [m]	16,5
Velocidad máxima [km/h]	15,08
Aceleración máxima [g]	0,18
Deceleración máxima [g]	-1,18
Tiempo de demostración [seg]	9,42

Con estos parámetros definidos se realiza la simulación el objetivo de esta es demostrar la robustez del sistema y que será capaz de resistir la perturbación introducida por el motor, lo cual unido al comportamiento estable que ya ha presentado servirá como validación final del sistema de control.

Primeramente, se presentará la variación de la posición en Z

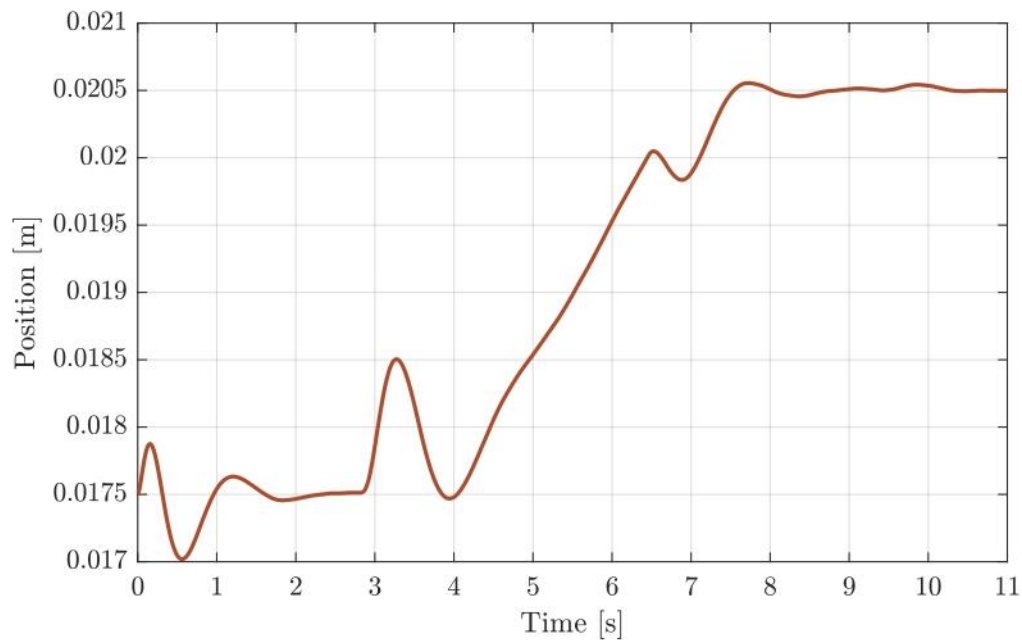


Figura 137. Posición Z simulación levitación dinámica

Se aprecia como el sistema sufre perturbaciones principalmente en tres puntos, primero al inicio de la fase de aceleración correspondiéndose con la aparición de la fuerza de propulsión. Después una perturbación de efecto mayor cuando se pasa de la fase aceleración a frenada ya que en este punto se pasa de una fuerza positiva a una negativa en el motor produciendo por lo tanto una mayor perturbación. Y por último en el momento que el motor deja de frenar ya que la desaparición repentina de esa fuerza también provoca una perturbación. Independientemente de estas se aprecia como el sistema es capaz de amortiguar estas perturbaciones y regresar a la referencia marcada en cada momento sin presentar una oscilación o tiempo de establecimiento demasiado grandes, verificando la robustez del sistema.

Otra variable crítica será el cabeceo cuya evolución se muestra a continuación.

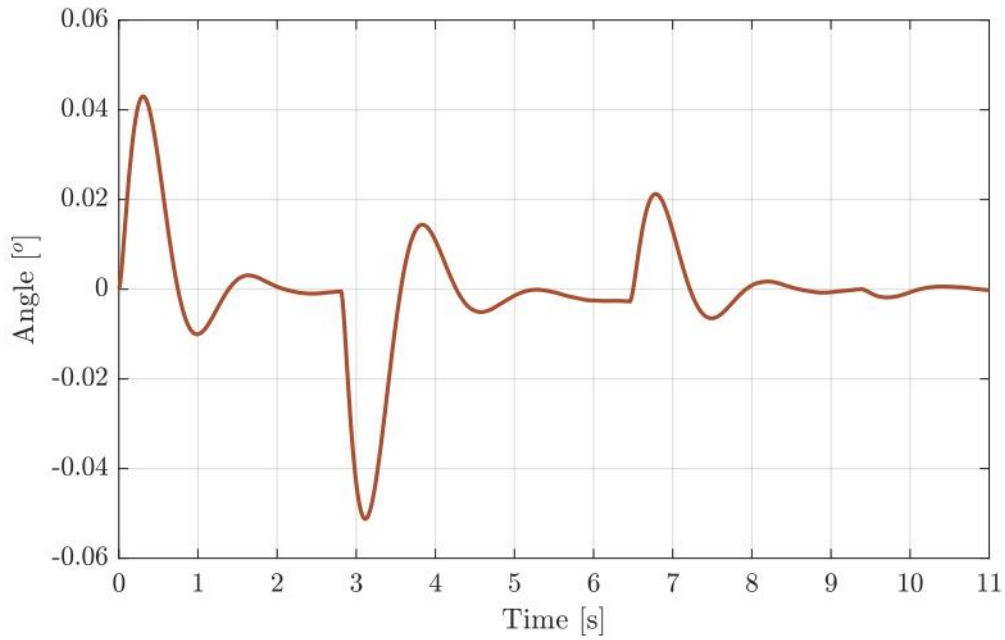


Figura 138. Rotación Y simulación levitación dinámica

Se aprecia igual que para la posición las tres zonas en las que se producen las principales perturbaciones, aunque la magnitud de la perturbación que se genera en este caso es mayor que las vistas hasta ahora sigue manteniéndose dentro del rango de trabajo quedando margen y compensándose de forma correcta para llegar a cero de nuevo asegurando de esta forma el buen funcionamiento del sistema.

En esta ocasión a diferencia de lo que ocurría en las ocasiones anteriores al estar activado el motor este si introducirá fuerzas transversales que perturbaran la posición en Y. La consideración de estas es que su magnitud dependerá de la corriente y velocidad y se aplicaran en un sentido u otro dependiendo de la fase, resultando en una evolución de la posición en Y como la que se muestra.

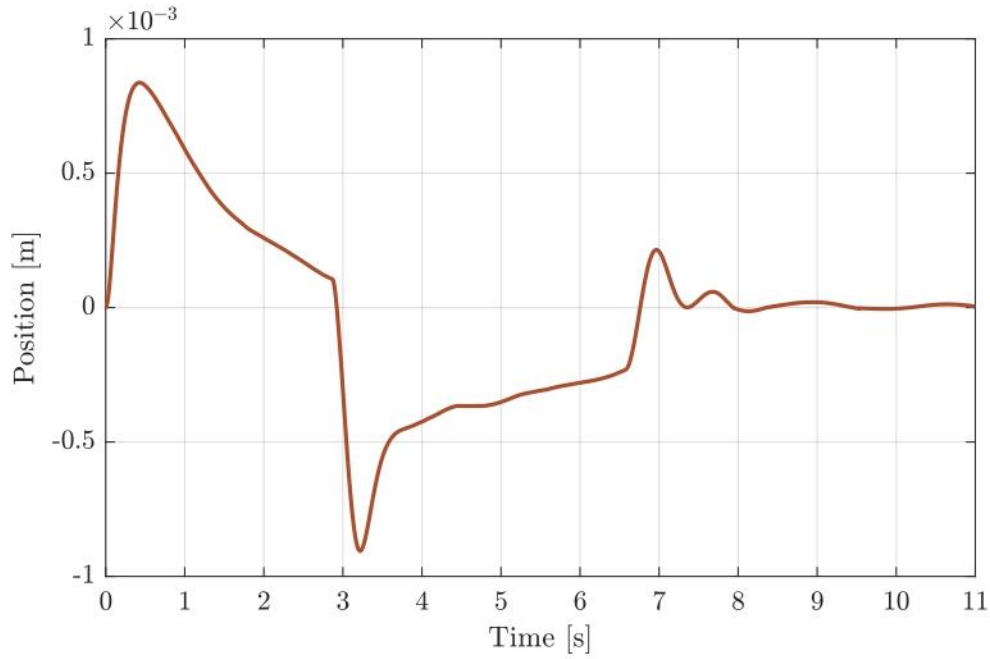


Figura 139. Posición Y simulación levitación dinámica

Vemos como en este caso las fuerzas si introducen un cambio significativo en la posición en Y, se aprecia también como la respuesta en este eje es más lenta y menos agresiva que la que se produce en otros, esto se hace de forma deliberada ya que un comportamiento agresivo de los EMS podría desestabilizar demasiado el sistema y a pesar de la respuesta suave el sistema consigue estabilizarse y nunca se sale del rango a pesar de las perturbaciones que se presentan.

Por último, se presenta la variación de las rotaciones en Z y X.

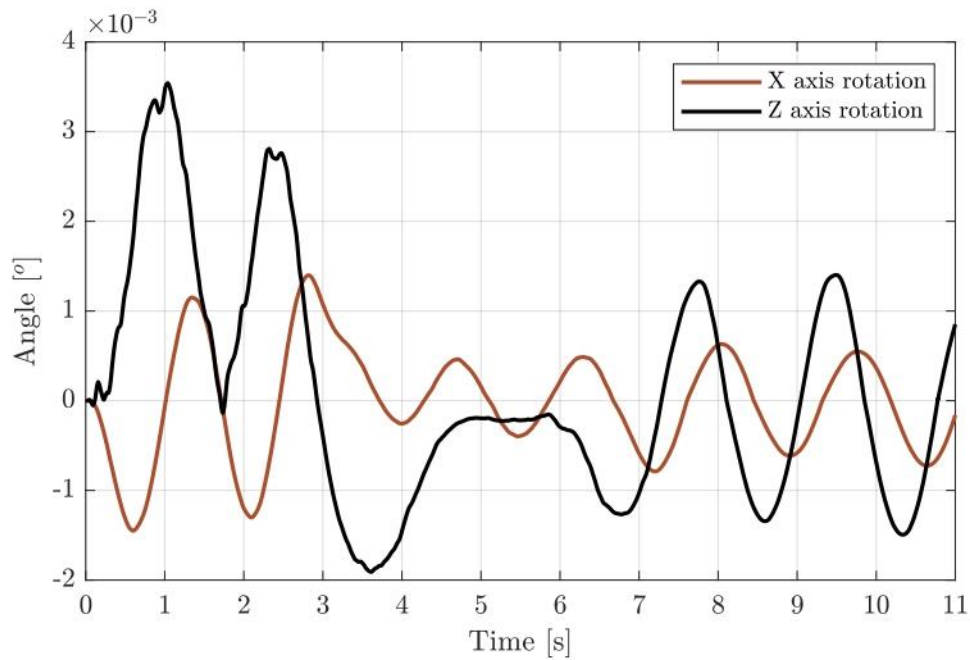


Figura 140. Rotaciones X y Z simulación levitación dinámica

En esta ocasión al contrario de lo que pasaba en las anteriores simulaciones la guiñada está más afectada que el alabeo, este sigue manteniendo el comportamiento oscilante pero dentro de valores que hemos visto hasta ahora y que se mantienen. Respecto a la guiñada el efecto de las fuerzas transversales genera que el vehículo se gire y unido a la corrección suave que presentan los EMS hace que la corrección de esta sea también lenta y acabe con un comportamiento oscilante también ya que la disipación se produce de forma lenta. En cualquier caso, las magnitudes de esta unidas a que en la graficas se presentan las máximas que habrá (se comprueba mediante varias simulaciones) hace que se considere el comportamiento de estas variables como bueno.

Ahora se presentará bajo las mismas consideraciones que se han ido siguiendo las corrientes de los HEMS

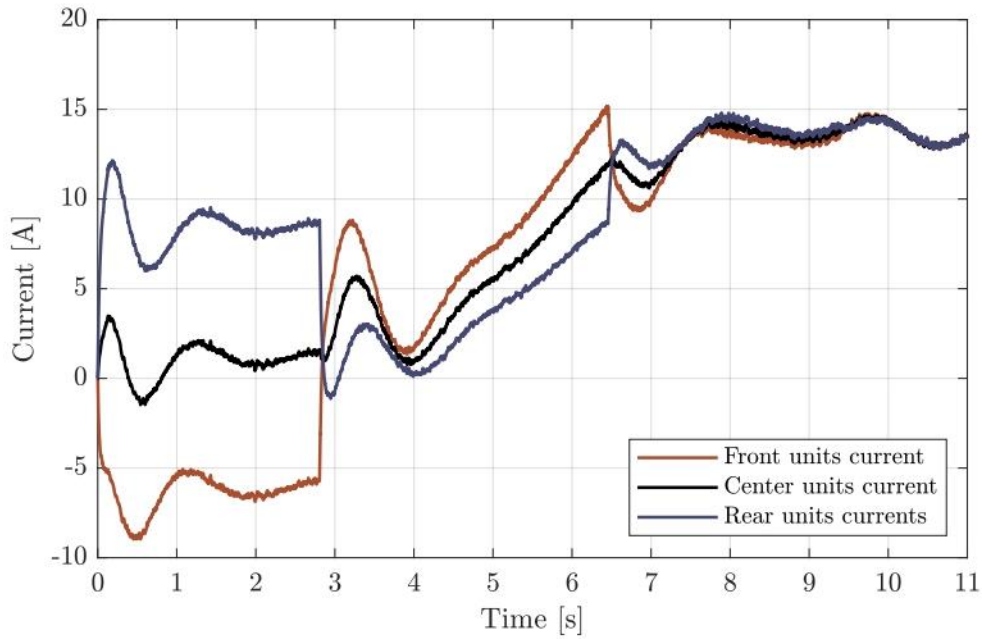


Figura 141. Corrientes HEMS simulación levitación dinámica

En las corrientes también se puede apreciar cómo es la respuesta ante las tres perturbaciones. Inicialmente se ve como las corrientes de las unidades traseras y centrales aplican corriente positiva mientras que las traseras negativas esto se hace para corregir el cabeceo lo más rápido posible mientras también se estabiliza la posición en Z en el nuevo estado en el que hay una fuerza. Después cuando se produce el cambio entre aceleración y frenada se aprecia como las corrientes cambian su sentido puesto que la fuerza que han de compensar ahora genera un momento contrario, también se ve como estas después cambian a fin de llevar el sistema a la referencia deseada y como cuando comienza el cambio de referencia se separan de nuevo para seguir compensando el efecto de la fuerza aplicada. Cuando el motor se desactiva y desaparece la fuerza se vuelve a producir un “cruce” de las corrientes como respuesta para estabilizar el sistema y por último vemos que ante la ausencia de fuerzas externas las corrientes tienden a los mismos valores.

Para este caso el seguimiento de la corriente es como se muestra

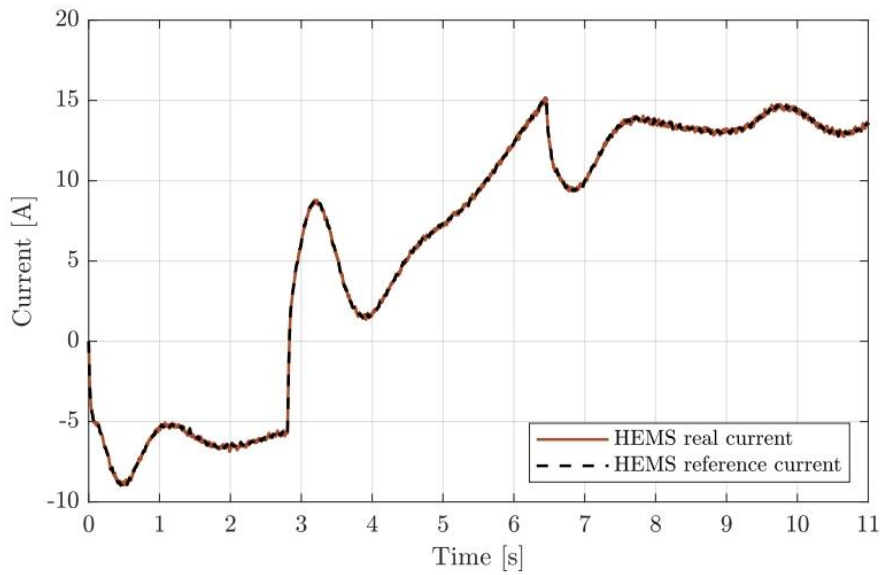


Figura 142. Seguimiento corriente HEMS simulación levitación dinámica

El seguimiento tiene un comportamiento idéntico al presentado en anteriores simulaciones, no habiendo diferencias por el hecho de que se produzca el movimiento.

También se mostrará la corriente en los EMS ya que para este caso si se activaran.

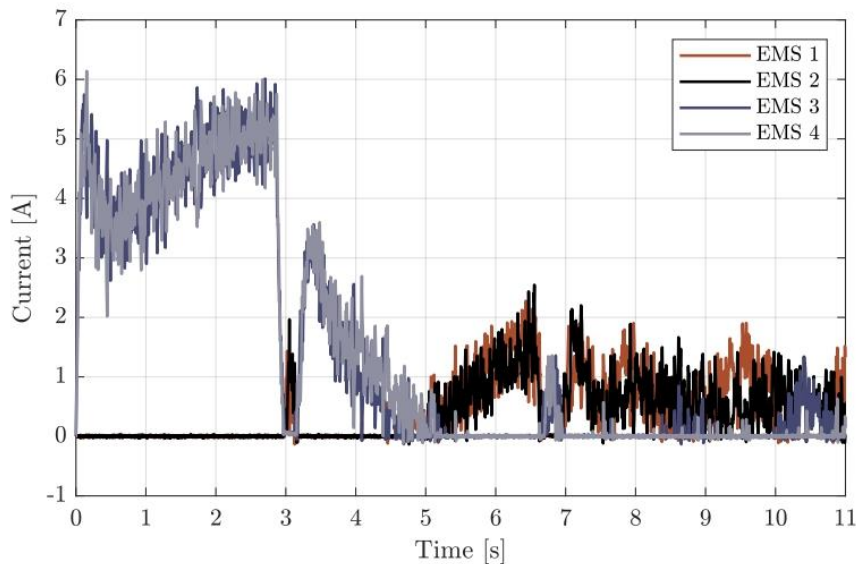


Figura 143. Corrientes EMS simulación levitación dinámica

Debido a como se modela la fuerza transversal del sistema se aprecia como inicialmente solo las unidades de un lado se activan a fin de compensar estas fuerzas, una vez desaparece la fuerza tiende a cero, siendo compensada otra vez por las unidades hasta que se llega al estado final en el que las unidades de cada lado van activándose para ir compensado principalmente la guiñada.

El seguimiento de la corriente se muestra en la siguiente imagen.

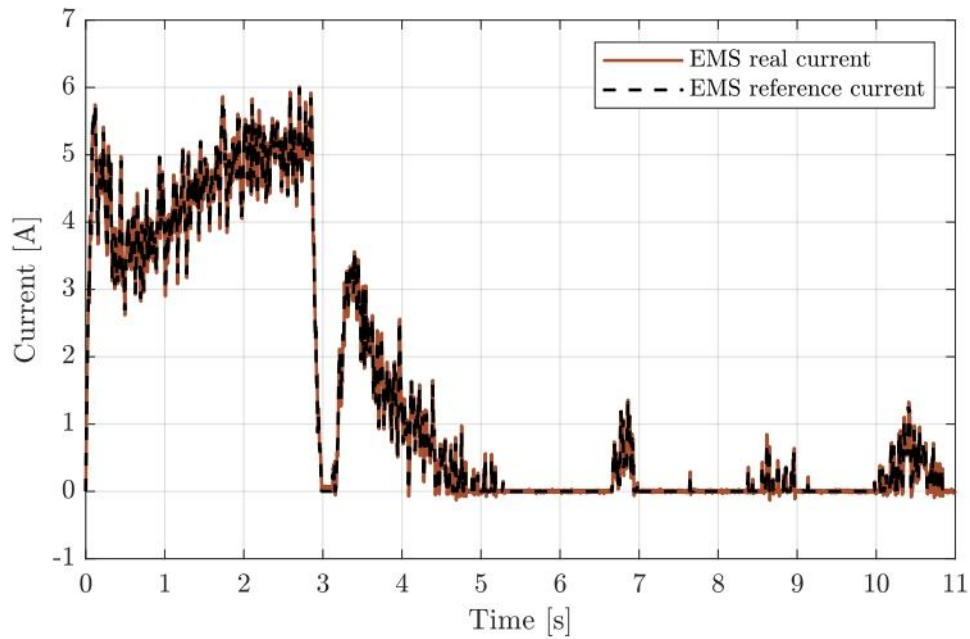


Figura 144. Seguimiento corriente EMS simulación levitación dinámica

Las características del seguimiento no divergen respecto del caso visto en el resto de las simulaciones por lo que no se comentara en detalle.

Por último, se recogerán algunos de los valores más significativos obtenidos para esta simulación.

Tabla 13. Valores levitación dinámica

Parámetro	Valor
Tiempo de establecimiento perturbación	1,5 seg
Sobreoscilación perturbación	5,72 %
Posición Z máxima	17 mm
Posición Y máxima	-0.86 mm
Cabeceo máximo	- 0,56 °
Alabeo máximo	- 1,4 °
Guiñada máxima	3,4E-3 °
Corriente pico máxima HEMS	15 A
Corriente pico máxima EMS	6,02 A
Consumo corriente medio levitación	7,82 A

4.6. Implementación y resultados

En esta sección se tratará el cómo se ha realizado la implementación del control diseñado en MATAB para su uso en sistemas embebidos, así como se tratará todas las necesidades y requerimientos surgidos durante la etapa de testing y los ajustes que se necesitaron realizar, mostrándose también el resultado final del control sobre la bancada de levitación y sobre el vehículo [26]. Así como las medidas de seguridad adoptadas durante el proceso de testeo.

4.6.1. Implementación del control

Antes de proceder a presentar los resultados experimentales y hablar sobre el proceso de testing se abordará como se ha realizado la discretización de todos los elementos del control. Este tema no se abarcará en gran detalle ya que parte de la implementación es directa con las ecuaciones presentadas y además se proporcionará el código.

Primero se tratará la implementación como ecuaciones en diferencias de los filtros paso bajo usados, estos ya se diseñaron de forma discreta por lo que su implementación será trivial. Tomaremos como ejemplo el filtro del air gap al ser el de mayor orden siendo el resto idénticos

$$\text{Filtro air gap } (z) = \frac{0,02008 \cdot z^2 + 0,04017 \cdot z + 0,02008}{z^2 - 1,561 \cdot z + 0,6414} \quad (29)$$

$$y_k = 0,02008 u_k + 0,04017 u_{k-1} + 0,02008 u_{k-2} + 1,561 y_{k-1} - 0,6414 y_{k-2}$$

Donde la segunda expresión corresponderá a la implementación en ecuación en diferencias siendo y_k la salida en cada instante, u_k la salida en cada momento k ($k-1$ implica el anterior valor, $k-2$ el valor hace dos muestras, etc.) y y_{k-n} los valores de las salidas anteriores.

Continuando con la implementación el algoritmo para transformar los air gaps a posiciones y rotaciones será simplemente el cálculo de las ecuaciones presentadas en la ecuación 12. Siendo la única consideración tomada que para la implementación de las

funciones trigonométricas se usara una look-up table de forma que no se asume el coste computacional de realizar las mismas.

El siguiente elemento a discretizar será el responsable de obtener la derivada a partir de varios incrementos, la implementación de este algoritmo se realiza mediante la ecuación en diferencias mostrada que se presentó en la ecuación 14 durante la fase de diseño. Mostrándose ya esa ecuación en forma de diferencias y por lo tanto siendo su implementación en un microcontrolador trivial.

Una vez discretizados esos elementos que se corresponden con la adquisición y procesamiento de los datos se procederá a la discretización para la implementación de los propios controladores.

Comenzando con el control PI, en este caso el diseño del controlador en el lugar de las raíces se realiza en continuo dando como resultado el controlador mostrado en la sección correspondiente. A partir de este controlador se obtiene su forma discretizada mediante el uso de la transformación tustin en MATLAB ya que esta transformación nos ofrece un buen mapeo entre el modelo continuo y discreto. Esta discretización resulta en un controlador en el dominio Z que se puede expresar como ecuación en diferencias tal como se muestra a continuación.

$$PI = k_p \cdot e + k_I \cdot Int_{error} \quad (30)$$

Donde PI representa la salida del controlador en este caso un porcentaje de duty, k_p y k_I las constantes del control ya discretizadas, e el error calculado como corriente de referencia menos la real y Int la integral del error.

Para obtener esta señal se debe realizar también el cálculo de la integral, esta operación también ha de hacerse de forma discreta existiendo varios métodos para ello, nosotros escogemos por sencillez y porque se comprobó que la precisión es suficientemente buena el método trapezoidal. Quedando la expresión de la integral de la siguiente forma.

$$Int_k = Int_{k-1} + \left(\frac{x_k + x_{k-1}}{2} \right) dt \quad (31)$$

Donde Int_k es el valor de la integral en el instante k , x_k el valor de la variable usada para la integración en el instante k y dt el periodo con el cual se calcula la integral.

Por último, se necesitará discretizar para implementar también el control por espacio de estados. Puesto que el proceso es el mismo para la bancada de levitación y para el control del vehículo completo se presentará la implementación del vehículo completo.

En este caso el proceso que se realiza es obtener las matrices del modelo de espacio de estados de la misma forma que se había hecho hasta ahora, pero mediante el comando `dlinmod` de MATLAB indicando la frecuencia a la que se ejecuta el control resultando esto en las matrices que representan el modelo ya discretizado. Una vez hecho esto se discretizarán también los polos obteniéndose de la siguiente forma.

$$Polos_{dis} = e^{polos_{con} \cdot T} \quad (32)$$

Donde $polos_{con}$ son los polos calculados de forma continua y T el periodo de discretización.

Una vez se ha obtenido las matrices y polos de forma discreta se puede de nuevo mediante el comando `place` de MATLAB obtener la matriz de ganancias que se deberán aplicar al sistema discreto.

La implementación en diferencias de este control se basará en la aplicación de las ganancias calculadas a las variables de estado dando como resultado las salidas. Para mostrar el proceso de implementación se tomará como referencia el control de los HEMS este tendrá una matriz de ganancias de 6×9 que denotaremos de la siguiente forma

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{18} & k_{19} \\ k_{21} & k_{21} & & k_{28} & k_{29} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ k_{51} & k_{52} & \dots & k_{58} & k_{59} \\ k_{61} & k_{62} & & k_{68} & k_{69} \end{pmatrix} \quad (33)$$

En esta matriz cada fila se corresponderá con cada una de las salidas de corriente que obtendremos y cada columna con la ganancia asociada a cada una de las variables siendo el orden el definido durante el modelado que era para la matriz aumentada.

$$x = [z, \dot{z}, \Phi, \dot{\Phi}, \theta, \dot{\theta}, Int_z, Int_\Phi, Int_\theta] \quad (34)$$

Considerando estas ganancias y la definición a partir de la cual se obtiene esta matriz de ganancias (ecuaciones 20, 21, 22 y 23) se puede determinar de forma trivial que la ecuación en diferencias para la implementación del control es la siguiente.

$$\begin{aligned}
 Iref_1 = & -(k_{11}z + k_{12}\dot{z} + k_{13}\Phi + k_{14}\dot{\Phi} + k_{15}\theta + k_{16}\dot{\theta} \\
 & + k_{17}Int_z + k_{18}Int_\phi + k_{19}Int_\theta) \\
 & \dots \\
 Iref_6 = & -(k_{61}z + k_{62}\dot{z} + k_{63}\Phi + k_{64}\dot{\Phi} + k_{65}\theta + k_{66}\dot{\theta} \\
 & + k_{67}Int_z + k_{68}Int_\phi + k_{69}Int_\theta)
 \end{aligned} \tag{35}$$

Obteniéndose el valor de las integrales de igual forma que para el control PI con la expresión vista en la ecuación 31.

Adicionalmente a todos los elementos presentados se deberán implementar otros elementos como puede ser las saturaciones que son necesarios para asegurar el buen funcionamiento de todo el sistema pero que no son parte principal del mismo. En general al tratarse de elementos muy sencillos no se tratará su implementación puesto que es directa.

4.6.2. Testing

Esta sección tiene el propósito de tratar todos los problemas, soluciones, cambios y decisiones adoptadas durante la etapa de testing y que representan una diferencia respecto al sistema diseñado.

Esta sección no pretende ser excesivamente detallada ni extensa a pesar de que la etapa de testeo tanto de la bancada como del propio vehículo suponen durante el proyecto la mayor parte del tiempo. Sin embargo, al tratarse mayormente de un proceso iterativo y del cual muchas de las posibilidades son descartadas se decide no detallar todas ellas sino las más relevantes o las finales aplicadas. Dando mayor peso al resultado final obtenido que representa el mejor comportamiento obtenido y que se mostrara en la siguiente sección.

Uno de los primeros cambios que se realizó respecto al diseño original fue la posición de los sensores de air gap de la parte superior, inicialmente estos se iban a emplazar al lado de sus correspondientes unidades en el lado más cercano al borde del vehículo para poder obtener más mediciones sobre el alabeo, sin embargo debido al ancho de la plancha de acero se detectó que los sensores no estarían dentro de la misma por lo que hubo que relocalizarlos y debido al estado del montaje se colocaron como se muestra en el siguiente diagrama.

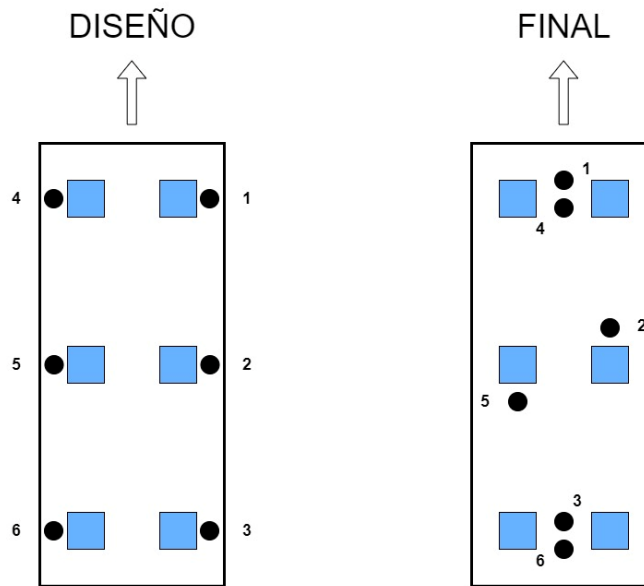


Figura 145. Nueva posición sensores de air gap

Con esta nueva disposición se pierde capacidad de medición sobre el alabeo lo cual supondrá un problema para el sistema final sin embargo se buscaron soluciones para separar los sensores de las unidades 1, 3, 4 y 6 pero no se pudieron mover por motivos constructivos de forma que esa será la configuración final de los sensores superiores.

Esta nueva disposición obligo a realizar modificaciones en el algoritmo del cálculo de la posición a partir de los air gaps ya que ahora el alabeo no se podría obtener a partir de los sensores 1-3 y 4-6. También durante esta etapa ese algoritmo se ajustó para adecuarse a la geometría y distancia reales del vehículo. Realizándose pruebas para determinar que la estimación de la posición y rotación era correcta.

Otro ajuste que se realizó respecto a los sensores de air gap fue el ajuste del offset de estos, este offset se corresponde con la diferencia entre el valor real que devuelve el sensor comprendido entre 40 y 60 mm y la distancia que a nosotros nos interesa que es desde la cara del imán a la plancha superior, siendo el 0 la plancha superior.

Este offset se calcula de forma experimental combinando la información proporcionada por los sensores con mediciones externas en condiciones controladas y se realizan ajustes y pruebas hasta obtener los valores finales que mejor se ajustan.

Adicionalmente al proceso de testing se comprobaron y validaron mediante tests unitarios tanto en simulación como con los componentes físicos el correcto funcionamiento del sistema de control combinado con la electrónica. Comunicaciones, calidad de las señales, ruidos, integración, capacidad de ejecución, etc.

Una vez comprobados de forma más individual se procedió a unirlos todos para constituir el sistema final. Análogamente se realizaron pruebas para asegurar que la integración era correcta y que el sistema respondía de acuerdo a lo que se esperaba antes de realizar las pruebas como tal.

El siguiente paso corresponde a la etapa de testing y tuning de los controladores propiamente dicho, durante esta etapa tanto para la bancada como para el vehículo se realizaron muchos ensayos durante los cuales se monitorizan todas las variables de interés y a partir de su análisis posterior se decidía que parámetros era necesario ajustar y de qué manera, así como si se necesitaba modificar algún elemento del sistema o incluso si alguno de los sistemas estaba fallando.

Un ajuste importante introducido respecto las simulaciones es la decisión de modificar la distancia de levitación nominal de 17,5 a 18 mm ya que se vio que a esa distancia se producía un menor consumo de corriente.

Otra decisión adoptada fue el de no realizar un aterrizaje controlado del sistema sino simplemente hacer que dejase de pasar de corriente y que el vehículo caiga, esta decisión se tomó debido a que se comprobó que era seguro el finalizar la levitación de esta manera.

Este proceso fue el que más tiempo consumió comenzándose la etapa de testing con las pruebas en la bancada de levitación en febrero de 2022 y concluyéndose en junio de 2022. A lo largo de este periodo se realizó de forma iterativa los procesos descritos hasta llegar a los sistemas finales cuyo funcionamiento se presentó en la EHW 2022 y que se mostrara en la siguiente sección.

4.6.3. Resultados experimentales

Los resultados experimentales que se muestran a continuación han sido obtenidos a partir de la información que envían las placas del circuito de levitación LPU y LCU por su BUS CAN, recogiendo mediante un dispositivo PKAN y el programa P-CAN explorer.

El hecho de que la información se recoja de esta forma junto al hecho de que la cantidad de datos enviada es alta y que algunos (como las corrientes de referencia) han de ser enviados a alta frecuencia limitan en gran medida la capacidad de obtención de datos del sistema de forma que a fin de ser capaces de obtener información de todas las variables de interés se sacrificó frecuencia de envío por lo que en algunos gráficos se aprecian ciertos problemas de aliasing.

4.6.3.1. Bancada de levitación

Los resultados que se mostraran tienen el objetivo de demostrar la capacidad del sistema de levitación para controlar el sistema de levitación magnético en unas condiciones controladas. Para este propósito se usará la bancada de levitación que se diseñó con este objetivo, en este caso la unidad estará unida a la estructura y atraerá una plancha de acero a la que se podrá añadir peso adicional. El movimiento de esta estará restringido mediante un sistema de guías que limitan el movimiento a pesar de introducir un rozamiento en el sistema que no estará presente en el vehículo final.

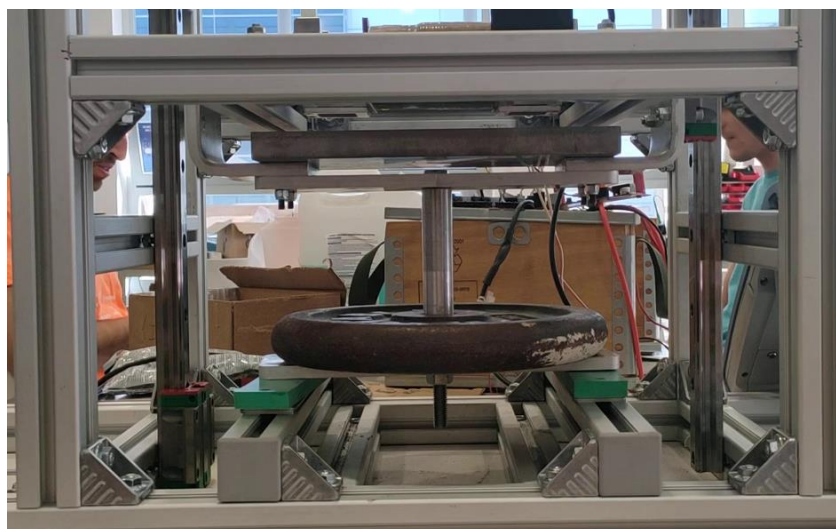


Figura 146. Bancada modo levitación

A continuació, se mostraran inicialment els resultats obtinguts en el últim ensayo que ja incorporava el bumpless transfer i durant el qual se modifica la referència i se introdueixen perturbacions de diferent magnitud per comprovar el comportament del sistema. Posteriorment se analitzarà en detall cada element.

Primerament, se presenta la evolució del air gap durant el ensayo.

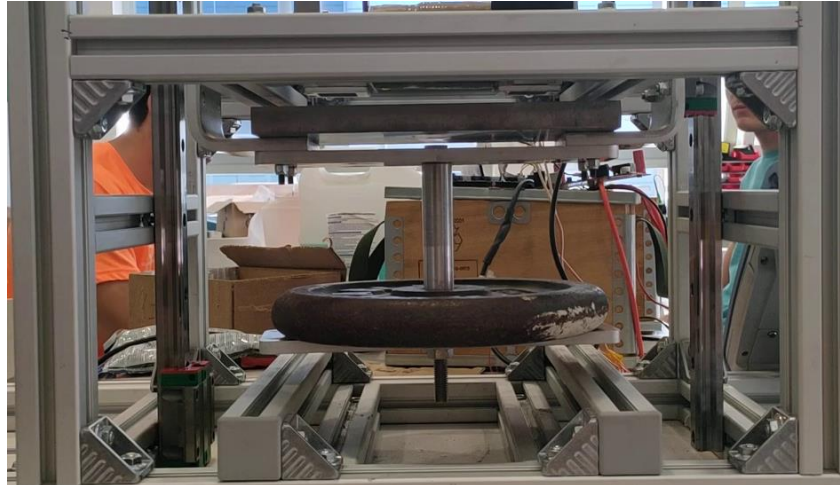


Figura 147. Imagen de la levitación durante el ensayo

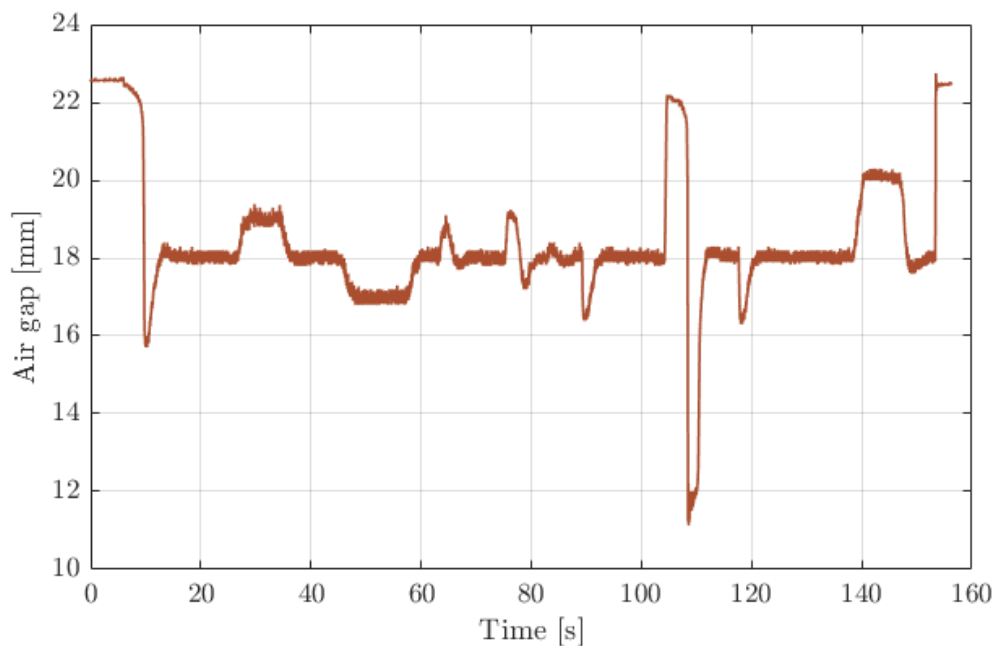


Figura 148. Variación air gap ensayo bancada levitación

En la gráfica mostrada se muestra cómo se produce el despegue de la unidad que comienza a 22,5 mm, durante el mismo se produce una sobreoscilación que hace que se llegue hasta los 16 mm hasta que el control es capaz de amortiguar la oscilación y recuperar llegando entonces a la referencia en torno a la cual se puede apreciar que existe

una ligera oscilación de aproximadamente 0,25 mm de amplitud. La sobreoscilación presentada es de aproximadamente el 14% y el tiempo de establecimiento de 9 segundos (ya que el bumpless transfer hace que este despegue sea más lento)

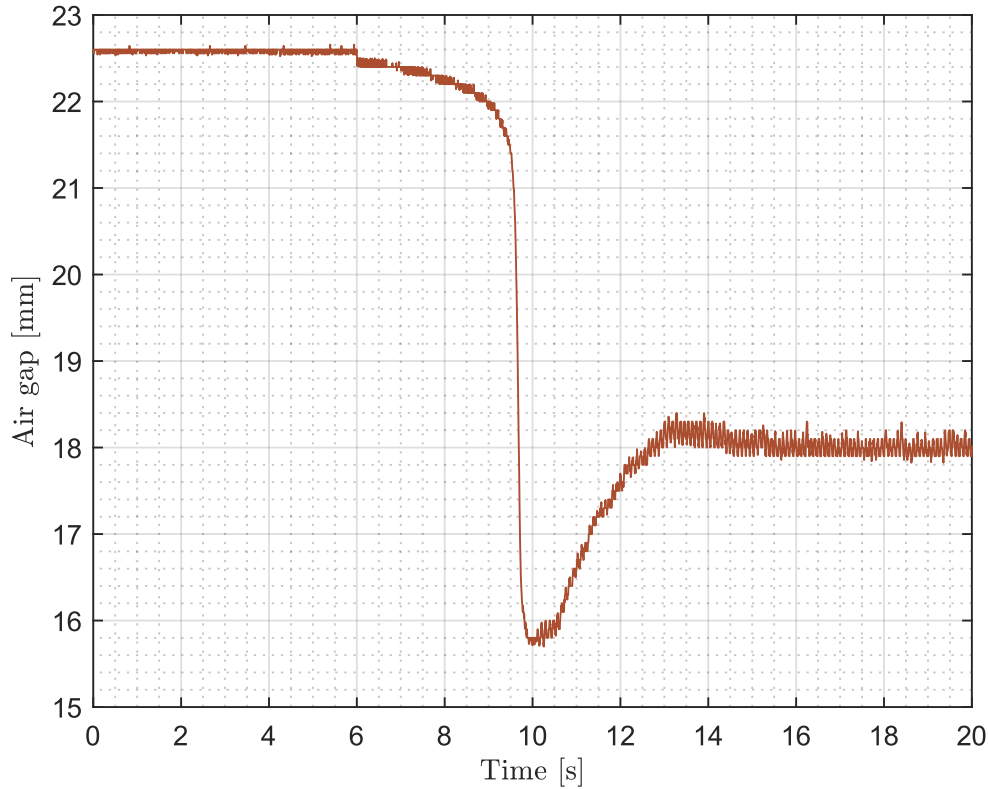


Figura 149. Detalle despegue ensayo bancada de levitación

Una vez se ha estabilizado se aprecia cómo se produce un cambio de referencia de la distancia de levitación primero alejándose, hasta que se estabiliza en la nueva referencia y luego volviendo a la distancia nominal para realizar un cambio de referencia de un milímetro de nuevo esta vez acercándose. Se aprecia durante este proceso como el sistema es capaz de seguir estos cambios de referencia sin problemas. Para los cambios de referencia no se presenta una sobreoscilación apreciable y el tiempo de establecimiento está en torno a 3 segundos en ambos casos.

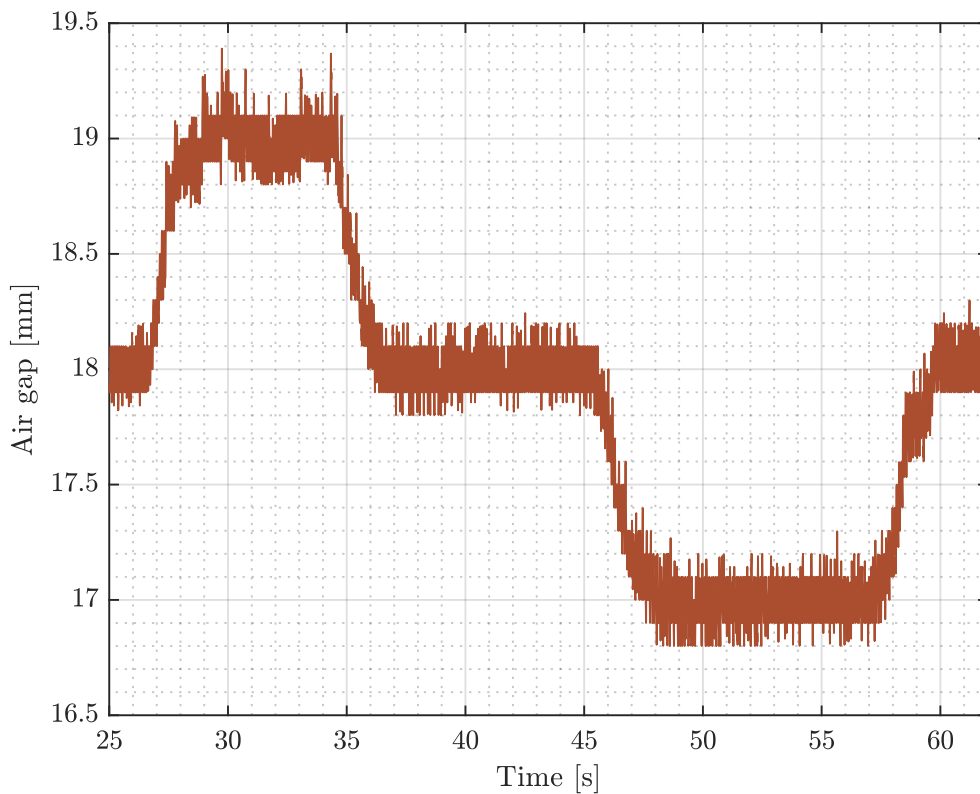


Figura 150. Detalle cambio referencia ensayo bancada de levitación

Posteriormente a esto se procederá a perturbar el sistema, primero se colocará un peso adicional de 1 kg produciéndose una perturbación que el control corrige con una oscilación de aproximadamente un milímetro. Posteriormente a esto se perturbará el sistema nuevamente aplicando una ligera fuerza con la mano produciéndose otra oscilación que de nuevo es corregida, por último, se retira la pesa colocada. Todo este proceso ha introducido diferentes perturbaciones en magnitud y sentido en el sistema permitiendo comprobar la robustez de este.

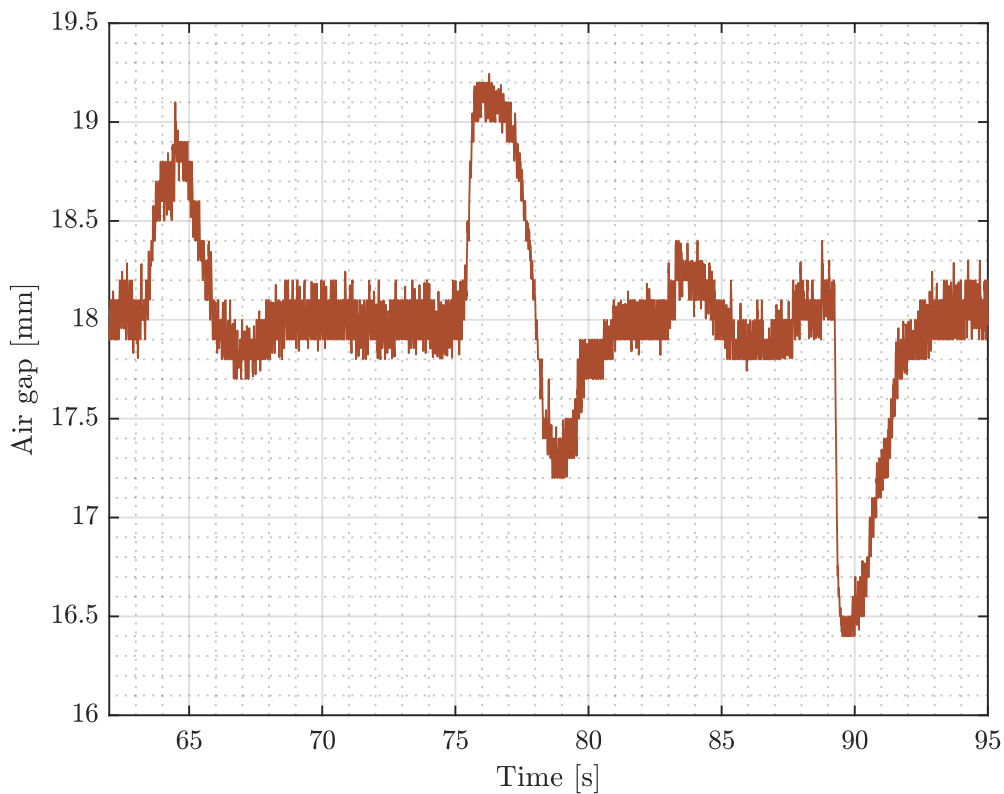


Figura 151. Detalle perturbaciones ensayo bancada de levitación

En la parte final del ensayo se colocará de nuevo la pesa sin embargo en esta ocasión al colocarla se ejerció presión hacia abajo llevando el sistema a la posición de despegue otra vez, liberándose en ese momento para comprobar si el sistema era capaz de recuperar. El sistema inicia el despegue, pero no amortigua lo suficiente (en este caso no está activado el bumpless transfer) llegando a tocar contra el techo, a pesar de esto es capaz de despegarse y estabilizarse demostrando que también se podría realizar el despegue pegado al techo. Posteriormente se quitará la pesa que ha estado colocada en el sistema todo este tiempo.

Finalmente se comprobará la respuesta del sistema ante un cambio de referencia mayor para verificar su funcionamiento antes de apagar el sistema.

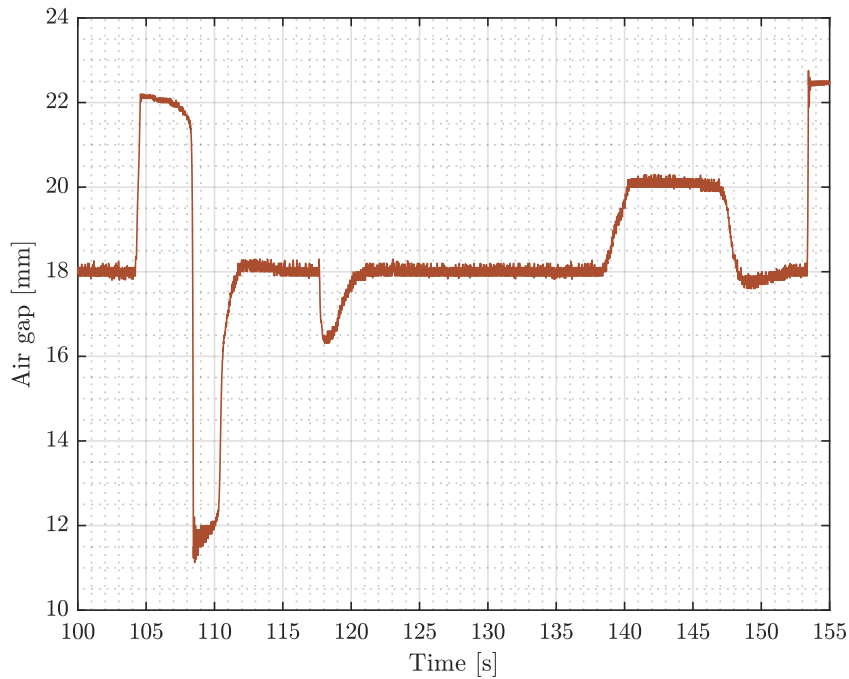


Figura 152. Detalle parte final ensayo bancada de levitación

A lo largo de todo el ensayo se ha comprobado como el sistema ha respondido de forma correcta a cambios de referencia, perturbaciones, el despegue con el bumpless transfer y sin él e incluso como a pesar de pegarse es capaz de volver a estabilizarse.

A continuación, veremos la corriente de referencia calculada por el control y la real aplicada.

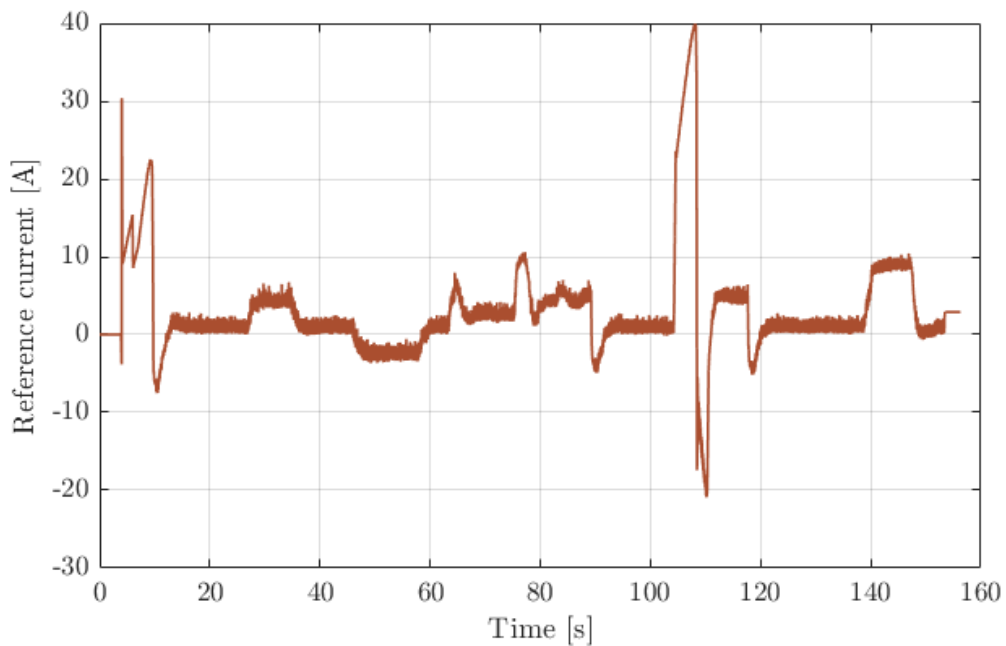


Figura 153. Corriente de referencia ensayo bancada levitación

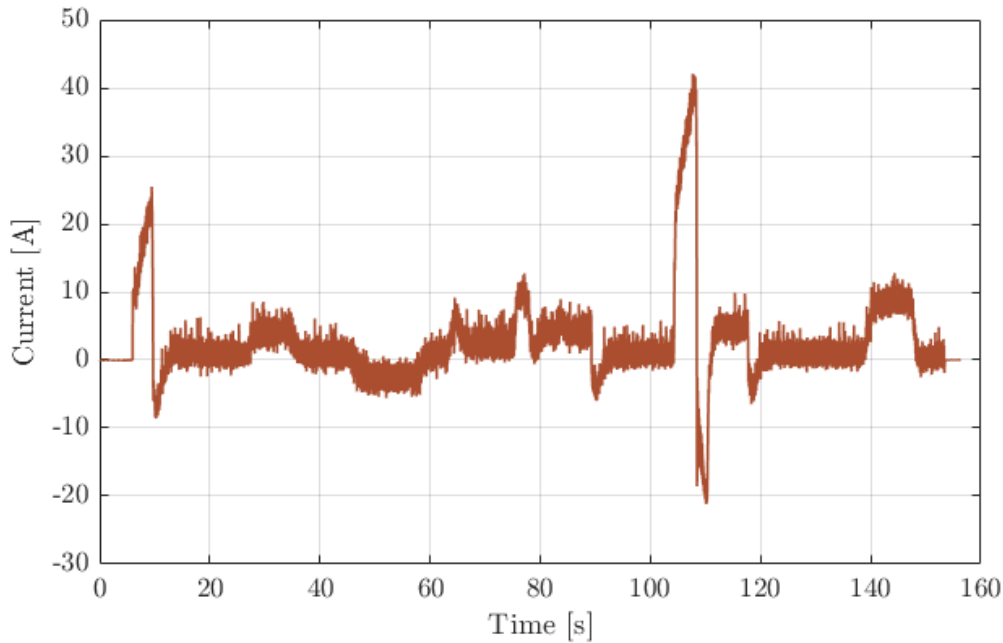


Figura 154. Corriente aplicada ensayo bancada levitación

Lo primero que podemos apreciar es la similitud de ambas graficas lo cual indica que el seguimiento se realiza correctamente (se verá con más detalle posteriormente) aunque se aprecia que la corriente real oscila en torno a los valores teóricos calculados esto podría minimizarse mediante un ajuste del control de corriente.

Al margen de esto se aprecia a lo largo de la simulación como durante el despegue se produce un pico de alrededor de 25 A positivos que genera la sobreoscilación y que por lo tanto se produce un pico de unos -8 A para compensar. Una vez pasado este punto se aprecia como en general durante el ensayo cuando nos encontramos a la distancia de levitación nominal sin peso añadido el consumo de corriente es muy cercano a cero con unas oscilaciones de amplitud en torno a 4 A.

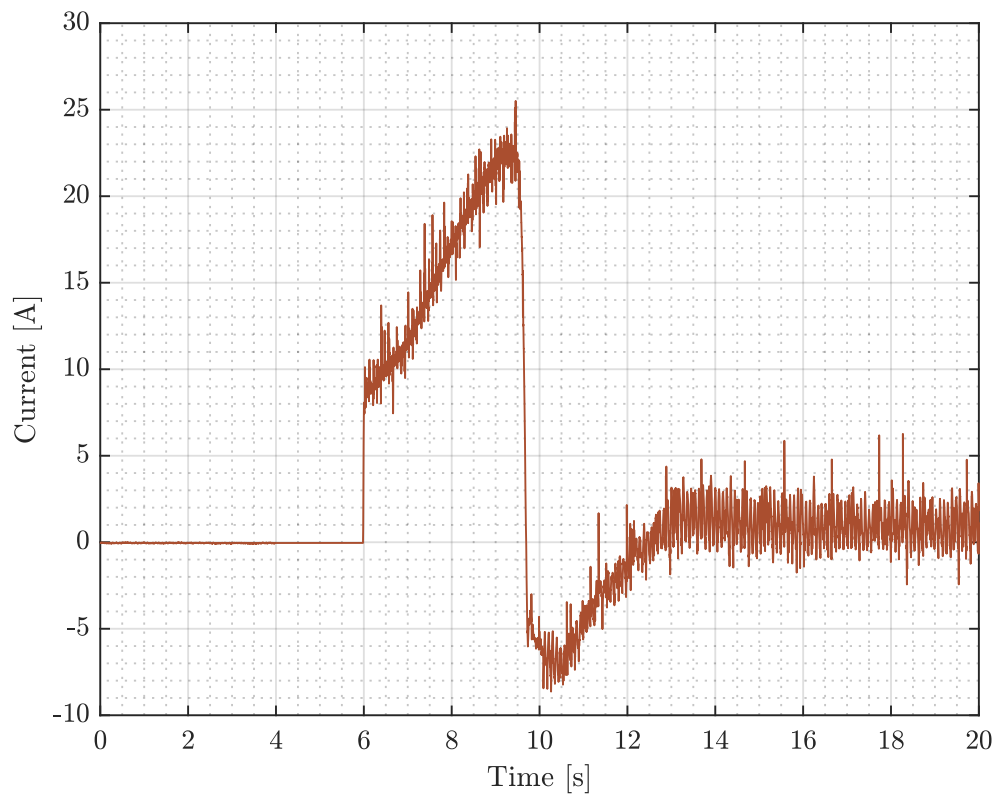


Figura 155. Detalle corriente despegue ensayo bancada de levitación

También como durante las perturbaciones y cambios de referencia la respuesta es coherente y para las presentadas estamos en todo momento en el rango de la corrección que podemos realizar.

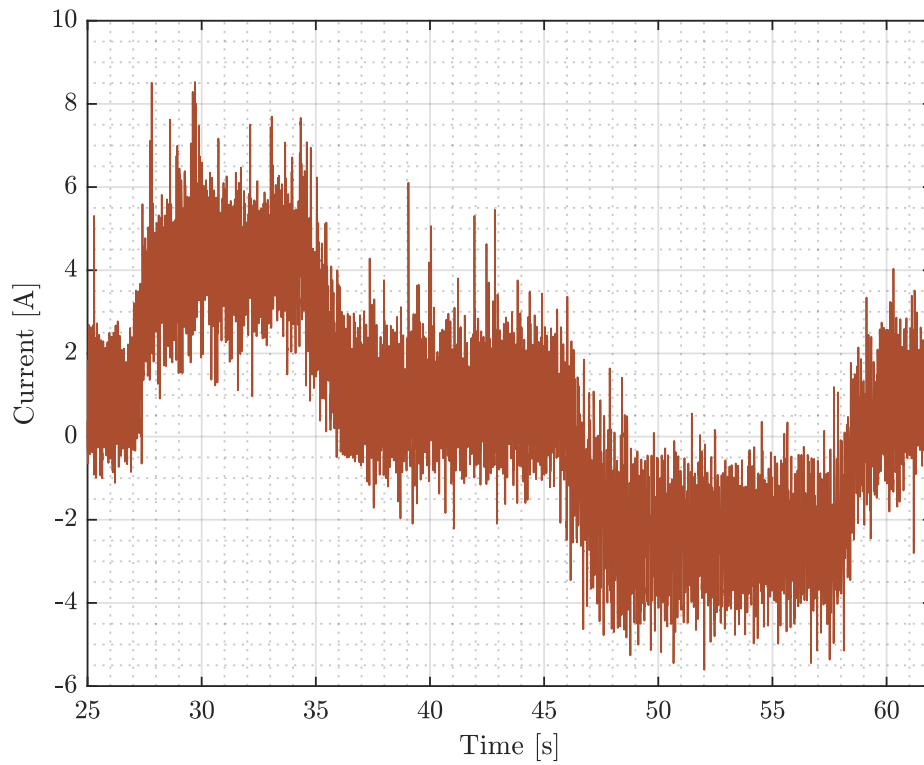


Figura 156. Detalle corriente cambio referencia ensayo bancada de levitación

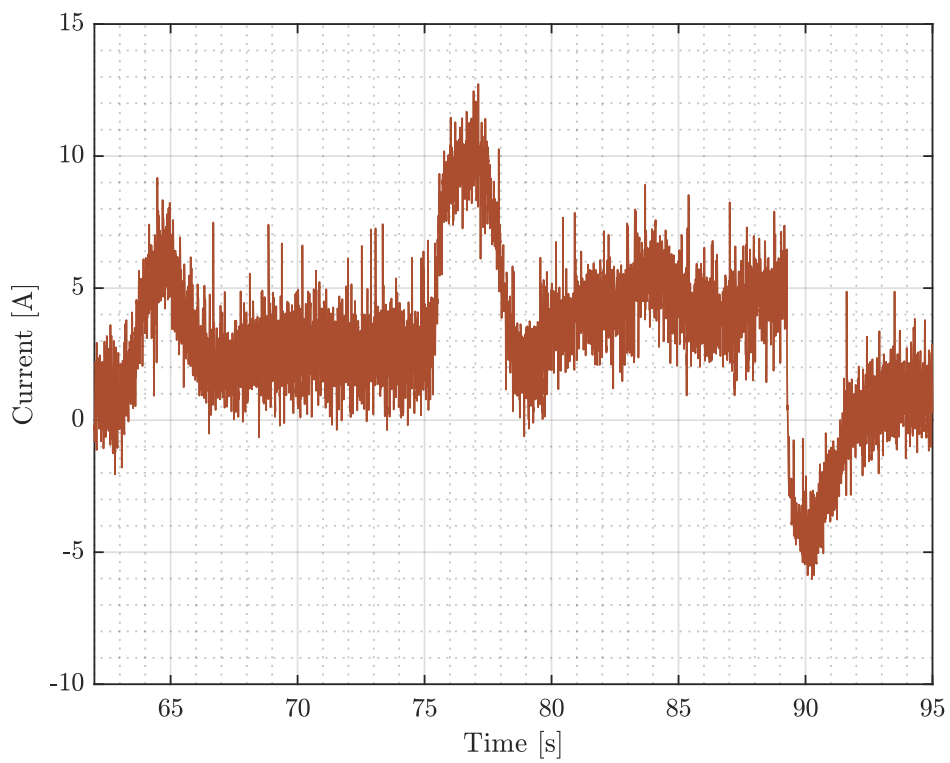


Figura 157. Detalle corriente perturbación ensayo bancada de levitación

También se aprecia como para el caso extremo del despegue con peso extra y tras llegar al suelo bruscamente se requiere un pico muy puntual de 40 A que probablemente sea lo que haga que no se pueda recuperar a tiempo.

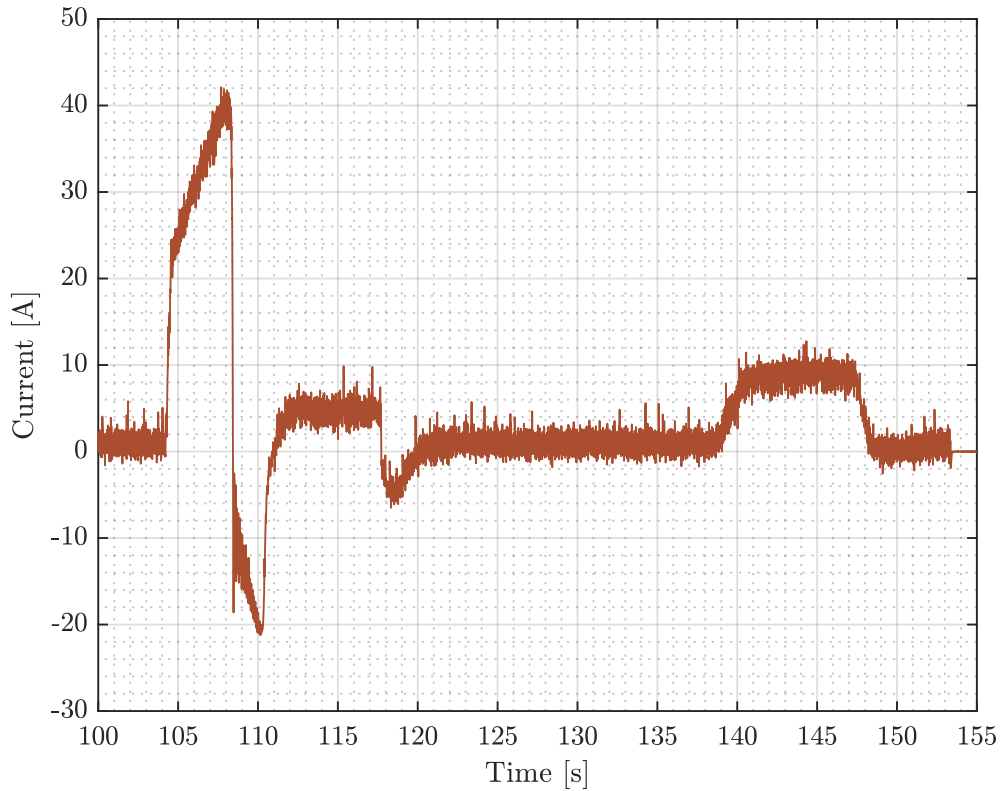


Figura 158. Detalle corriente final ensayo bancada de levitación

Con todo lo visto en el ensayo y la respuesta tanto en air gap como en corriente y teniendo en cuenta que el objetivo de este ensayo era determinar si el control era apto para gobernar el funcionamiento de las unidades de forma estable y robusta además de comprobar como es el comportamiento de la unidad se dará el control como valido.

Aunque el control se haya validado puesto que el objetivo también es mejorar de cara al control de Auran se estudiaran más en profundidad los resultados obtenidos, comenzando con el seguimiento de la corriente.

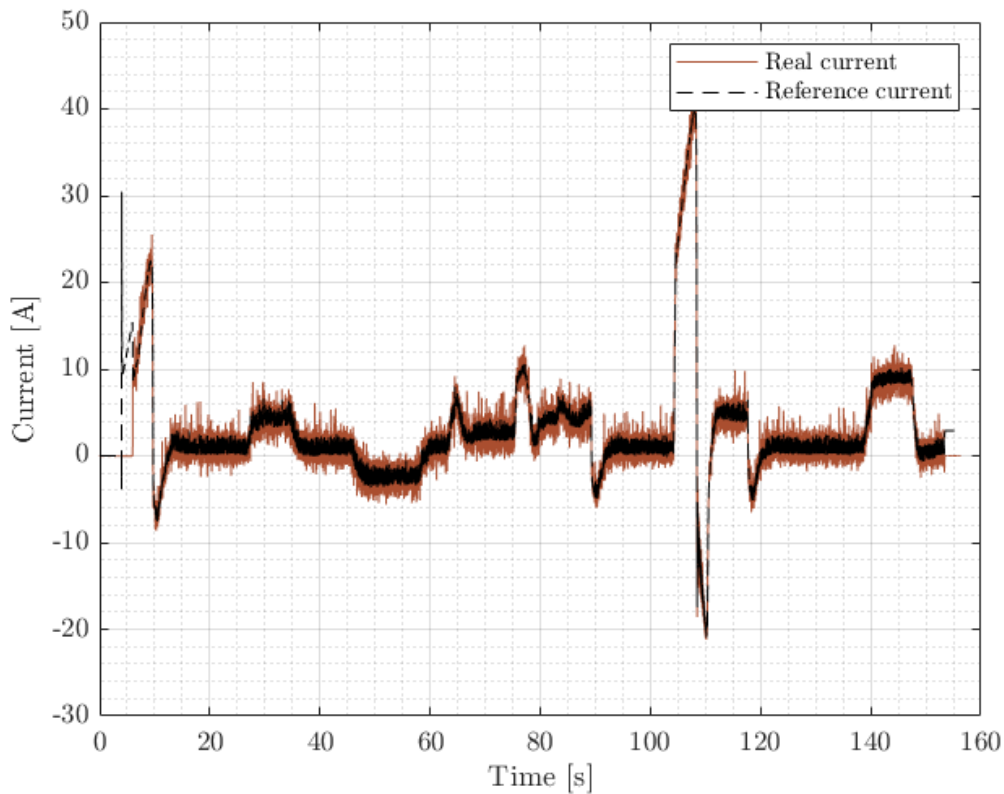


Figura 159. Seguimiento de la corriente ensayo bancada de levitación

Se aprecia como al inicio existe una diferencia entre la acción calculada y la real y se explica debido a que al inicio del ensayo no se activa el envío de la corriente de referencia, pero si se calcula, reseteándose cuando comienza el mismo de forma que esos datos de referencia iniciales no son significativos. Aparte se puede llegar a apreciar que el seguimiento no presenta demasiado retraso, aunque sí que se produce el fenómeno que se intuía de que la corriente real oscila en torno a los valores de la calculada principalmente debido a la acción del bucle de corriente por lo que se tratara de mejorar.

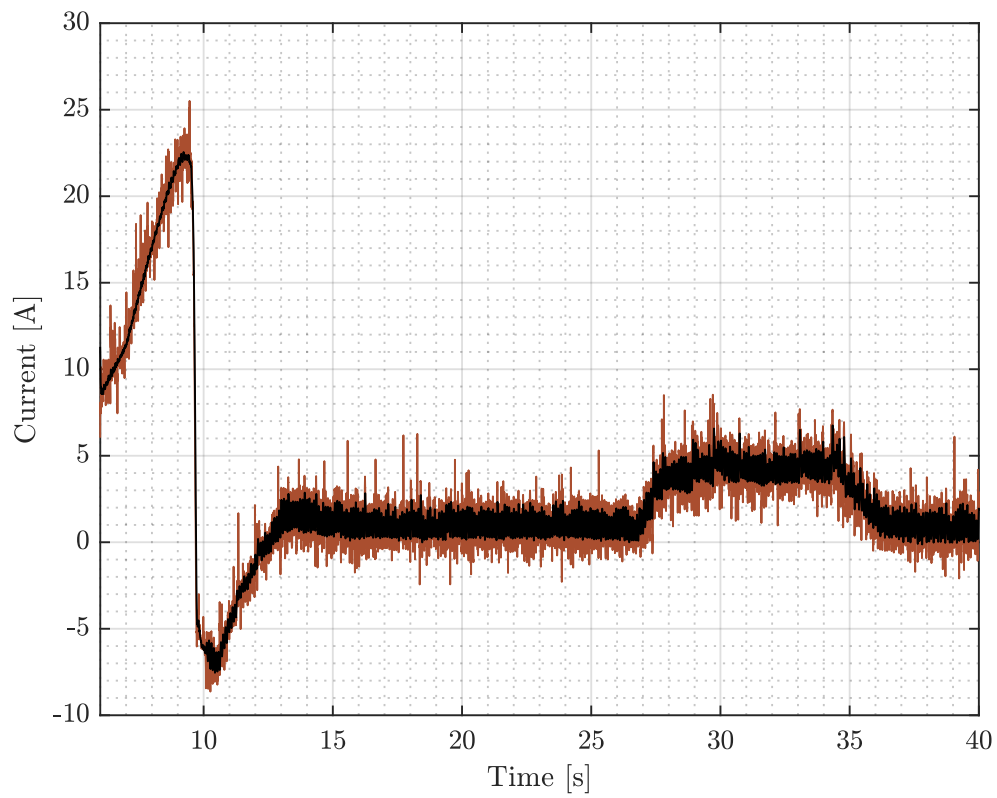


Figura 160. Detalle seguimiento de la corriente ensayo bancada de levitación

Por otro lado, se estudiará el efecto del uso del bumpless transfer durante el despegue para determinar su efectividad.

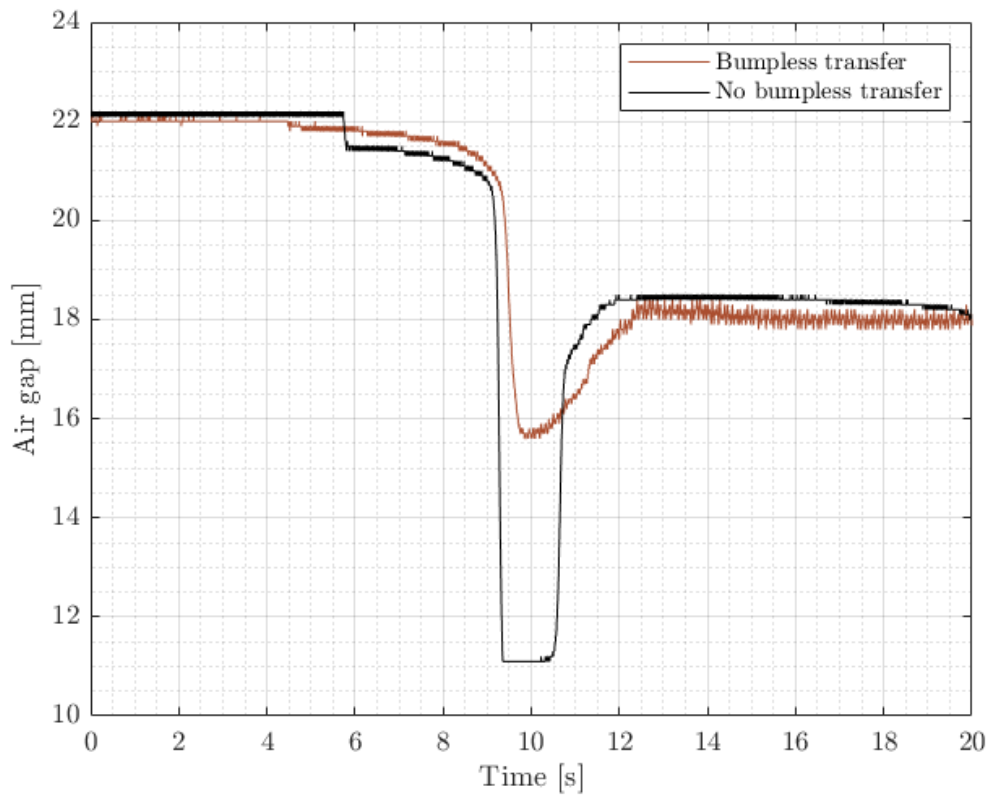


Figura 161. Efecto bumpless transfer air gap

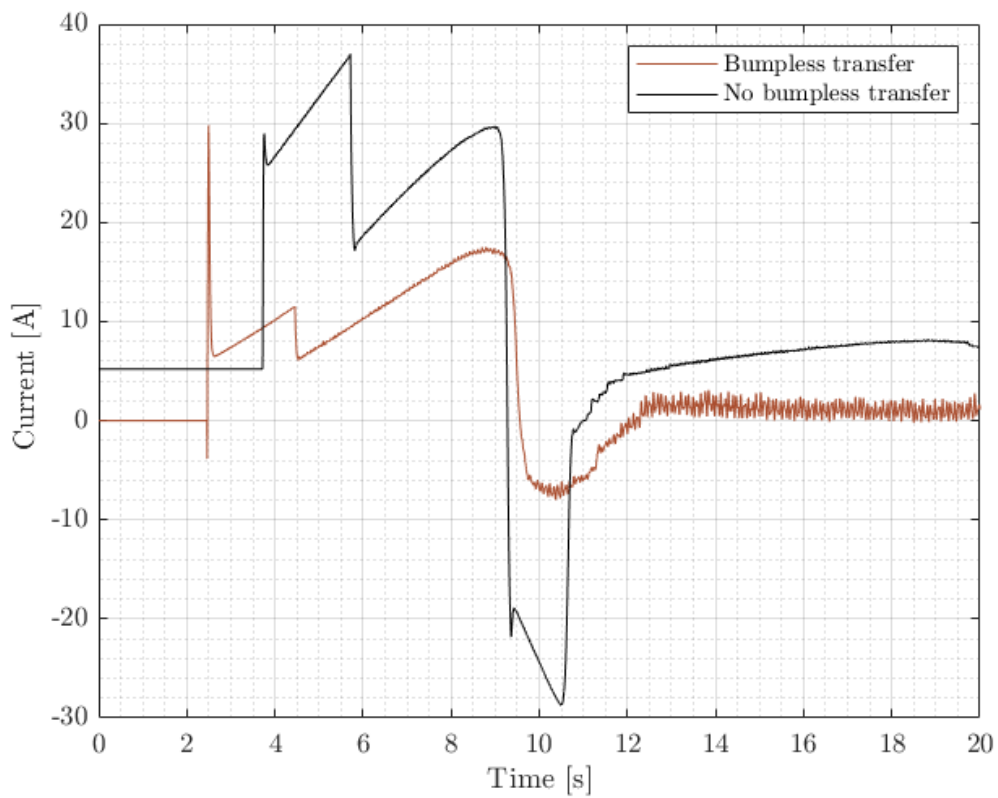


Figura 162. Efecto bumpless transfer corriente

Se aprecia cómo se comentó en su sección que el uso de este sistema reduce el pico inicial de corriente, realizando un control más suave que resulta en una menor sobreoscilación y mayor estabilidad del sistema.

Además de la información ya presentada puesto que el objetivo de este ensayo es obtener información del sistema para mejorar los modelos y el sistema de control, se comparará el resultado obtenido durante el ensayo con los resultados teóricos obtenidos en las simulaciones a fin de encontrar también diferencias en el modelo.

Primeramente, compararemos los resultados del despegue en ambos casos ya con el bumpless transfer implementado.

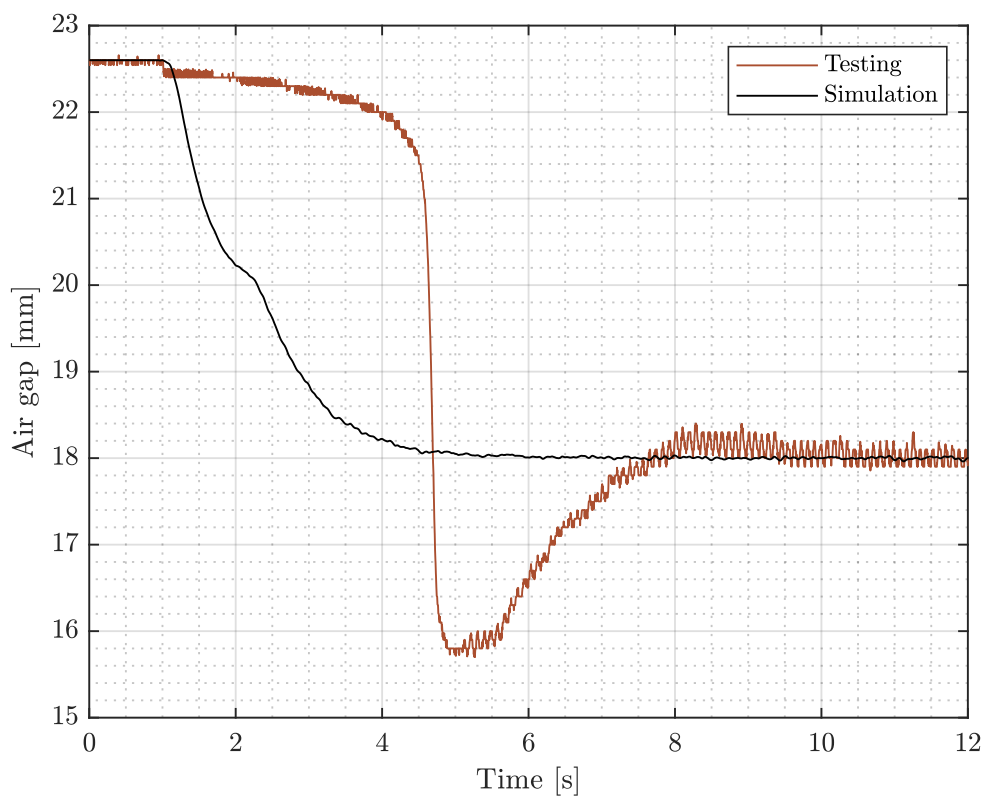


Figura 163. Comparativa despegue ensayo vs simulación

Se puede apreciar como el efecto del bumpless no ha sido el mismo que el teórico que se esperaba obtener a pesar de que se mostró como mejoraba el comportamiento respecto de no usarlo. El despegue en la simulación se realiza de forma mucho más suave y se llega a estabilizar en un menor tiempo y sin sobreoscilar a diferencia de lo que ocurre para el ensayo.

Esto puede explicarse debido a la fricción introducida por los patines de la bancada, que la rampa que modifica la referencia no sea la apropiada, que el peso durante el ensayo no sea exactamente el mismo que en la simulación o que el sistema sea subamortiguado respecto al modelo de forma que se sobrepase el punto de cambio de constantes y por lo tanto no se haga de forma tan suave el despegue. En cualquier caso, se determina que aún se debe mejorar el comportamiento durante el despegue, algo que se lograra principalmente ajustando la parte derivativa del control.

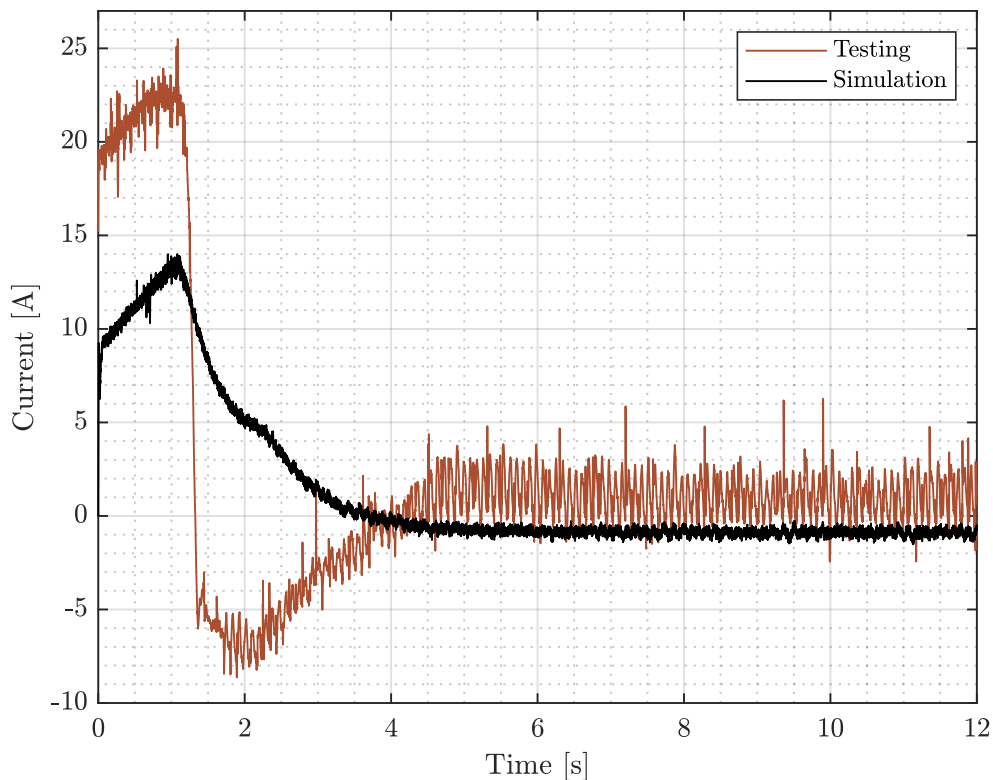


Figura 164. Comparativa corriente despegue ensayo vs simulación

Si observamos la comparativa de la corriente lo primero que podemos notar es que la corriente necesaria para comenzar el despegue es mayor que en las simulaciones, esto unido al hecho de que en estacionario el punto en torno al cual oscila la corriente sea distinto nos hace pensar que existe una diferencia entre el peso considerado para las simulaciones y el real usado en el ensayo. Esto unido al hecho de que existe una fricción no modelada debido al patín puede justificar la mayor necesidad de corriente para el despegue, esta mayor corriente podría iniciar el movimiento con mayor velocidad y si la disipación no es suficiente provocaría una sobreoscilación como la que aparece, ya que también se aprecia como en el ensayo se necesita inyectar corriente negativa para corregir mientras que en la simulación la corriente simplemente baja de forma más controlada.

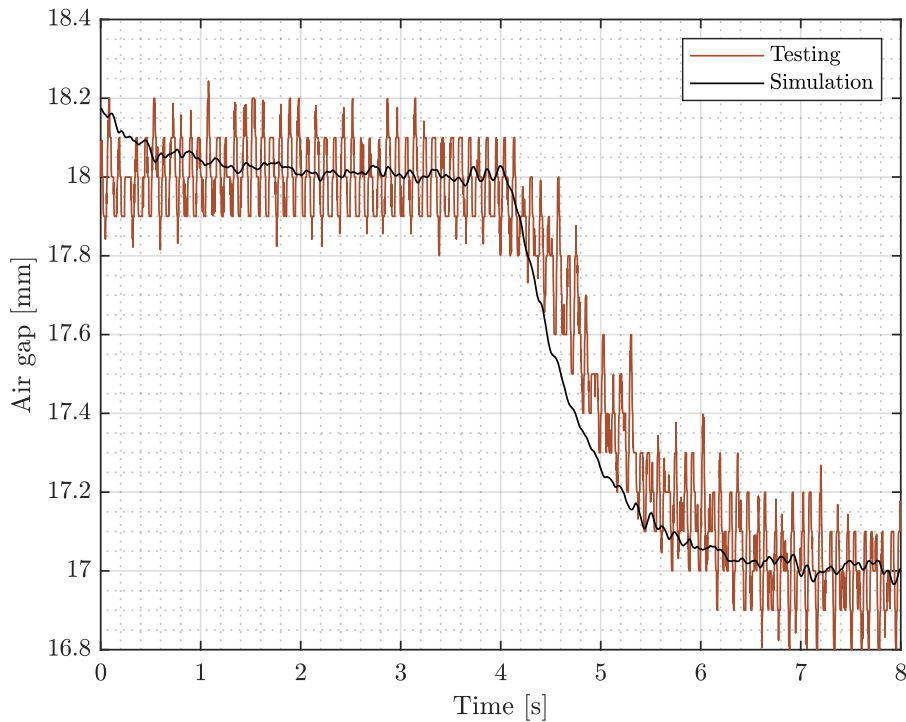


Figura 165. Comparativa cambio de referencia ensayo vs simulación

Respecto al cambio de referencia se mostrará solo la comparativa para un caso, pero se comprueba para todos observándose resultados muy similares al presentado. Se aprecia primeramente como la oscilación en el ensayo es mayor que la calculada de forma teórica lo cual se puede explicar por los diferentes factores ya comentados. Para la comparativa se ha intentado ajustar al máximo el momento de inicio del cambio de referencia, se puede apreciar como este cambio tiene un comportamiento muy similar en ambos casos siendo ligeramente más rápido en la simulación, pero para ambos no se produce sobreoscilación y se obtiene un tiempo de establecimiento de alrededor de 2,5-3 segundos.

Respecto la corriente que se mostrara a continuación, se aprecia como el punto de equilibrio no se alcanza para la misma corriente en ambos casos (se explica por diferencias en la unidad y/o en el peso) aparte de la mayor oscilación durante el ensayo ya comentada, al margen de esto al igual que para la posición el comportamiento se asemeja mucho, siendo la mayor diferencia que para la corriente en el ensayo en salto no es tan grande (debido a las oscilaciones es más complicado determinarlo con precisión) en cualquier caso se considera que para cambios de referencia la similitud es buena.

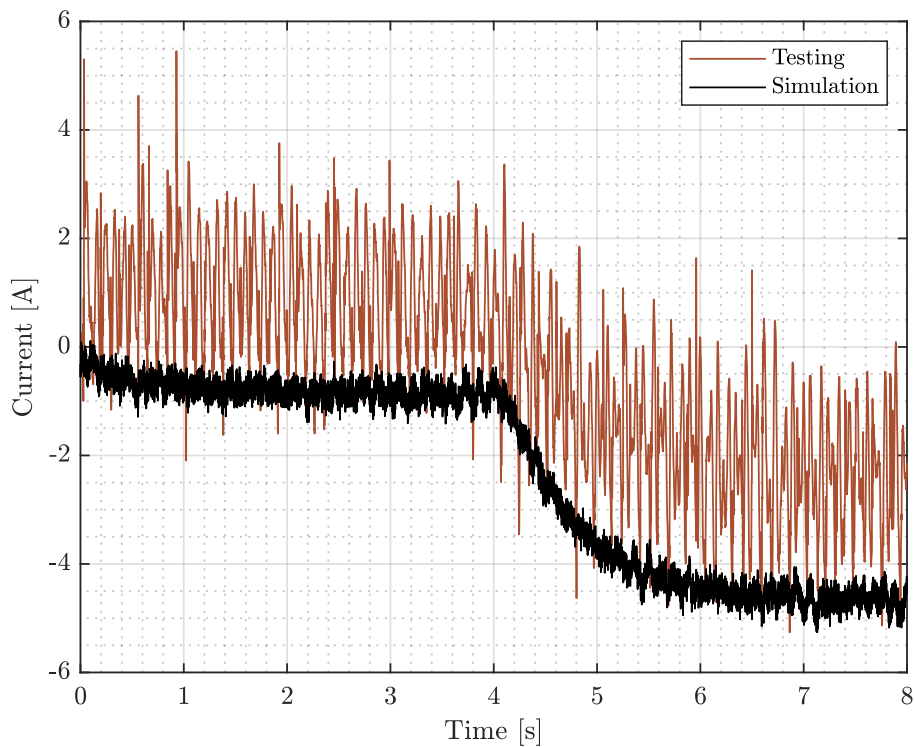


Figura 166. Comparativa corriente cambio de referencia ensayo vs simulación

Para el caso de la perturbación se tomará el caso de la primera vez que se pone una pesa. En este caso se aprecia en la comparativa que existen menos similitudes ya que en la simulación, aunque la amplitud producida es similar se corrige antes y no hay sobreoscilación, mientras que en el ensayo si se produce una pequeña sobreoscilación. Parte de esta diferencia podría explicarse dado que en la simulación se aplica el total del peso de forma instantánea mientras que en experimento al depositar la pesa de forma manual este proceso no es inmediato y existe la incertidumbre de qué modo se libera el peso en el sistema. Se aprecia como el efecto de la perturbación durante el ensayo es más “prolongado” (podría deberse al rozamiento del patín) produciéndose la variación de air gap de forma menos abrupta (podría deberse a como se deposita la pesa), en ambos casos la variación máxima de air gap es similar y una vez se alcanza esta máxima variación el tiempo que tarda en recuperar es similar, aunque en el ensayo se produce una pequeña sobreoscilación. El resultado final es que el tiempo que tarda en volver a la referencia en la simulación es de 3 segundos aproximadamente y en el ensayo de 5 segundos.

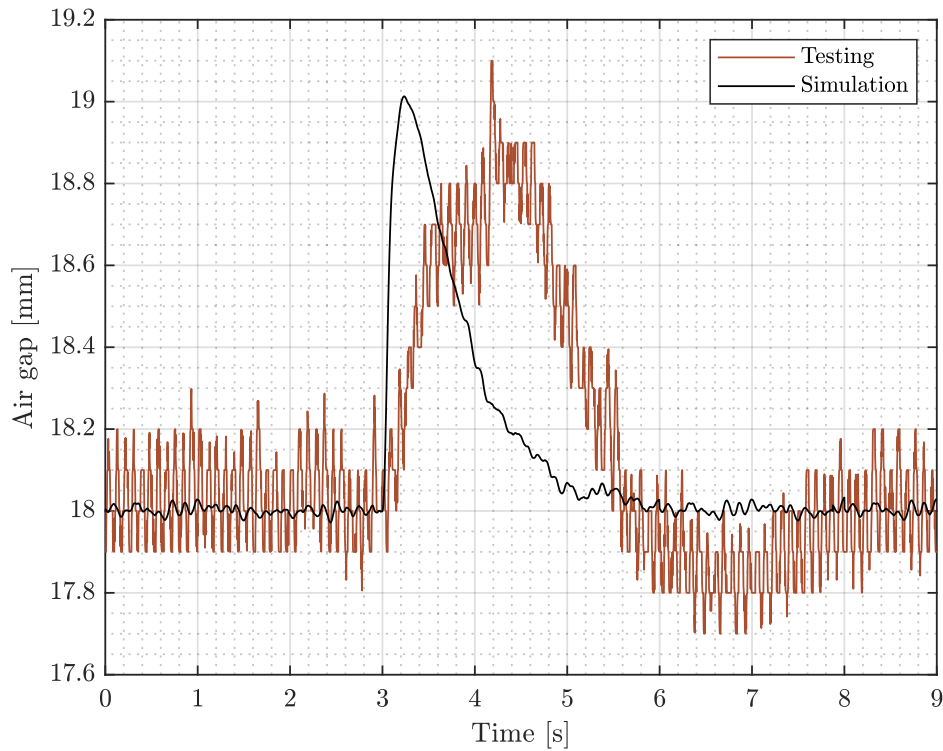


Figura 167. Comparativa perturbación ensayo vs simulación

Si observamos las corrientes vemos un comportamiento similar al presentado por el air gap, con una diferencia en el valor inicial y una respuesta mucho más rápida del sistema simulado y más lenta al inicio del sistema real, a pesar de esto la variación de corriente ha sido similar en ambos casos y de nuevo una vez llegado al valor pico la vuelta a la referencia se hace aproximadamente en el mismo tiempo.

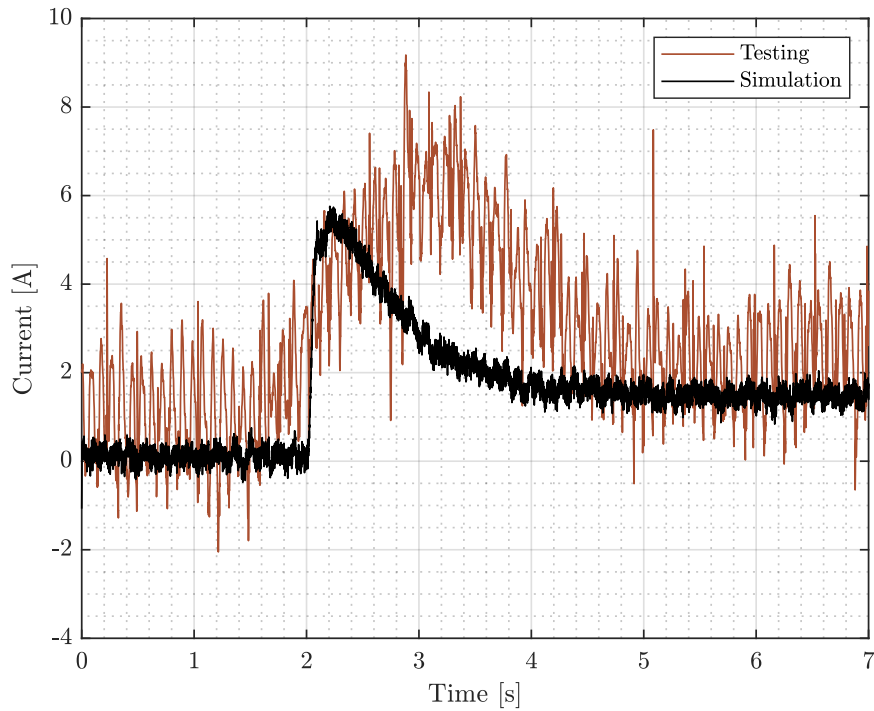


Figura 168. Comparativa corriente perturbación ensayo vs simulación

Las imágenes anteriores muestran diferentes resultados parciales de la comparativa debido a la dificultad y tiempo para poder sincronizar los resultados por lo que de forma detallada solo se presenta para un caso, realizándose simulaciones específicas que simulan el cambio de referencia en ambos sentidos y las mismas perturbaciones que existen en el ensayo, estas simulaciones se muestran a continuación.

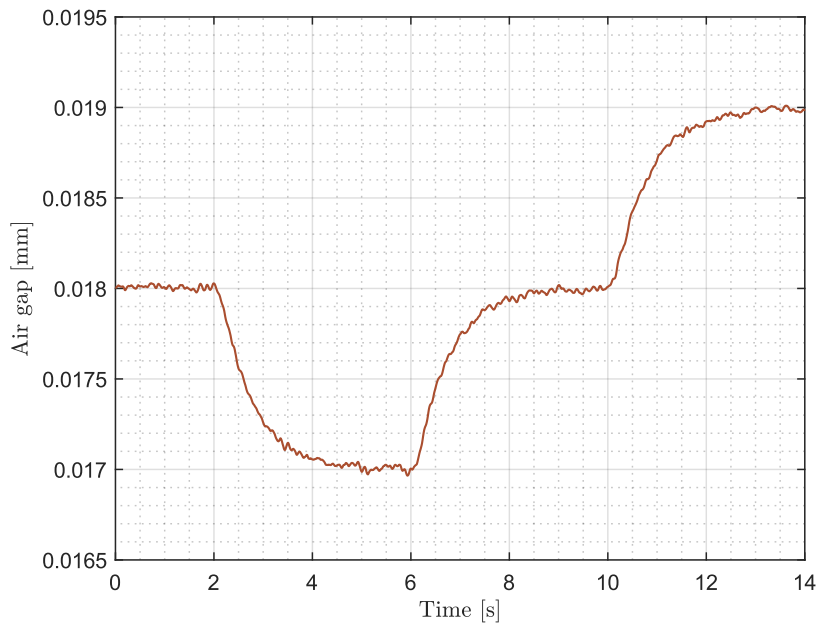


Figura 169. Simulación mismos cambios de referencia que en los ensayos

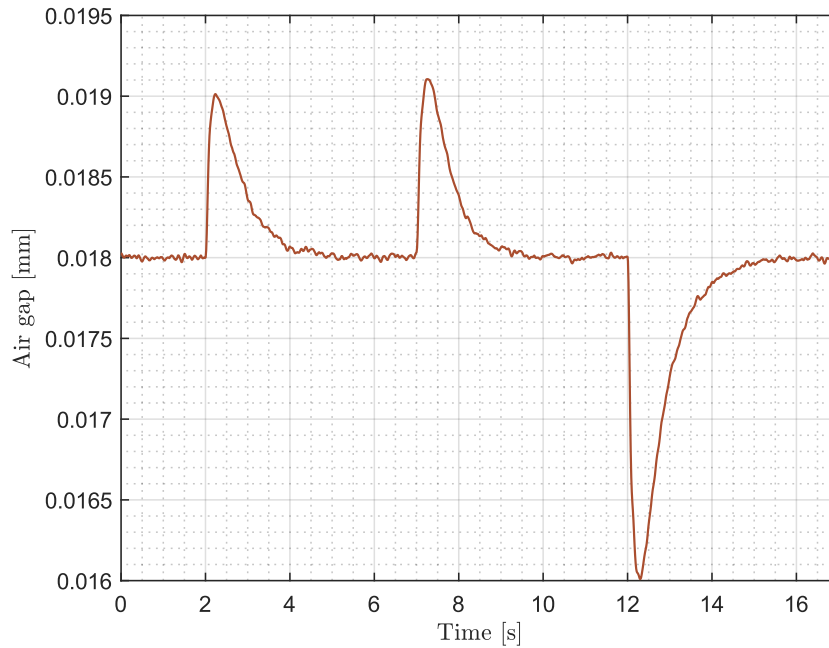


Figura 170. Simulación mismas perturbaciones que en los ensayos

Con toda la información recogida durante el ensayo se llega a la conclusión de que a pesar de que existan ciertas diferencias con el modelo simulado, este y la realidad son muy similares por lo que este se valida parcialmente.

También se demuestra de forma práctica que el sistema de control es apto para la tecnología de levitación al menos en estas condiciones ya que ha logrado los objetivos impuestos de manera satisfactoria. Por todo esto se dará como válido este sistema y se pasará al sistema de levitación del vehículo para el cual ya se incorporarán ciertas mejoras comentadas en este ensayo.

En la documentación adicional se adjunta un video demostrativo del funcionamiento del control en la bancada de levitación, este no se corresponde con los datos mostrados ya que ese ensayo no fue grabado. Sin embargo, en el video se puede apreciar el comportamiento del sistema durante el despegue, cambio de referencia y perturbación.

4.6.3.2. Levitación Auran

A lo largo de esta sección se presentará el funcionamiento real del sistema de levitación de Auran, siendo este el objetivo final del proyecto. Dada la naturaleza del proyecto, sus necesidades y tiempos, y que este es el elemento final y tiene una serie de funciones muy específicas que cumplir no se realiza un ensayo tan detallado del sistema. Al no comprobarse como responde el sistema a cambios de referencia, ni ante perturbaciones más controladas como si se hizo en la bancada pues se quería obtener un conocimiento más analítico.



Figura 171. Prototipo Hyperloop UPV Auran

De la misma forma el proceso de ajuste se realizó en varias etapas por lo que se presentara información de diferentes ensayos a lo largo del tiempo que se consideran que muestran el comportamiento alcanzado por Auran.

El sistema de toma de datos usado para la levitación en la bancada y en estático es el comentado, mediante conexión directa al BUS, sin embargo, este sistema no es viable para la levitación en dinámico, por lo que se confió en el sistema de data login. Sin embargo, debido a un fallo del mismo no se pudieron recoger datos durante la levitación en dinámico y por lo tanto no podrán mostrarse graficas.

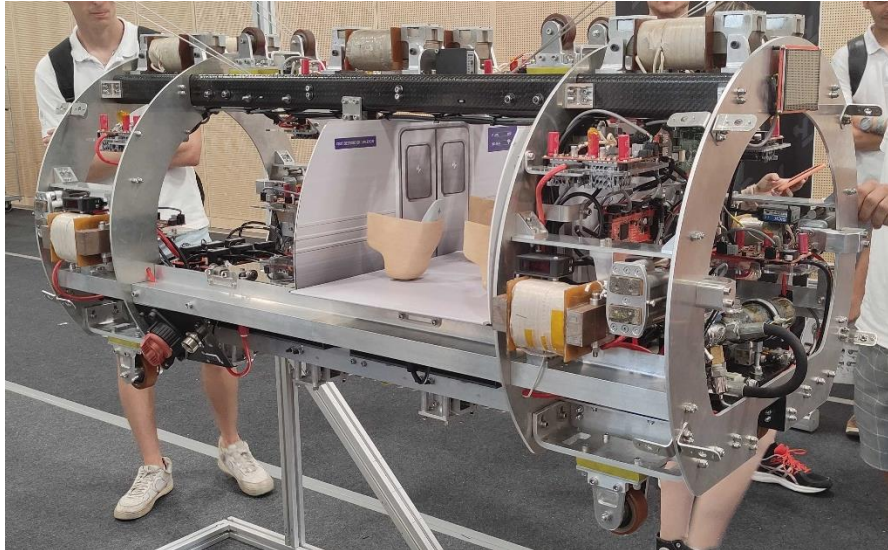


Figura 172. Expositor Auran durante EHW

Al igual que para el ensayo de la bancada se adjuntan los videos de las demostraciones del funcionamiento.

Los objetivos que ha de cumplir el sistema de levitación eran principalmente:

- Alcanzar un sistema de levitación y guiado estable y robusto
- Lograr la levitación con un bajo consumo de corriente
- Que el vehículo sea capaz de despegar desde la infraestructura y comenzar la levitación
- Lograr que Auran sea capaz de desplazarse mediante el motor lineal en el tubo mientras se mantiene la levitación y el guiado

Estos objetivos se buscaron principalmente en tres etapas, la primera es alcanzar únicamente la levitación en estático, después la levitación y guiado en estático y por último la levitación y el guiado en dinámico.

Primeramente, se mostrará el resultado de un ensayo demostrativo en el que se despegará y logrará la levitación en estático sin el guiado.

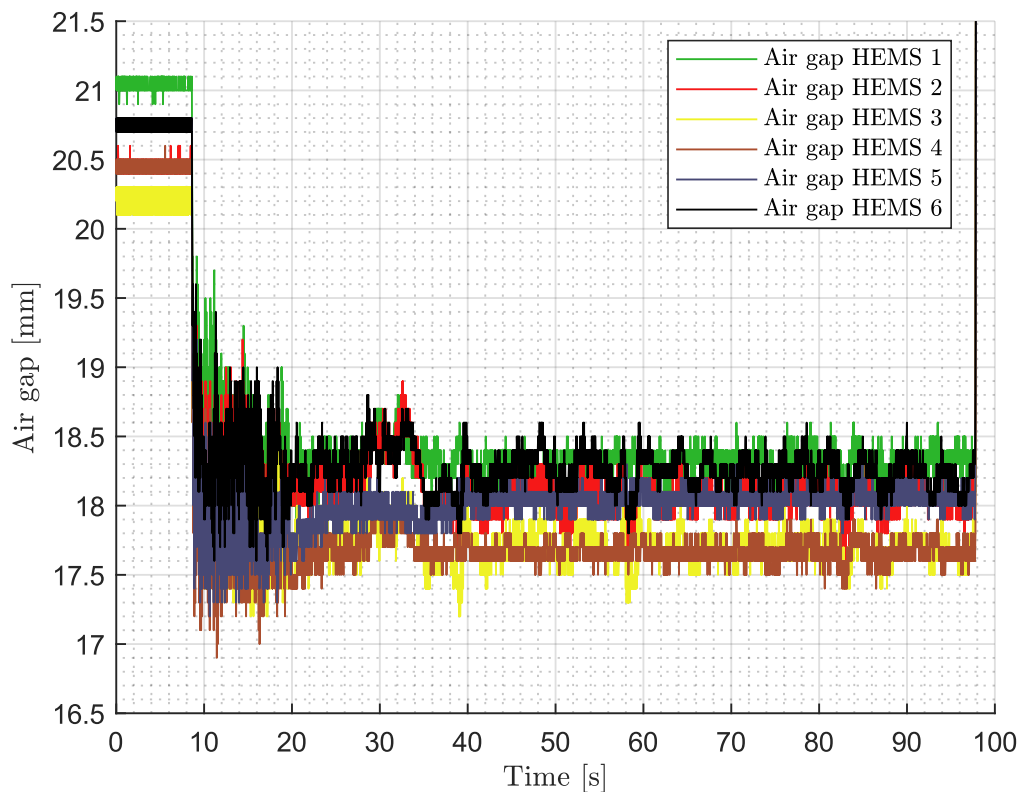


Figura 173. Air gaps ensayo levitación Auran

En la imagen lo primero que se aprecia es que debido a que el vehículo durante el despegue está apoyado en sus cuatro ruedas (las cuales no están perfectamente alineadas) y que la alineación de las unidades y los sensores no es perfecta (no forman un plano exacto) la posición inicial de los air gaps no es exacta. Este fenómeno se dará durante todos los ensayos debido a la imposibilidad física de lograr que todos estén al mismo nivel por lo que variaciones como las que se muestran se consideran como aceptables ya que para estas (e incluso otras mayores) se demostró que el vehículo era capaz de realizar el despegue.

Se puede apreciar que el despegue se realiza de forma bastante uniforme y que no se produce una gran sobreoscilación, aunque durante los instantes posteriores al mismo aparece una oscilación amplia y rápida que posteriormente se amortigua, esta podría deberse más al propio movimiento de los sensores (movimiento de los soportes, demasiado esveltos, etc.) Ya que posteriormente el sistema se estabiliza con una variación mucho más pequeña considerando ese estado como el de levitación nominal. El tiempo aproximado de establecimiento del sistema es de unos 18 segundos, mayor que el obtenido en las simulaciones, debido al movimiento de los sensores.

En este estado de levitación nominal se aprecia como el sistema es estable, presentando unas oscilaciones de una amplitud aproximada de 0,4 mm, algo similar a lo obtenido en las simulaciones. Es destacable el hecho de que durante la levitación estable los air gaps medidos no se encuentran todos en los 18 mm, habiendo unidades por encima y debajo de la referencia, esto se explica por el hecho ya comentado de que las unidades y las medidas de los air gaps no son perfectas, existiendo desniveles y diferencias en las medidas, esto hace que al realizarse el control sobre la posición global del vehículo, esta si este en la referencia y por lo tanto el sistema se estabilice en este punto pero el vehículo tiene una pequeña desviación de la cual parte es real y parte viene debido a errores en el ajuste de los sensores. Tal como se muestra a continuación donde se presenta la posición en Z calculada del vehículo.

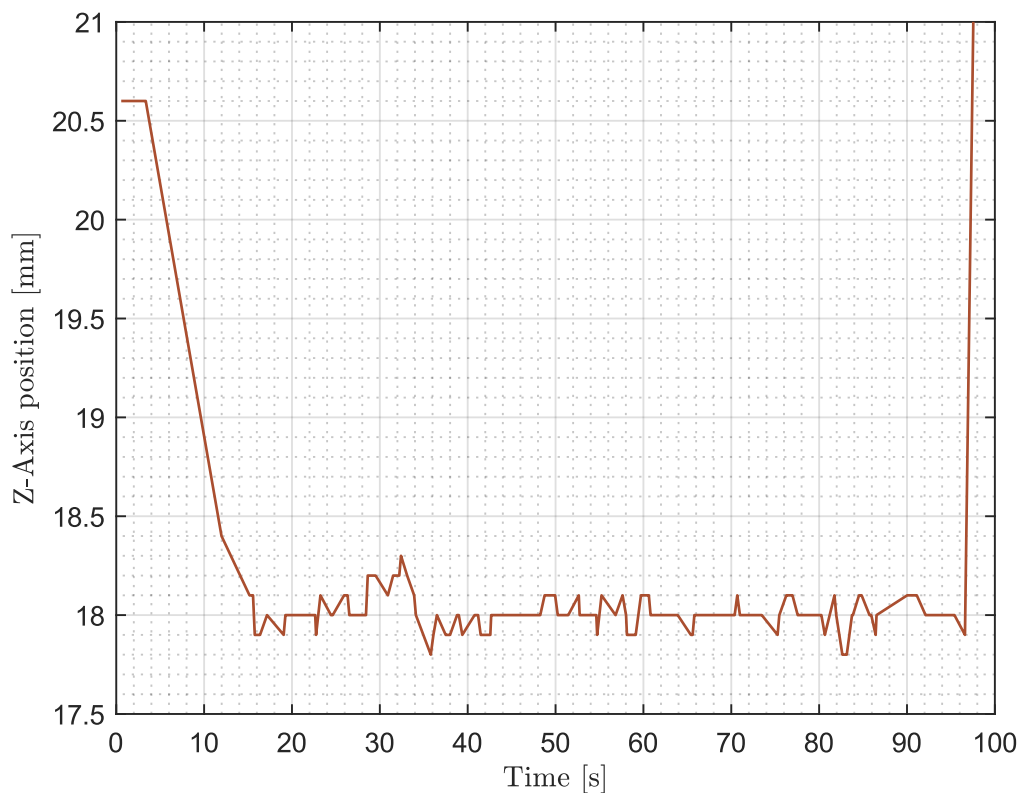


Figura 174. Posición Z vehículo ensayo levitación Auran

Esta grafica representa la posición en Z calculada que recordamos que es la variable que se obtiene a partir de la transformación de los air gaps y sobre la que se realiza el control. Se puede apreciar como esta alcanza la referencia y se mantiene estable en este punto a pesar de que todos los air gaps no estén de forma completamente precisa en esa referencia ya que intentar hacer esto sería imposible y llevaría a la desestabilización del vehículo.

Viendo la estabilidad del sistema y como la variable de control si alcanza la referencia las pequeñas desviaciones del air gap se asumen como parte del sistema real, no afectando en gran medida la mismo, tal como se muestra en el video del ensayo, en ese mismo video se puede apreciar la estabilidad del sistema y como se produce el despegue, comprobándose así la información presentada.

También presentaremos el alabeo y pitch calculado, visualizando así todas las variables del control del HEMS que recordamos es el único en este ensayo puesto que no se activaron los EMS.

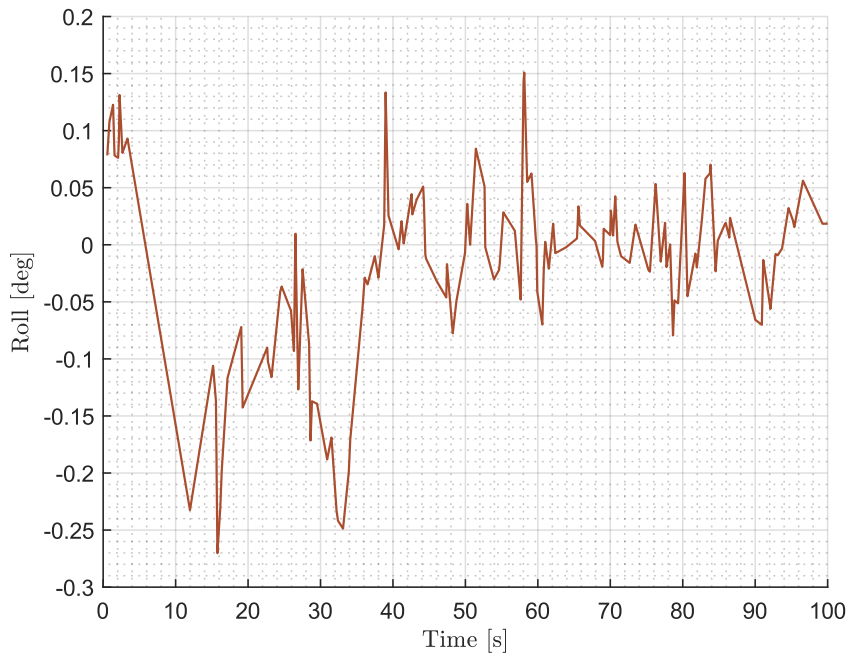


Figura 175. Alabeo ensayo levitación Auran

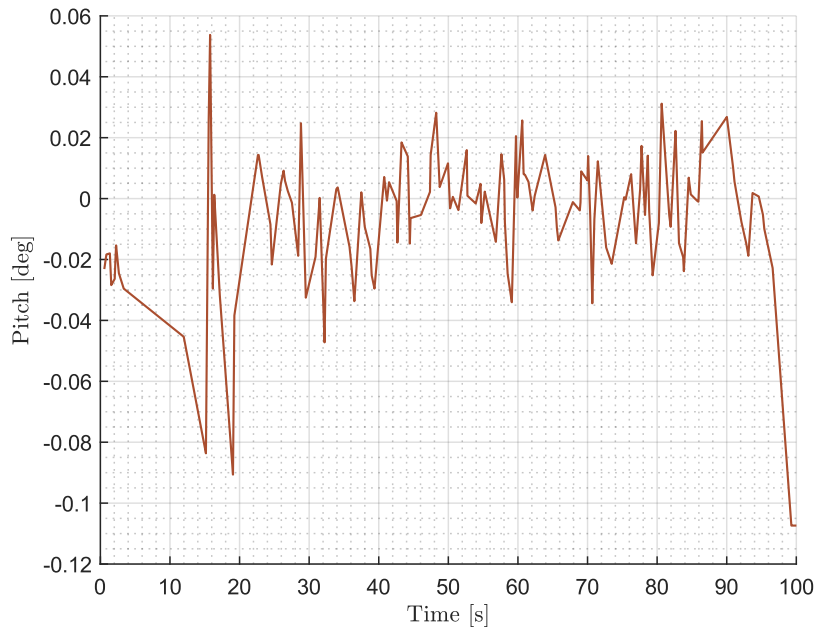


Figura 176. Cabeceo ensayo levitación Auran

Las dos variables de rotación que se muestran tienen un comportamiento más abrupto al inicio, durante el despegue y luego se estabilizan en torno a la referencia, aunque presentan un comportamiento más oscilante que la posición debido a la forma de cálculo de los mismos. A pesar de este comportamiento las variaciones se producen en torno a valores pequeños y que tanto de forma analítica como visual se comprueban que no suponen un problema para la estabilidad del vehículo.

Se puede apreciar como el comportamiento del alabeo es más problemático como ya se había adelantado, en parte debido a que no existe redundancia en estas medidas, así como por la disposición de las unidades que dificulta el control sobre este grado de libertad. En cualquier caso, al no estar los EMS activados en el ensayo no es completamente representativo del comportamiento, pero nos da una idea.

Comprobaremos también las corrientes, comenzando por las de referencia calculadas por el control.

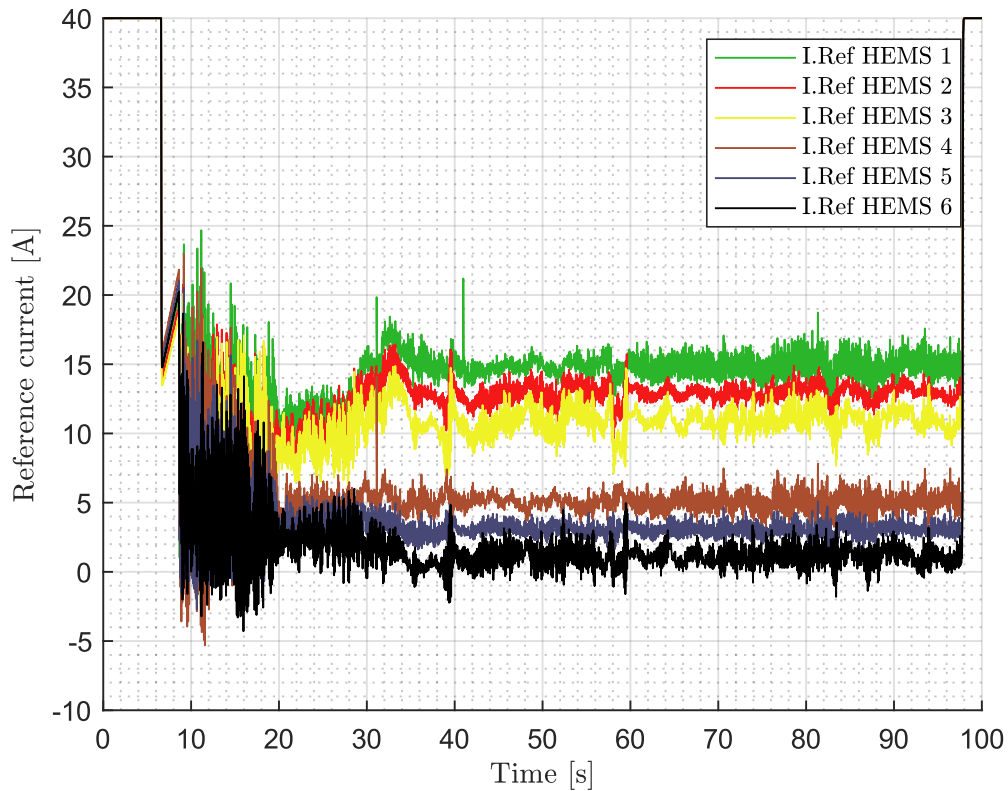


Figura 177. Corriente referencia ensayo levitación Auran

Lo primero que se aprecia es que al comienzo la corriente se encuentra en la saturación, esto se debe a que antes del comienzo del ensayo el control se ejecuta para que se inicialice, aunque no envía la corriente realmente y posteriormente cuando se le da el orden se resetea y comienza de nuevo, cosa que se puede apreciar también. Una vez el ensayo ha comenzado el control aumenta la corriente de referencia mediante la acción integral hasta que se alcanza la corriente necesaria para comenzar el movimiento. Cuando el vehículo a comenzado el despegue la corriente disminuye rápidamente a fin de frenar el sistema y estabilizarlo, en este caso concreto puesto que no se produce una sobreoscilación no es necesario el uso de corrientes negativas altas. Durante los instantes posteriores y respondiendo al comportamiento que también tenían los air gaps se produce una alta oscilación de la corriente de referencia que posteriormente se estabilizara. En este punto de estabilización se aprecia también el fenómeno de desbalanceo de las unidades, así como diferencias que existen entre el peso real del vehículo, el teórico y el usado en la simulación. Todo esto resulta en que las corrientes finales son algo más altas de lo esperado, estando algunas en un entorno entre 0 y 5 A, valores que podríamos considerar como de “zero power consumption” dado que el sistema trabaja a 50 V, mientras que otras están entre los 10 y 15 A. Esta diferencia se

explica por las diferencias entre las unidades de forma que la corriente nominal que se necesita realmente para alcanzar la estabilidad en el punto de funcionamiento difieren.

Respecto a la corriente real aplicada la mostraremos en la siguiente Figura.

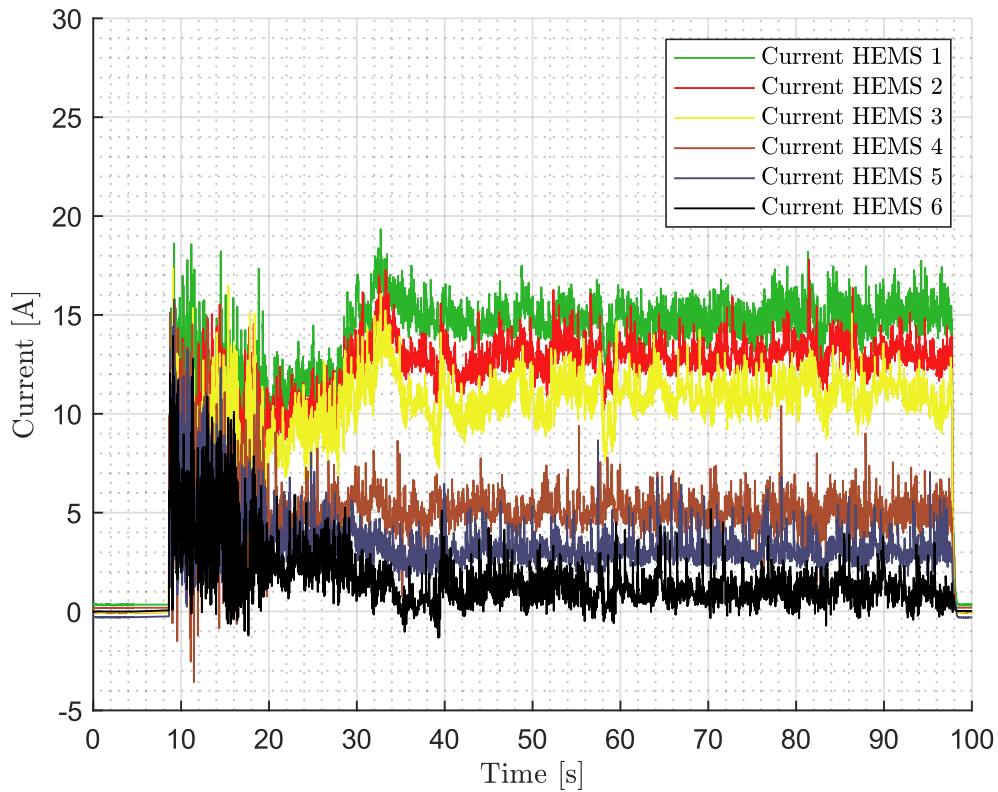


Figura 178. Corriente ensayo levitación Auran

Para la corriente real debido a un error del programa de adquisición de datos, se produce una pérdida puntual de información correspondiente a las corrientes durante el despegue, recuperándose poco después. En este caso esto nos permite ver los instantes posteriores al despegue.

En general se aprecia que la corriente aplicada es similar a la de referencia, aunque si se aprecia una oscilación mayor que en la de referencia. Durante este ensayo la corriente máxima consumida oscila en torno a los 15 A y la mínima en torno a 1 A, siendo la potencia consumida (obtenida mediante el cálculo y a partir de la información de la fuente) de alrededor de 300 W esto considerando el peso del vehículo de 132,8 Kg supone una relación aproximadamente 2,26 W/Kg. Este valor se considera como válido para referirse al sistema como de bajo consumo de potencia, aunque su buscara mejorar estos resultados.

Para comprobar las diferencias y el seguimiento entre ambas corrientes se realizará una comparativa para dos unidades de forma que sea más claro.

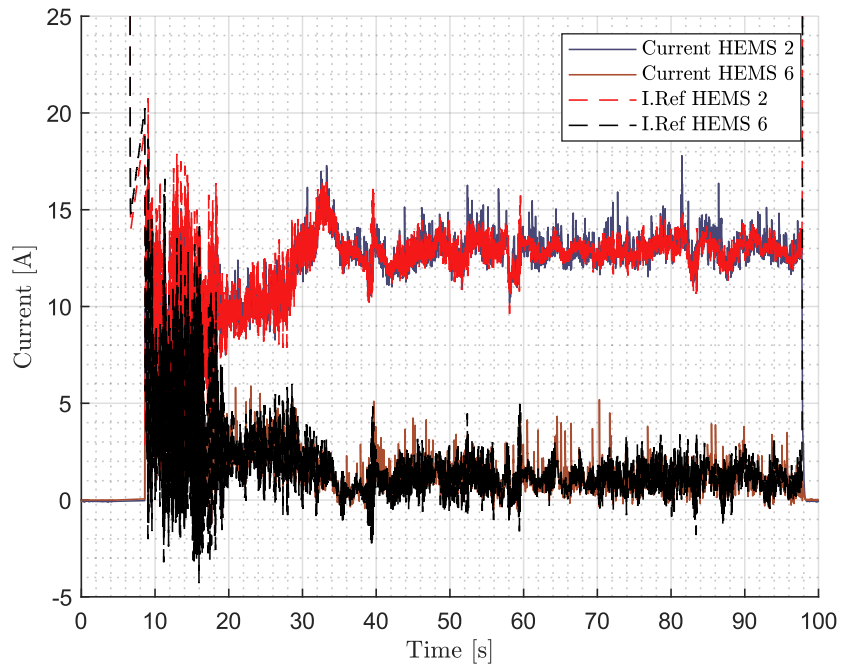


Figura 179. Seguimiento corriente ensayo levitación Auran

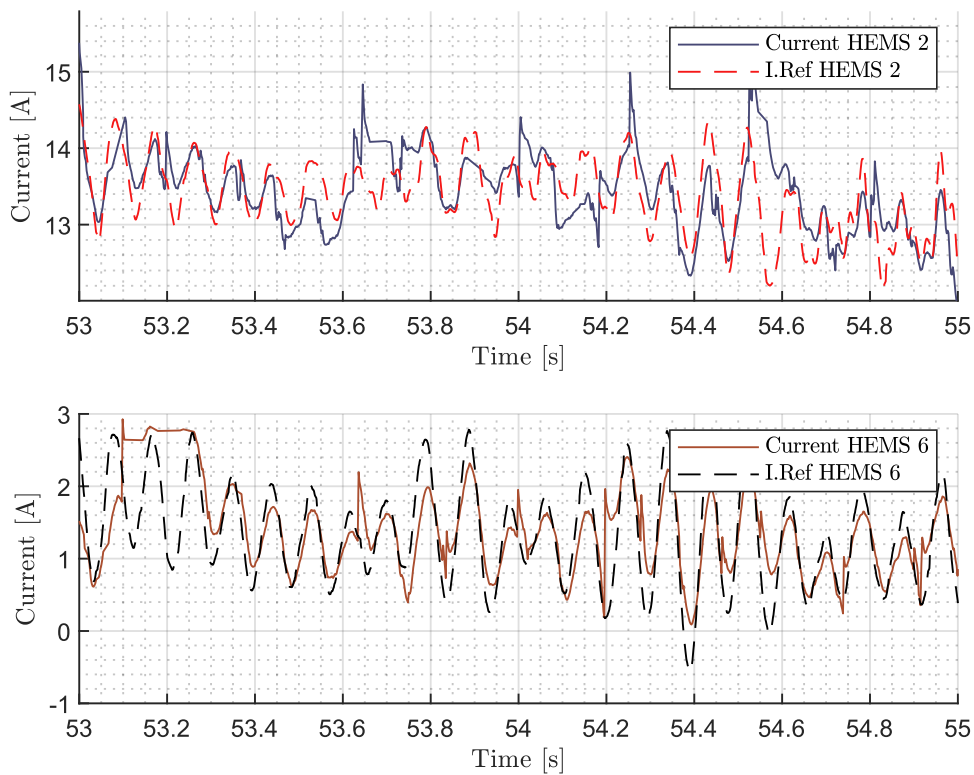


Figura 180. Detalle seguimiento corriente ensayo levitación Auran

En ambas imágenes se muestra como se ha producido el seguimiento de la corriente de referencia por parte del control de corriente. Se puede observar como aún existen diferencias entre ambos presentándose más picos y variaciones abruptas en la corriente real, de cualquier forma, se aprecia cómo se ha mejorado el comportamiento del seguimiento respecto de lo mostrado en la bancada de levitación. Si nos fijamos en los detalles de la corriente se aprecia como a pesar de las diferencias que existen en momentos puntuales el seguimiento de la corriente es bastante bueno, aunque si se presenta un cierto retraso debido que sin embargo no afecta excesivamente al sistema. Este buen seguimiento de la señal es clave en el funcionamiento del sistema ya que si no se lograra el sistema se volvería mucho más inestable o incluso se desestabilizaría.

Toda esta información corresponde a uno de los primeros ensayos realizados con el prototipo en el que no se activaron los EMS, de forma posterior se continuó trabajando en el mismo incluyendo ajustes, mejorando la colocación de las unidades, etc. Para alcanzar un sistema más refinado en el que también se incluyó el guiado lateral. El ensayo presentado a continuación corresponde con esta nueva “versión” que fue la que se utilizó durante la prueba de levitación en la cámara de vacío de Hardt, donde Auran fue capaz de levitar en vacío durante 45 minutos.

Antes de presentar los datos, remarcar que se seleccionó este ensayo debido a su duración, mostrando la estabilidad del mismo y que se activan y desactivan los EMS y se perturban en distintitos momentos, mostrando la robustez. A pesar de esto durante el despegue se produce un comportamiento más abrupto debido a que la distancia de despegue se aumentó y aun se estaban realizando el ajuste, este despegue se corrigió en la demostración final donde el despegue se asemejo más al presentado en el primer ensayo.

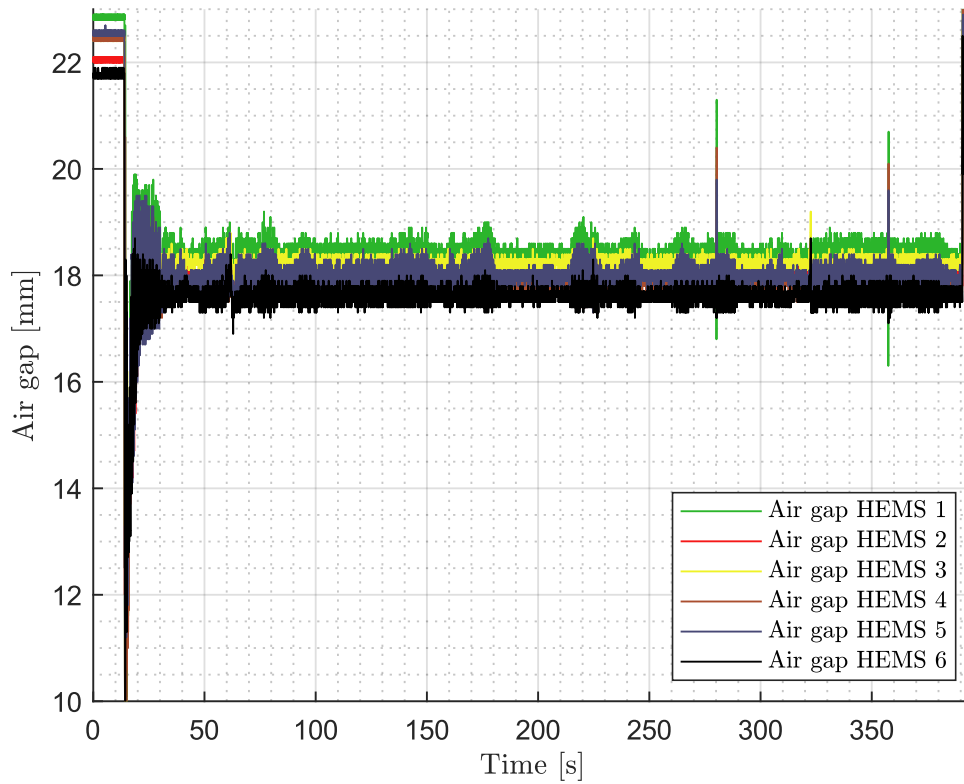


Figura 181. Air gaps HEMS ensayo levitación completo Auran

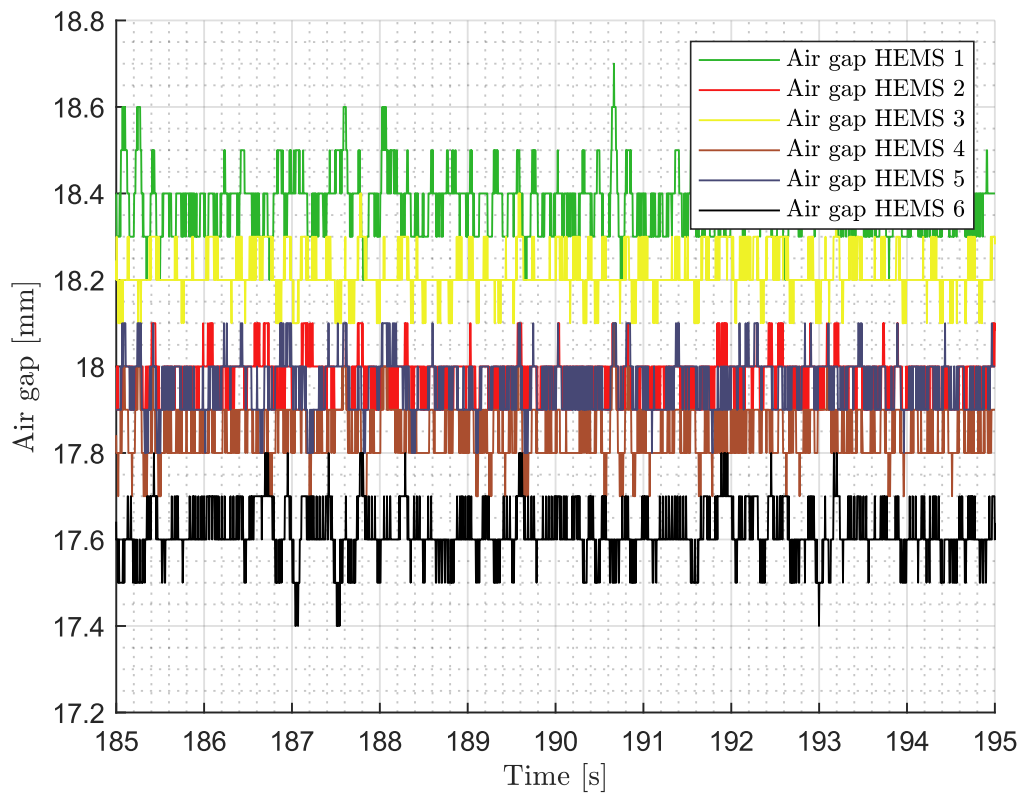


Figura 182. Detalle air gaps HEMS ensayo levitación completo Auran

Al inicio del ensayo se ve el peor comportamiento durante el despegue ya comentado y que posteriormente se solucionó. Durante este ensayo la distancia de despegue se aumentó hasta el entorno de los 22 mm lo cual dificulta el despegue. Independientemente de esto se sigue apreciando como existe una oscilación más acentuada justo después del despegue debido al movimiento físico del sistema, siendo esta amortiguada por el sistema hasta llegar a la situación de levitación estable. Una vez alcanzado este estado se demuestra como el sistema es estable al estar levitando por más de 6 minutos, además se aprecia cómo se ha llegado a mejorar el comportamiento del sistema, reduciéndose las oscilaciones de air gap en estado estacionario a una amplitud de aproximadamente 0,2 – 0,3 mm. También se observa como para este ensayo el vehículo está más “centrado” en torno a la referencia debido al ajuste hecho de las unidades.

De igual manera se aprecia como estas oscilaciones van variado a lo largo del ensayo, pero se mantiene estable a pesar de la activación, perturbación y desactivación de los EMS cuya variación se mostrará a continuación.

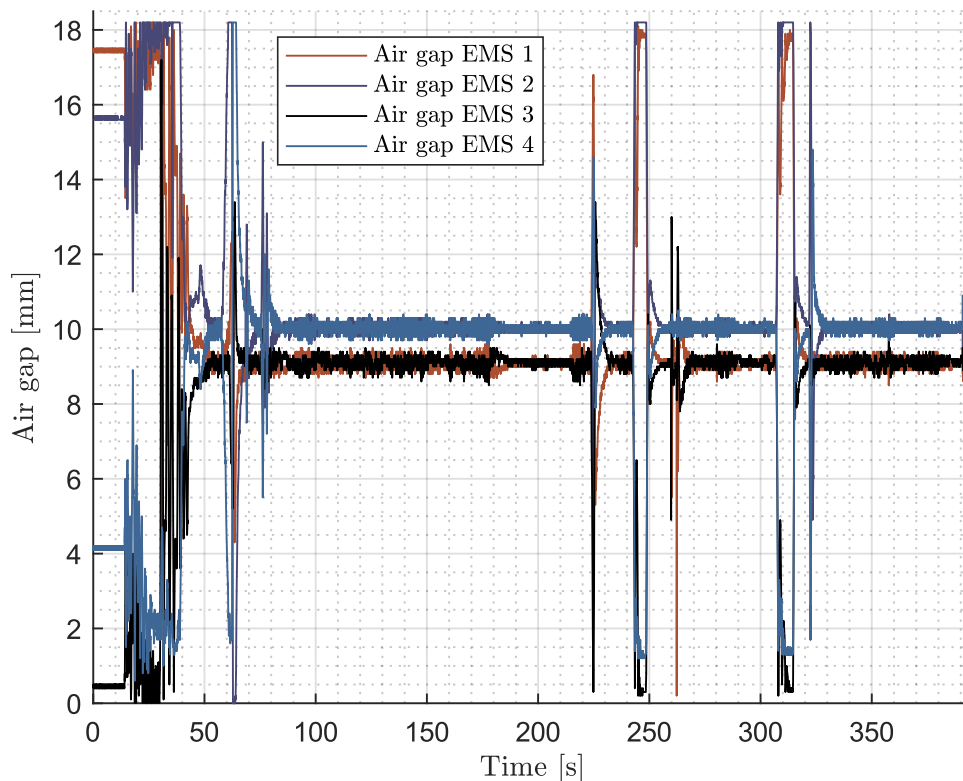


Figura 183. Air gaps EMS ensayo levitación completo Auran

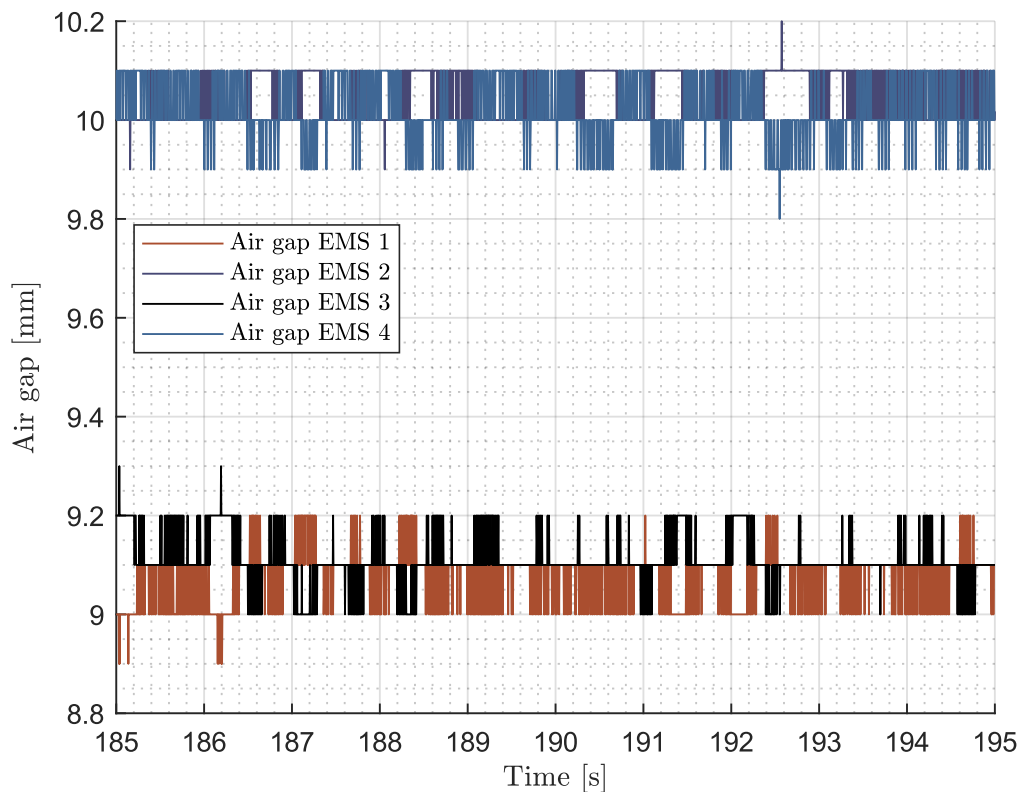


Figura 184. Detalle air gaps EMS ensayo levitación completo Auran

El procedimiento para activar el sistema de guiado es que se realiza el despegue únicamente con los HEMS de forma que los EMS no perturben este proceso y una vez el sistema está estabilizado será cuando se active el guiado.

Al inicio del ensayo se puede determinar que el vehículo está pegado a uno de los laterales del tubo, se aprecia también como al igual que para los HEMS debido al posicionamiento de las unidades y los sensores, así como el del propio vehículo las unidades no comienzan en el mismo valor exactamente. También se aprecia como cuando se estabilizan no lo hacen exactamente en la misma distancia debido a los factores ya comentados, así como que las distancia a las planchas con el vehículo centrado no eran iguales debido a desalineamientos. En cualquier caso, puesto que se trabaja con posición global esto no supondrá un problema.

Durante el despegue se aprecia como las vibraciones afectan también a las medidas de los air gaps de los EMS perturbándolos. Poco después se trata de centrar el vehículo de forma manual para posteriormente activar el guiado lateral, esto se realiza así solo la primera vez a fin de comprobar el funcionamiento desde diferentes puntos de partida, se aprecia como el sistema se estabiliza en torno al punto de funcionamiento durante unos segundos.

Después de esto y ya habiendo comprobado el funcionamiento se desactiva el sistema de guiado, observándose como los air gaps se desplazan a las posiciones de los extremos y en este instante se activa el sistema de guiado de nuevo para comprobar su funcionamiento desde estas posiciones, durante el proceso se produce una sobreoscilación sin embargo se considerara aceptable ya que al intentar reducirla se perturbaba la estabilidad del sistema en exceso por lo que se permite este comportamiento menos agresivo, independientemente de esto se comprueba cómo después de esto el sistema llega a estabilizarse en la posición en la que queda centrado en el tubo. Para el air gap de los EMS en estado estable hay una oscilación de una amplitud de aproximadamente 0,1 – 0,2 mm. Posteriormente durante el ensayo se realizan más pruebas activando y desactivando los EMS apreciándose un comportamiento similar en todos los casos.

En esta situación en la que ya se ha estabilizado se está ejecutando la levitación y el guiado con unas oscilaciones mínimas del sistema.

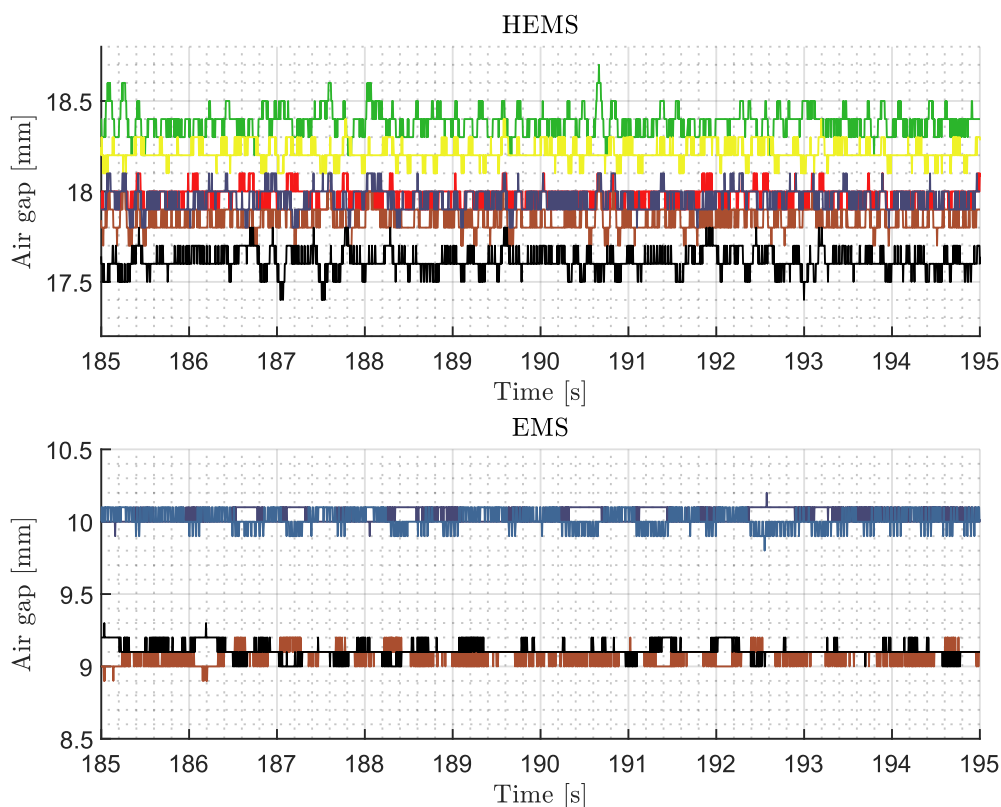


Figura 185. Detalle air gaps ensayo levitación completo Auran

Con toda esta información se puede apreciar como el sistema es estable y robusto cuando se produce la levitación y guiado, así como se demuestra que el sistema de control es

capaz de controlar el comportamiento del vehículo usando las diferentes tecnologías de levitación magnética. Cumpliéndose así varios de los objetivos propuestos.

Como se ha comentado el control se realiza sobre las variables globales por lo que a continuación se mostrarán, ya que nos dan también una mejor comprensión del comportamiento.

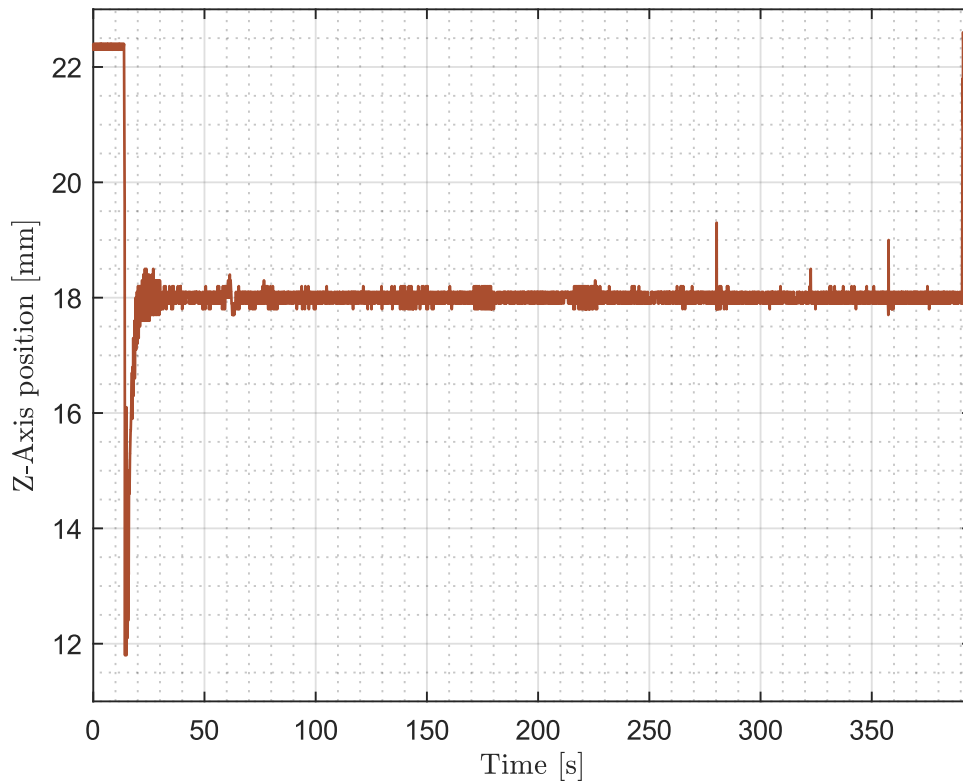


Figura 186. Posición en eje Z ensayo levitación completo Auran

Se observa como la posición global tiene un comportamiento como el de los air gap, realizándose el despegue desde algo más de 22 mm, produciéndose una oscilación que llega hasta los 12 mm y finalmente estabilizándose en 18 mm donde la variación que presenta esta variable es pequeña, siendo de amplitud 0,2 mm.

Para este ensayo puesto que si se activan los EMS podemos comprobar cómo evoluciona la posición en Y global.

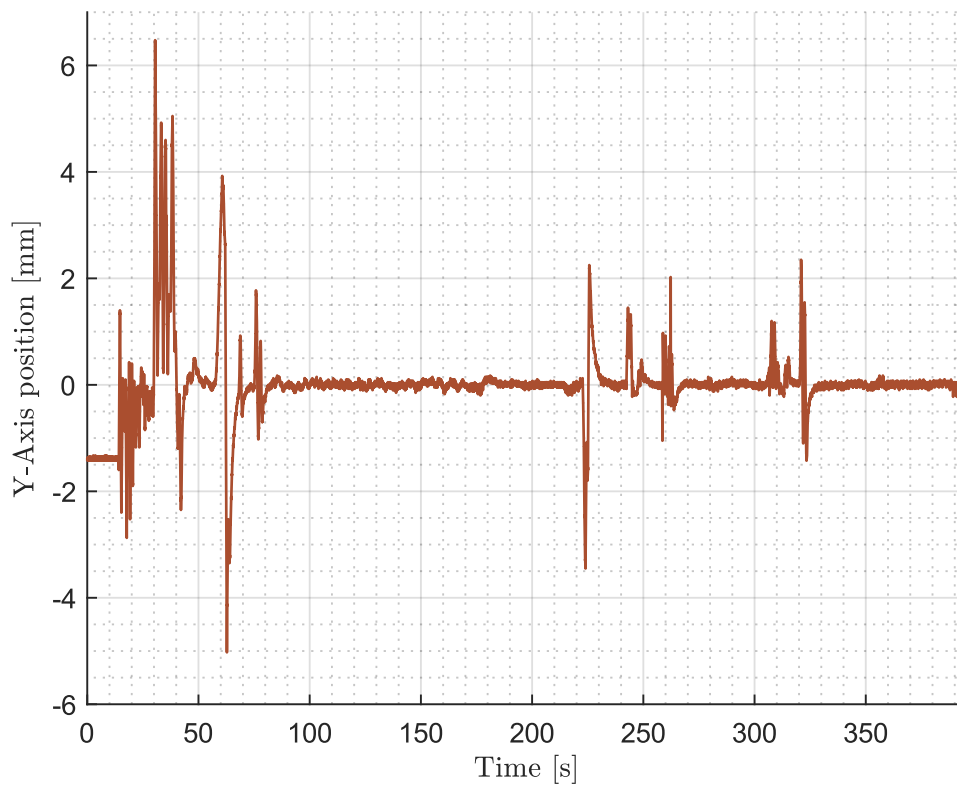


Figura 187. Posición en eje Y ensayo levitación completo Auran

En este caso se aprecia un comportamiento similar al obtenido para los air gaps comenzándose lejos del punto central y posteriormente estabilizándose en torno a este con una oscilación de 0,15 mm de amplitud, produciéndose de la misma forma un desplazamiento en los momentos en los que se desactivo el guiado o se perturbo. Independientemente se ve como la posición global del vehículo para esta variable se mantiene muy estable en torno a su referencia. Esto permite que incluso durante la levitación dinámica el vehículo no llegue a entrar en contacto con las planchas laterales.

Respecto a las rotaciones se muestra primero el alabeo.

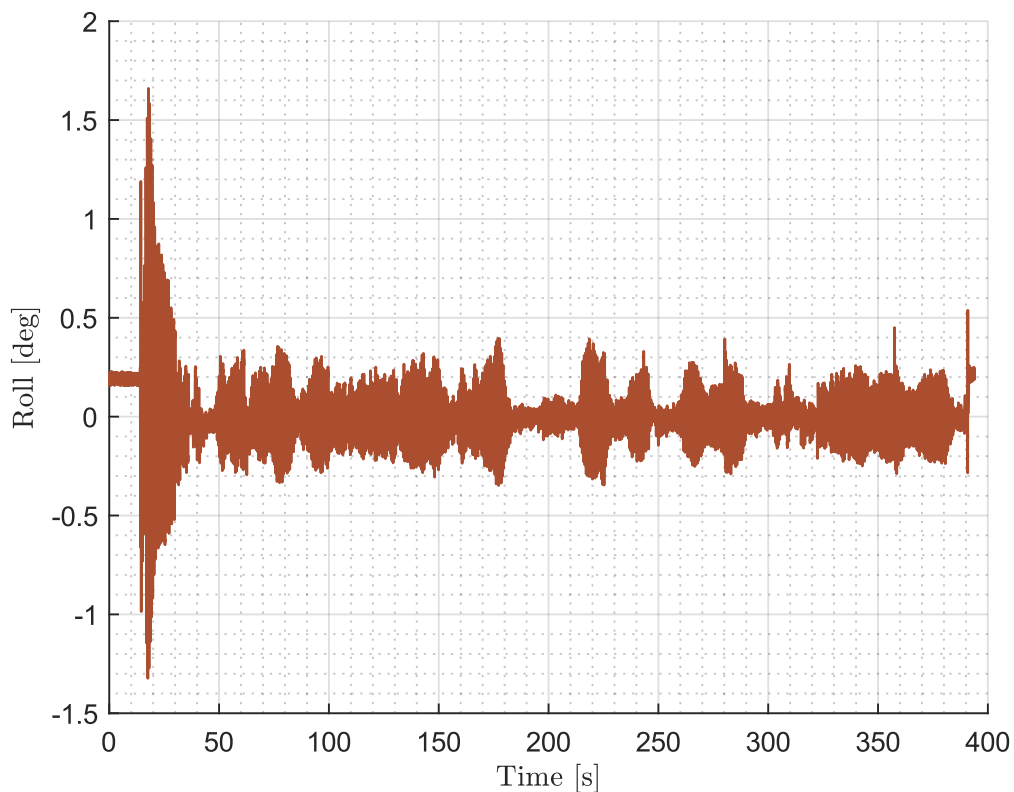


Figura 188. Alabeo ensayo levitación completo Auran

Se puede apreciar como el alabeo como ya se había visto es una variable problemática para el vehículo por el diseño del mismo ya que la activación del EMS perturba esta variable y él es HEMS el responsable de corregirla afectando por lo tanto al resto. Este proceso resulta en un comportamiento oscilante del sistema que no es capaz de lograr una estabilización en torno a valores menores como lo hace para otras variables. Durante todo el proceso de testing se buscó mejorar este comportamiento sin embargo el problema continuó apareciendo, aunque a menor escala, siendo representativo del funcionamiento la gráfica presentada. También se puede apreciar cómo se producen oscilaciones mayores en los momentos que coinciden con desactivación y activación del EMS. Se observa también como el sistema puede llegar a un punto de funcionamiento más estable que también aparecía para el air gap, sin embargo, el sistema requiere de un tiempo largo para entrar en este estado y cuando se perturba se vuelve al estado más inestable. En cualquier caso, el comportamiento, aunque problemático fue capaz de mantenerse dentro de los límites de funcionamiento normales durante los ensayos incluyendo la levitación dinámica.

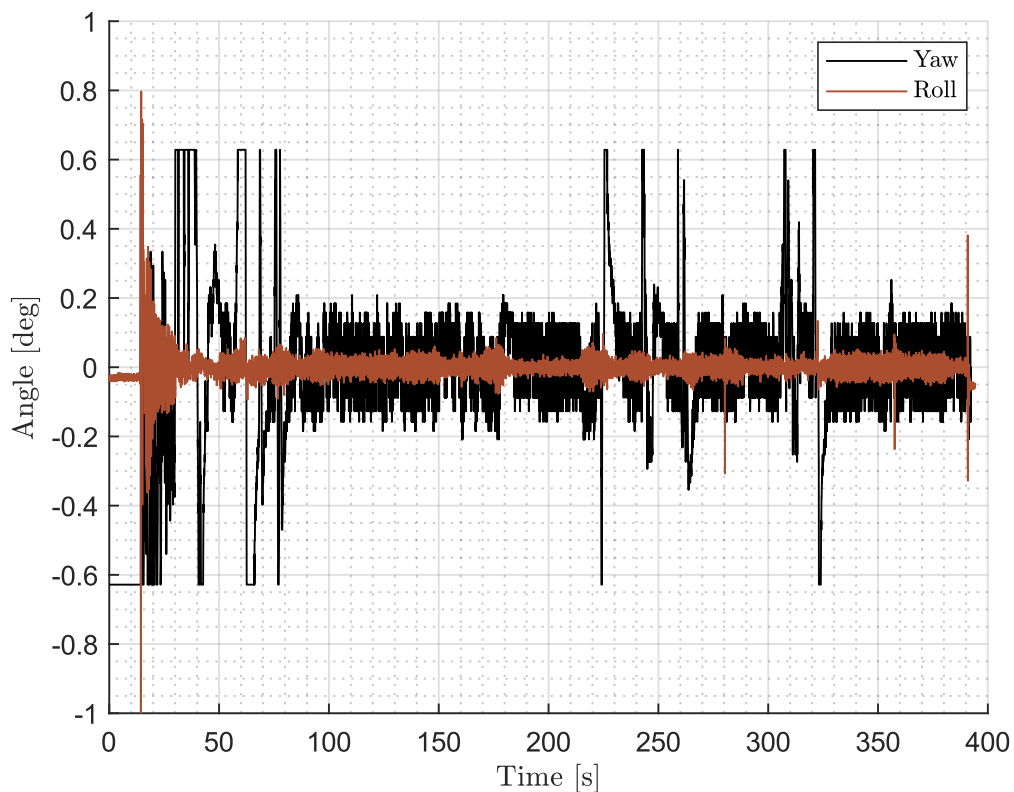


Figura 189. Guiñada y cabeceo ensayo levitación completo Auran

Por último, se muestran el cabeceo y la guiñada en una misma grafica ya que sus valores son más parejos que los del alabeo. Se aprecia un comportamiento similar al del alabeo en el sentido de que no se estabiliza tanto como lo hace las posiciones, en parte debido a como se obtiene la señal y que al ser valores pequeños son más afectados por el ruido.

Respecto al cabeceo se observa como inicialmente se produce una oscilación relativamente alta, debido al despegue y las vibraciones posteriores y como después, aunque continua con una ligera oscilación se estabiliza en torno a un valor bastante pequeño (tal como se puede comprobar visualmente) por lo que el comportamiento se considera correcto.

Finalmente, respecto a la guiñada presenta una mayor oscilación debido en parte a la menor agresividad de los EMS lo que hace que la corrección sea más lenta. También se puede observar el efecto de activar y desactivar el guiado sobre la guiñada. Al igual que para el alabeo se trató de mejorar el comportamiento de esta variable sin perjudicar demasiado la estabilidad del conjunto. Independientemente los valores mostrados en la gráfica oscilan en torno a valores aceptables y permiten que el vehículo no choque con las paredes laterales de forma que se considera correcto.

También se mostrará la variable de velocidad asociada a la posición para mostrar cómo es la obtención de la misma con la ponderación y todo el proceso ya descrito.

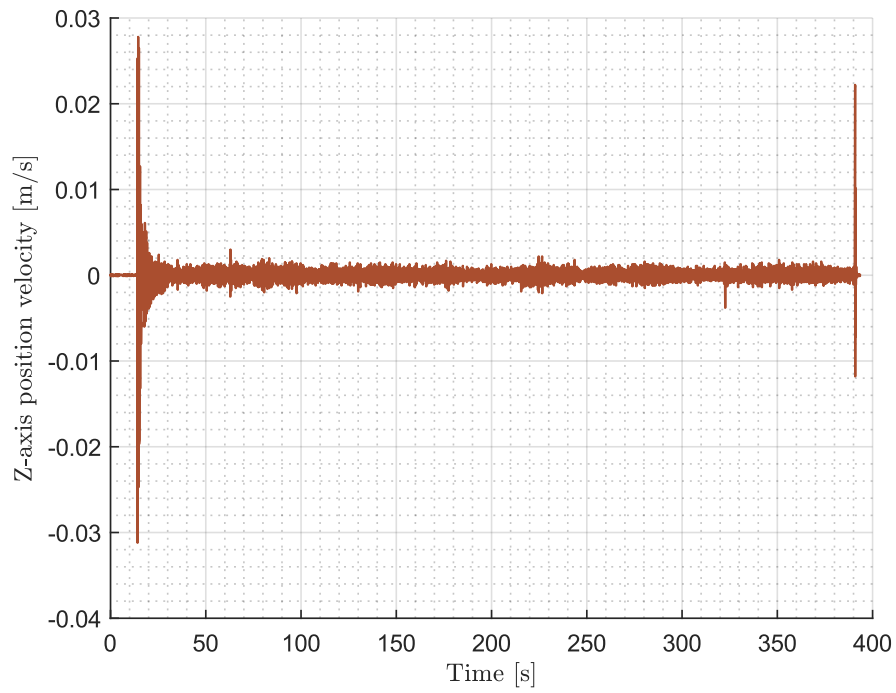


Figura 190. Derivada posición eje Z ensayo levitación completo Auran

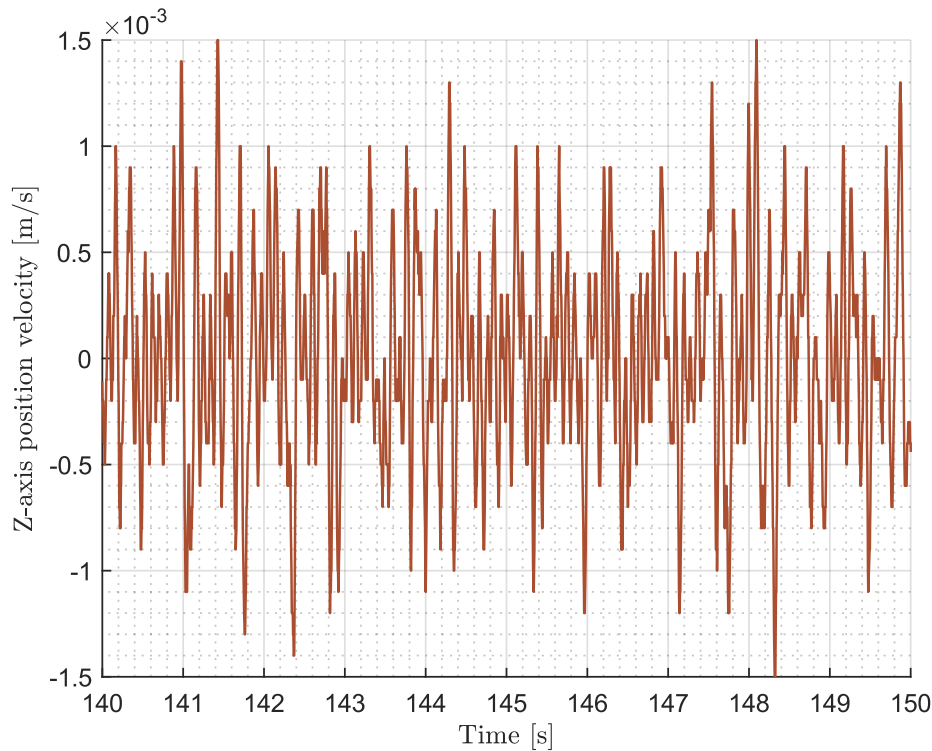


Figura 191. Detalle derivada posición eje Z ensayo levitación completo Auran

Estas gráficas muestran el valor de la derivada calculada, en la imagen global se ve como existe un valor muy alto de la derivada durante el despegue, lo cual es lógico con las características del mismo y como luego el valor de esta toma un valor mucho más pequeño una vez estabilizado. En el detalle se observa el valor de la derivada y su comportamiento. Este es muy oscilante y abrupto debido a la forma de obtención del mismo sin embargo considerando como se obtiene se trata de una señal buena puesto que para el caso en el que el vehículo esta estable el valor está comprendido dentro de un rango aceptable y no tiende a generar oscilaciones y durante el despegue cuando la acción derivativa es más importante el valor si es alto permitiendo la disipación. Esto hace que se considere como buena la adquisición de esta señal.

Después de ver el comportamiento del sistema pasaremos a estudiar las corrientes de referencia calculadas en este caso por el control de los HEMS y EMS. Primeramente, se presenta la corriente calculada para los HEMS

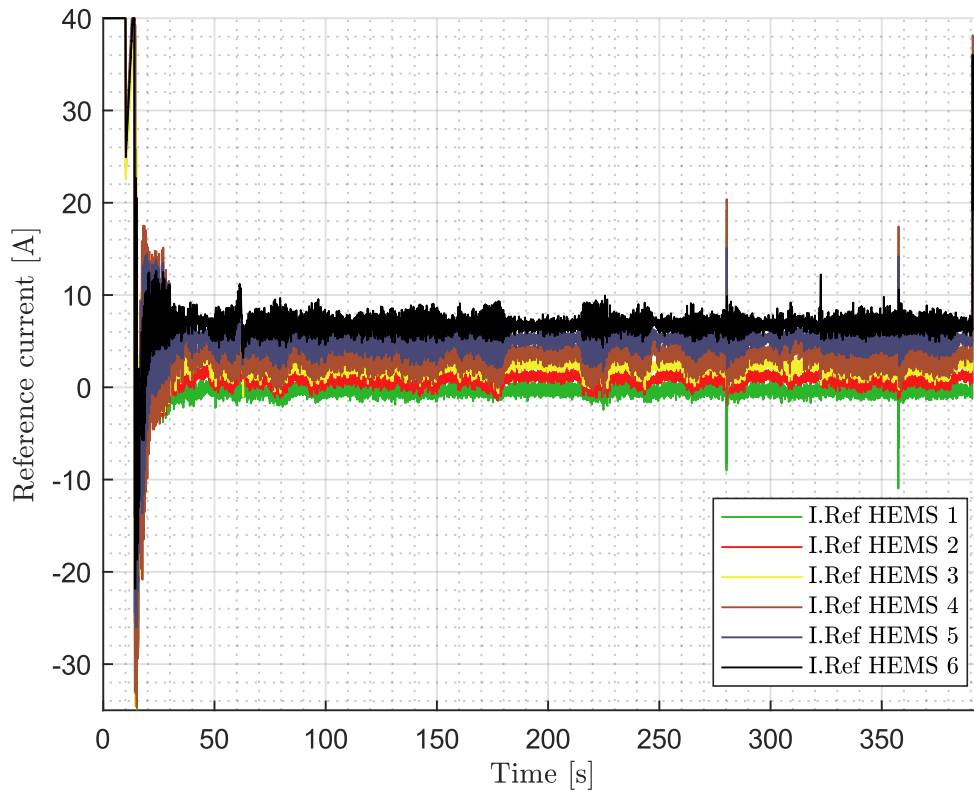


Figura 192. Corriente de referencia HEMS ensayo levitación completo Auran

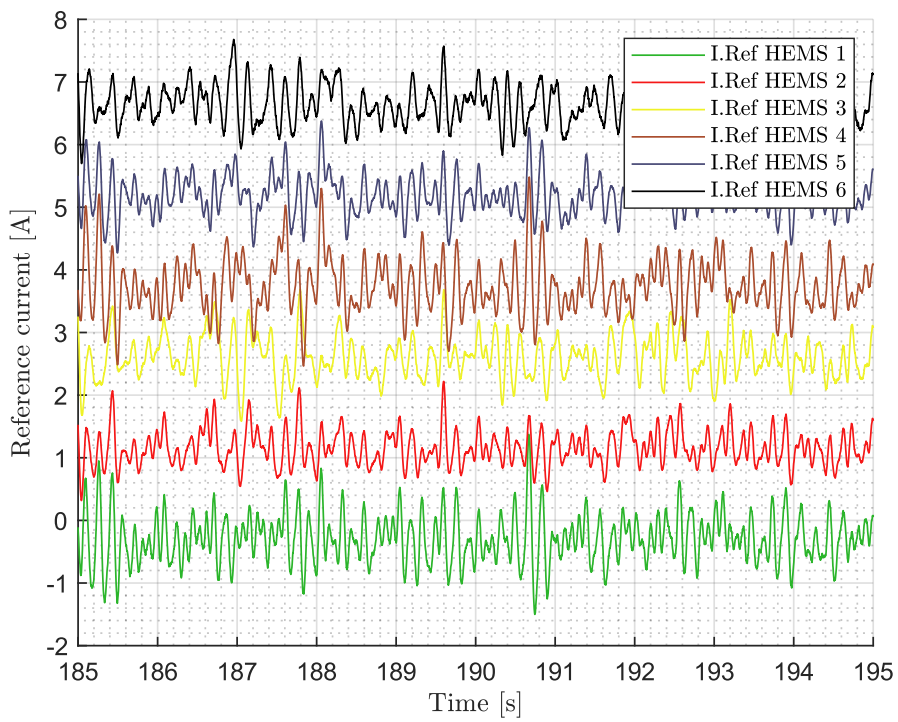


Figura 193. Detalle corriente de referencia HEMS ensayo levitación completo Auran

Durante el ensayo se aprecia como la corriente de referencia responde a los fenómenos vistos para el air gap, inicialmente se ve como esta está saturada hasta que se da la orden de comenzar cuando se resetea el sistema y puesto que la corriente inicial no es suficiente para hacer despegar al sistema esta aumenta hasta que se consigue, en este caso debido a la mayor provocan que en este caso se deba llegar a la corriente máxima para comenzar el despegue. Una vez alcanzada el vehículo comenzara a moverse, pero debido a que la fuerza generada en este caso es mayor también lo será la velocidad del vehículo provocando la sobreoscilación que se vio. Para tratar de estabilizar el sistema se aplicará también corriente negativa lo que ayudará a que este caiga y finalmente se estabilice en la posición de reposo. Una vez en esta a diferencia del ensayo anterior se ve como las corrientes estas “espaciadas” en un rango entre los -1 A y los 7 A, siendo estos valores más bajos lo que repercutirá en un consumo menor de corriente objetivo buscado. También se aprecia cómo una vez alcanzada la estabilidad el sistema es muy estable incluso considerando las perturbaciones.

Respecto los EMS las corrientes calculadas son las siguientes.

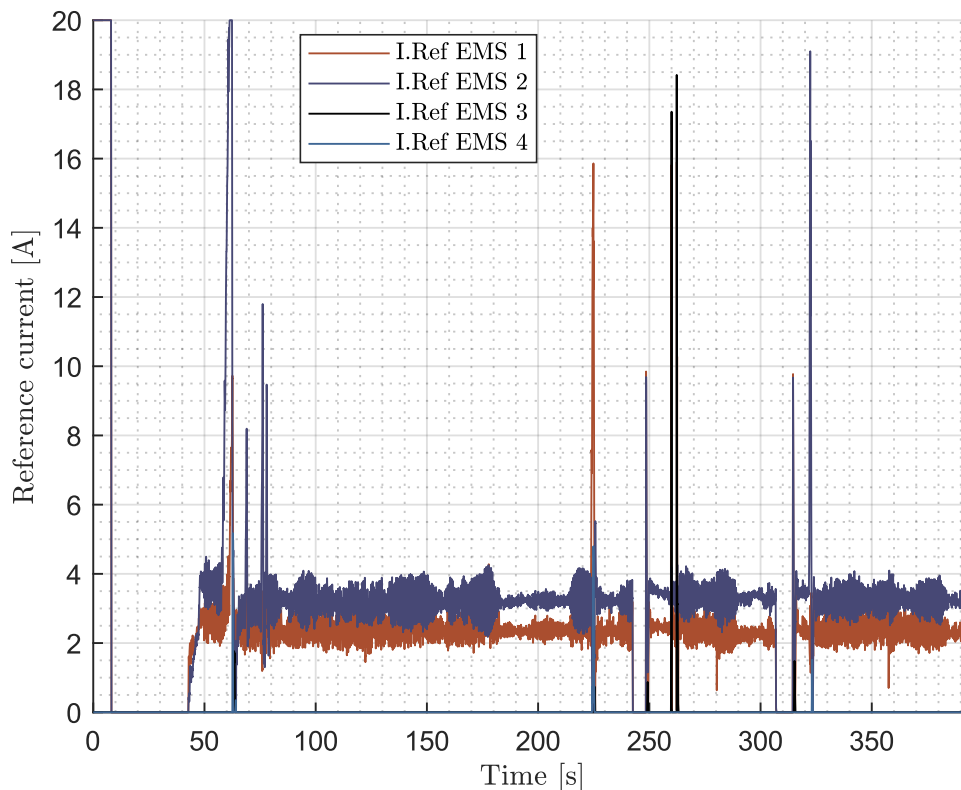


Figura 194. Corriente de referencia EMS ensayo levitación completo Auran

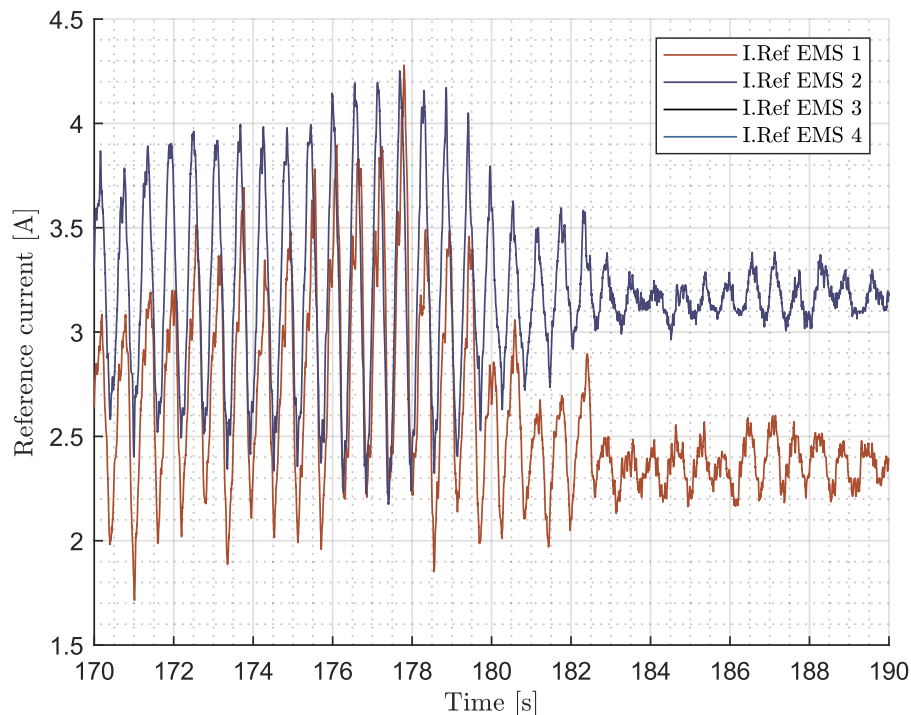


Figura 195. Detalle corriente de referencia EMS ensayo levitación completo Auran

Para los EMS encontramos que su comportamiento en general es poco agresivo como ya se ha adelantado con corrientes de referencia bajas en general salvo para los casos en los que se debiese recuperar de una perturbación o se volviese a activar el guiado. Durante el proceso de estabilización se aprecia como en general el sistema después de haberse perturbado o activado presenta una oscilación mayor que después disminuye, correspondiéndose esto con que se necesita tiempo para disipar las oscilaciones debido a la “suavidad” del control, una vez alcanzado este sistema los EMS presentan unas oscilaciones en la corriente similares a las de los HEMS. También se aprecia cómo una vez alcanzada la estabilidad la corriente no es cero, sino que las unidades de uno de los laterales han de permanecer activas, esto se explica debido a que existe un desbalanceo en el reparto de masa del vehículo por lo que si no se acciona de forma externa este tiende a irse hacia un lado debido al momento generado por el desbalanceo y los EMS deberán compensar este efecto.

En general tanto las corrientes de referencia de los HEMS como de los EMS presentan un comportamiento correcto, con unas oscilaciones aceptables una vez en el punto de funcionamiento y siendo capaces de resistir perturbaciones y de realizar el despegue, por lo que se considera que el control de posición del vehículo funciona de forma correcta.

A continuación, se mostrará la corriente real en los HEMS

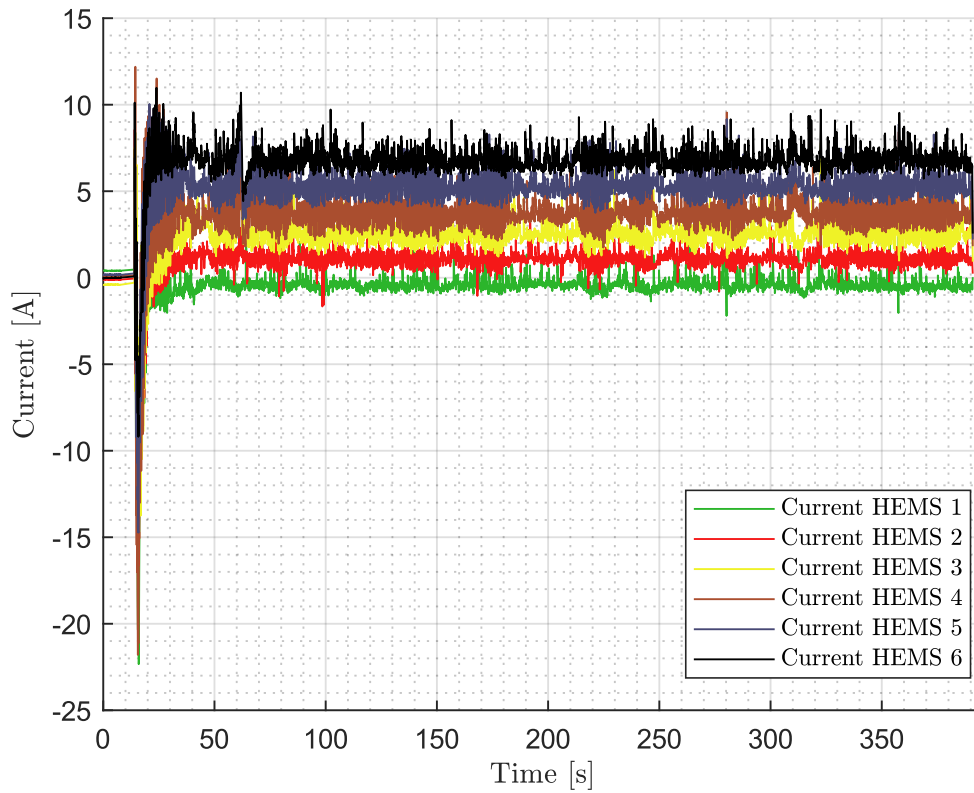


Figura 196. Corriente HEMS ensayo levitación completo Auran

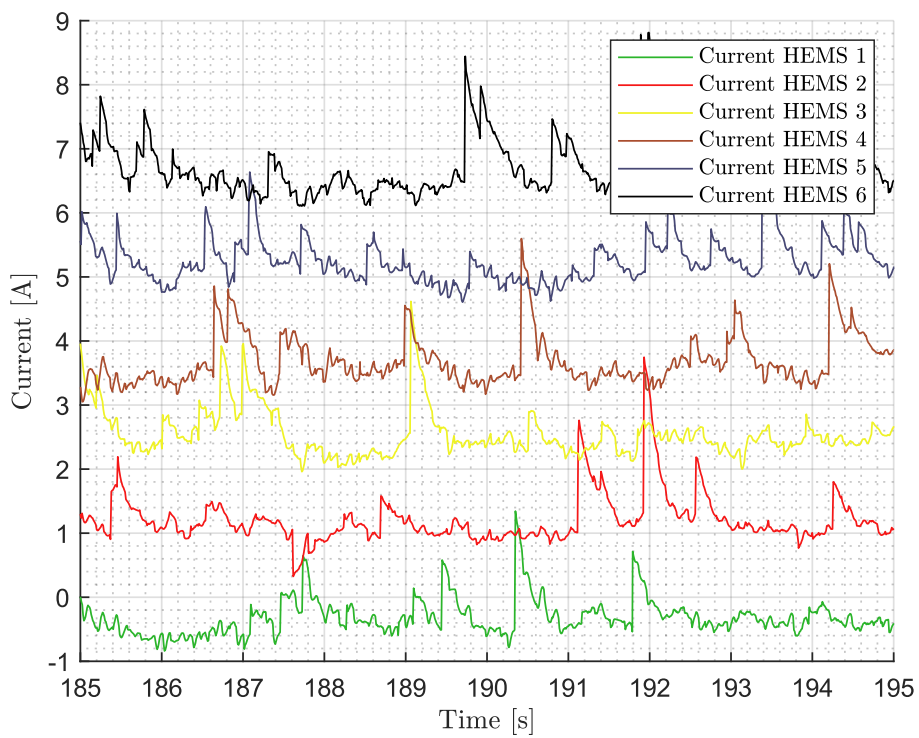


Figura 197. Detalle corriente HEMS ensayo levitación completo Auran

Lo primero que se puede apreciar al igual que paso para el otro ensayo es el problema en la adquisición de datos en el momento inicial, recalcar que este problema es solo en la adquisición ya que si no el vehículo no sería capaz de despegar. La corriente aplicada parece ser muy similar a la de referencia calculada, aunque si se nota la aparición de picos esporádicos algunos debidos al ruido introducido al conmutar los mosfets y otros debido al propio control de corriente. Se aprecia también como al igual que para la referencia en este caso las corrientes están en valores en torno a -1 y 8 A valores bastante buenos y que resultan en un bajo consumo. Si nos fijamos en el seguimiento de la corriente.

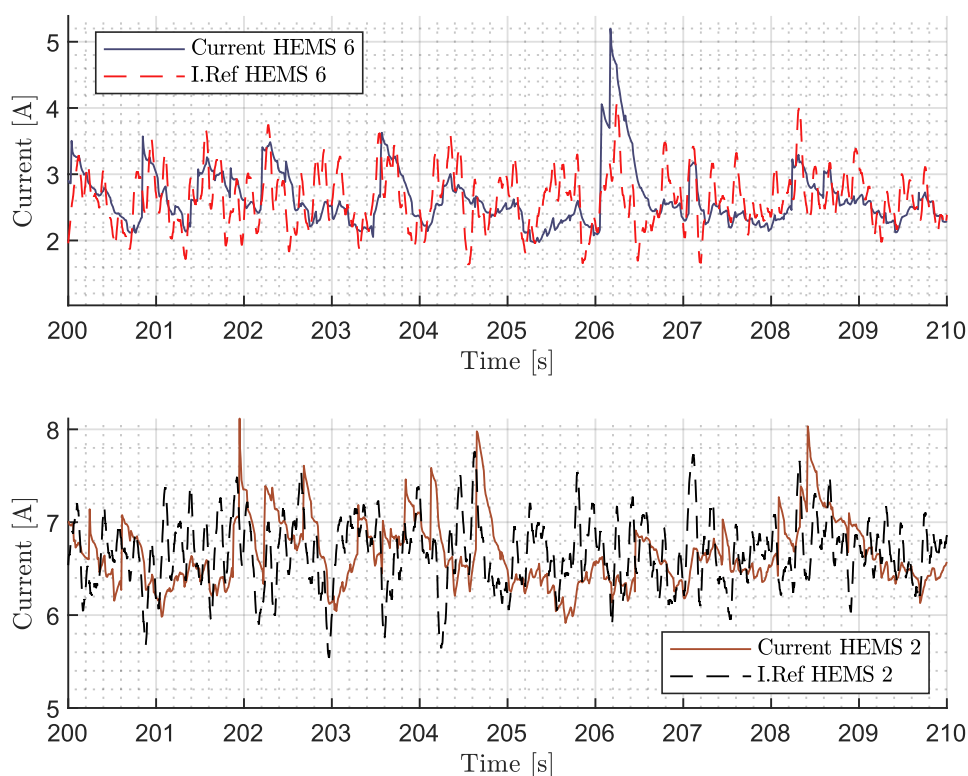


Figura 198. Seguimiento de la corriente HEMS ensayo levitación completo Auran

Se puede apreciar como a pesar de que existen ciertas diferencias y que el seguimiento no es perfecto este es bastante bueno, de la misma forma existe un retraso en el mismo, pero este no es tan significativo como para suponer un problema por lo que se da por bueno el comportamiento del control de corriente de los HEMS.

De forma análoga la corriente en los EMS se presenta a continuación.

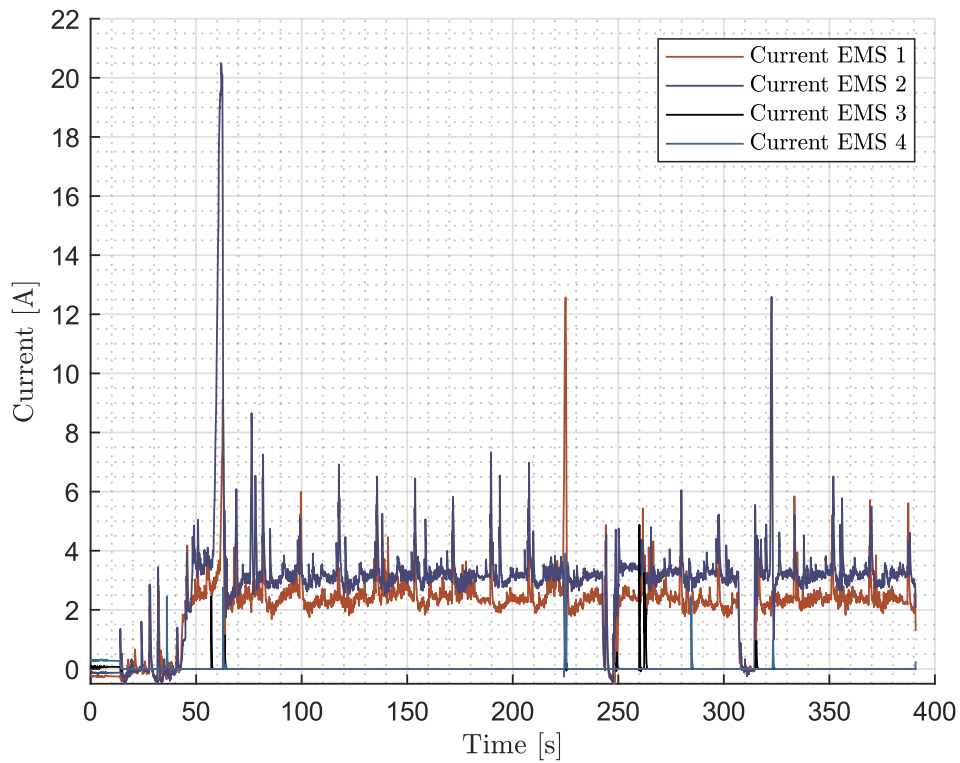


Figura 199. Corriente EMS ensayo levitación completo Auran

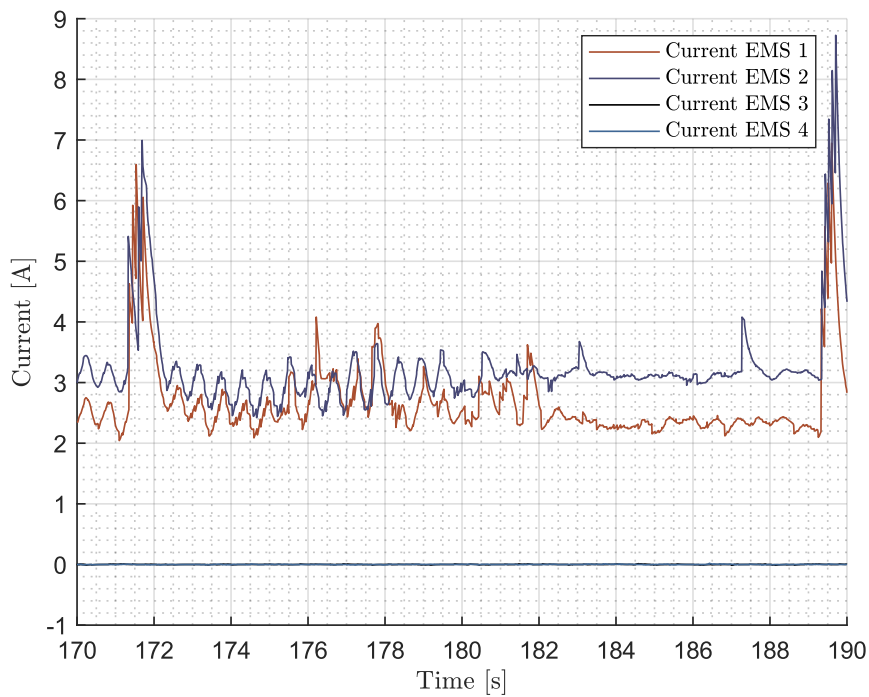


Figura 200. Detalle corriente EMS ensayo levitación completo Auran

En el caso de los EMS lo primero que apreciamos es que existen unos picos mayores que los que se presentaban en los HEMS, estos son probablemente debidos a la conmutación

de los mosfets por lo que no deben tenerse en cuenta como valores “reales” aplicados de lo contrario el comportamiento del sistema se vería afectada cosa que se ve que no ocurre. Lo siguiente que se observa es que debido a las inestabilidades del control de corriente se aplican pequeñas corrientes negativas al inicio, sin embargo, no se considera un problema. A lo largo de todo el ensayo se observa como la corriente tiene un comportamiento muy similar al calculado y cuando observamos esto una vez estabilizado vemos que la variación de la misma es pequeña estando alrededor de los 3 A para las unidades activadas. También compararemos el seguimiento en este caso.

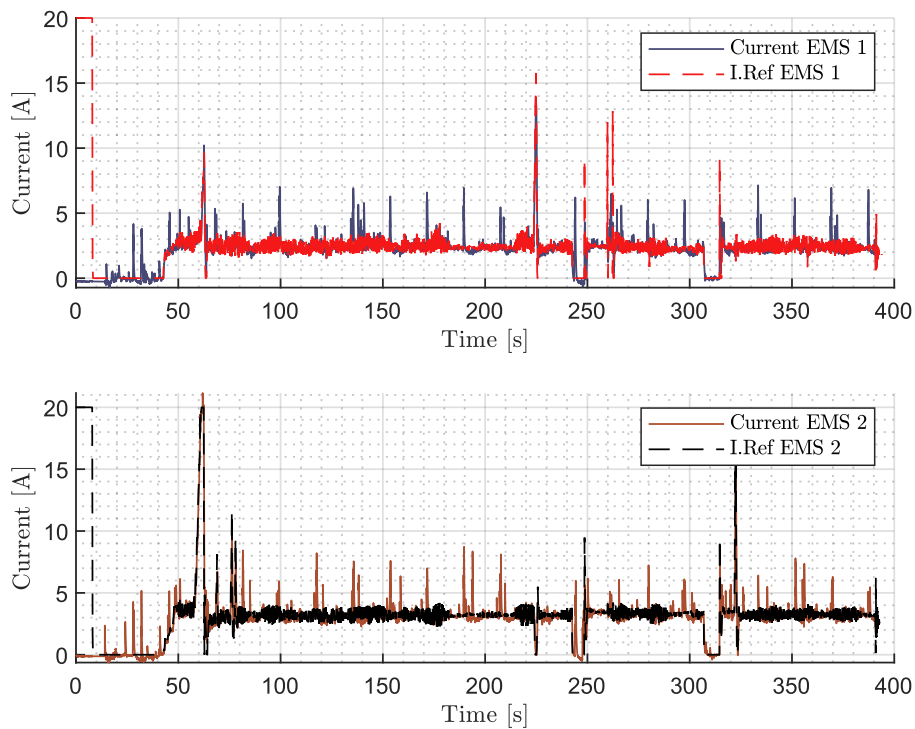


Figura 201. Seguimiento de la corriente EMS ensayo levitación completo Auran

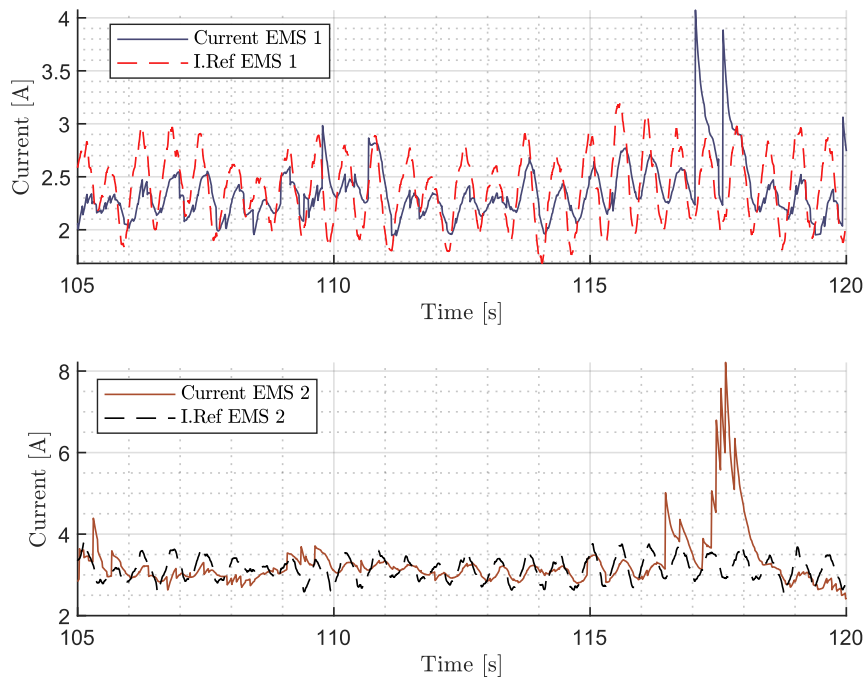


Figura 202. Detalle seguimiento de la corriente HEMS ensayo levitación completo Auran

En general se aprecia que el seguimiento que se produce es similar al de los HEMS, produciéndose un buen seguimiento de la corriente a pesar de que se aprecia un retraso. La corriente aplicada tiene pequeñas variaciones respecto la calculada, pero en general es seguimiento es correcto.

Si analizamos el consumo del sistema para este ensayo en el que si se produce la levitación y el guiado se obtiene un valor de potencia necesaria para la levitación una vez el sistema se ha estabilizado de aproximadamente 100 W reduciéndose en este caso la relación entre potencia y peso (132,8 Kg) a 0,753 W/Kg, un valor muy inferior al obtenido en el ensayo anterior y con el cual se puede determinar que el vehículo es virtualmente un sistema de cero consumo de potencia.

Durante el ensayo también se produce una perturbación en uno de los air gaps de los EMS (se introduce una plancha para modificar la distancia), con el fin de comprobar que el sistema sea capaz de soportar perturbaciones. Siendo el resultado el siguiente.

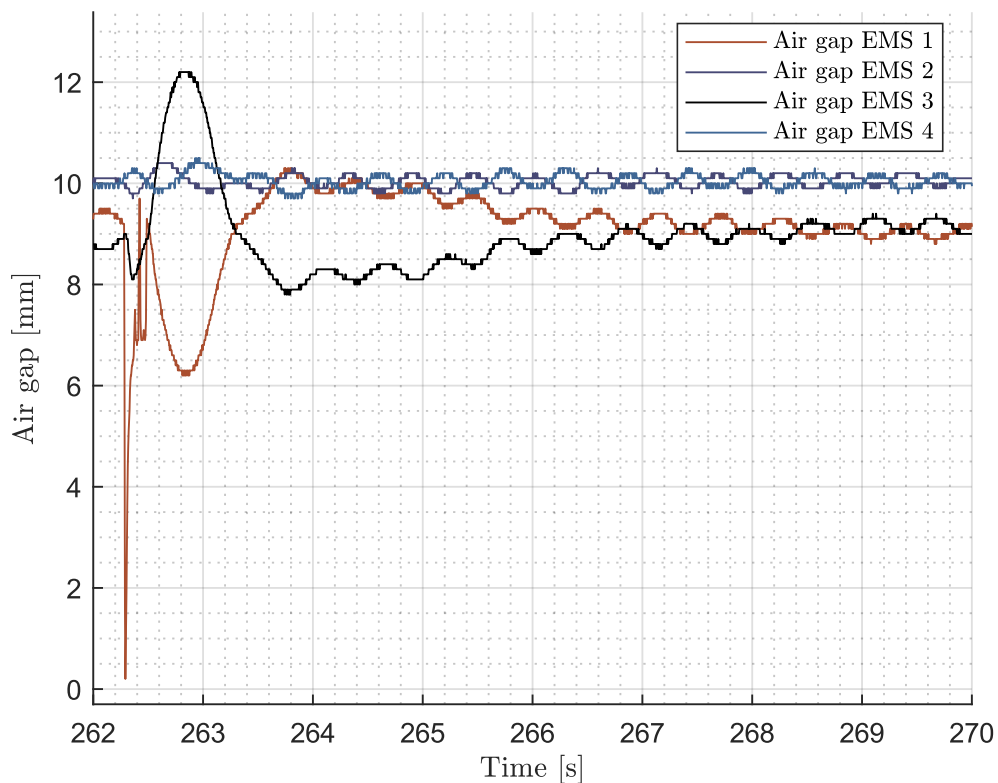


Figura 203. Air gap perturbación EMS ensayo levitación completo Auran

La inserción de la plancha provoca una súbita bajada del air gap de una de las unidades hasta casi cero (la plancha se introduce de esta forma para simular una perturbación amplia) y después se retira rápidamente. La respuesta del sistema es corregir esta desviación, pero al aparecer y desaparecer rápidamente el resultado sobre el sistema es que este se perturba haciendo que se produzca una perturbación de unos 3 mm aun así el sistema es capaz de corregir esta perturbación volviendo al entorno del punto de equilibrio en unos seis segundos. Como se ha comentado no se busca un comportamiento agresivo por parte del sistema de guiado por lo que este tiempo se considera como correcto, se puede apreciar que la respuesta del sistema es llevar al mismo a la posición de equilibrio pero que lo hace de forma muy progresiva llegando a ese punto aun con unas oscilaciones mínimas que se disipan en el tiempo.

Si observamos la respuesta de las corrientes son las que se muestran.

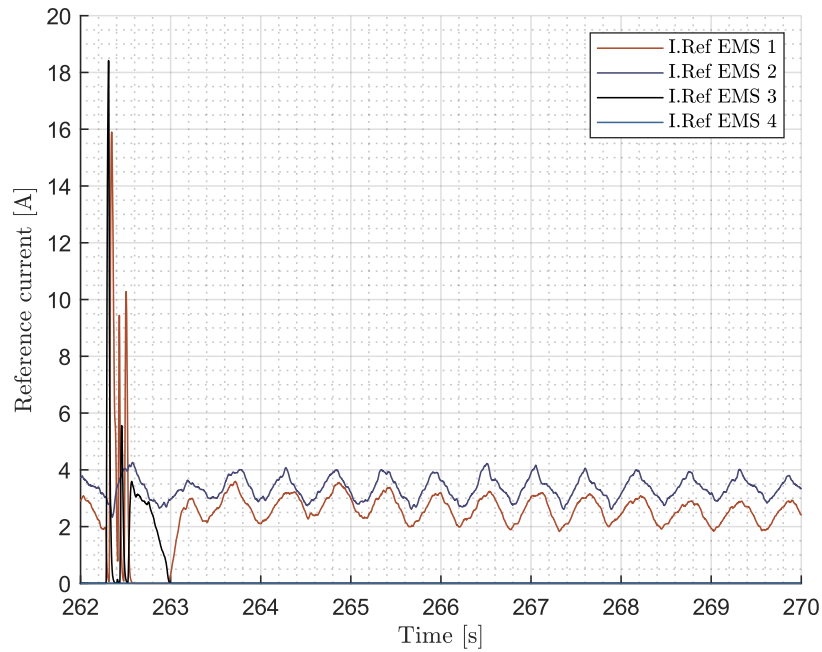


Figura 204. Corriente de referencia perturbación EMS ensayo levitación completo Auran

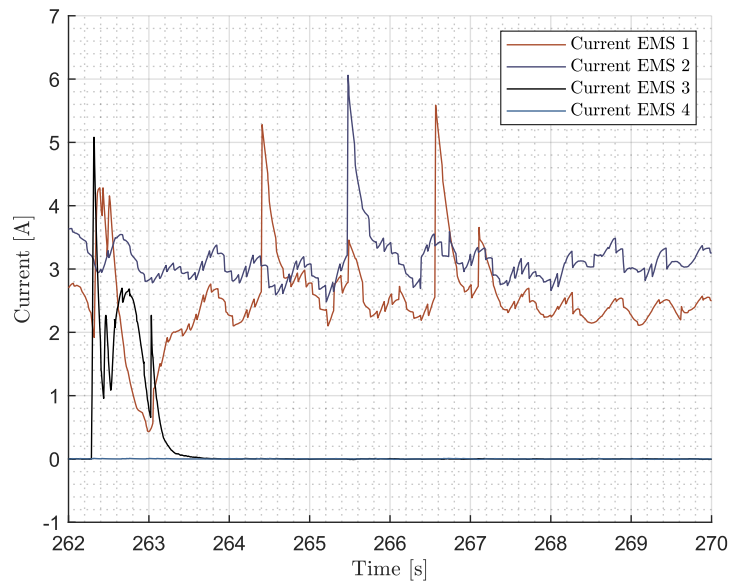


Figura 205. Corriente perturbación EMS ensayo levitación completo Auran

Primeramente podemos ver como para esta perturbación la corriente de referencia calcula una variación muy brusca de la corriente respondiendo a la necesidad de corregir una variación grande de air gap para después presentar también picos altos para realizar la corrección hasta que llega a estabilizarse, por parte de la corriente real se aprecia cómo no es posible alcanzar esa corriente tan alta en un tiempo tan pequeño por lo que los valores pico son más bajos y en ese momento el seguimiento es peor debido a la poca agresividad del control. A pesar de este comportamiento más espaciado la perturbación

se corrige de forma aceptable por lo que se concluye dado que los EMS no deberán corregir perturbaciones importantes que el sistema de guiado es lo suficientemente robusto.

En otro ensayo se realiza una prueba similar para los HEMS en los que se introduce una perturbación para comprobar la robustez del sistema.

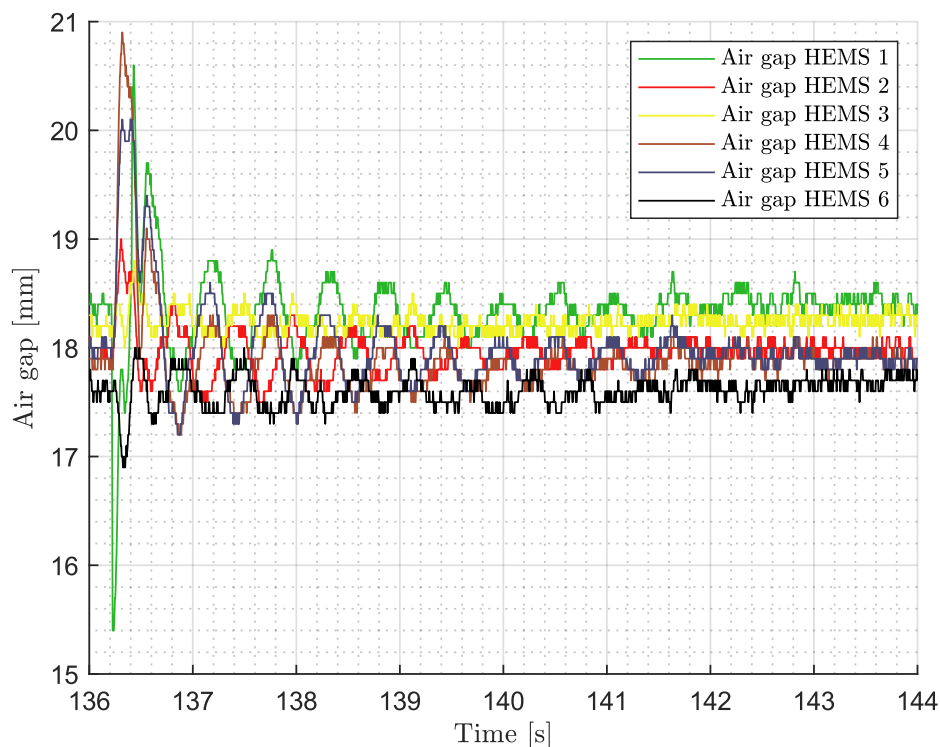


Figura 206. Air gap perturbación HEMS ensayo levitación completo Auran

Para la prueba de la perturbación se introduce y retira rápidamente una plancha afectando a la medida del sensor de air gap 1, esto provoca una respuesta de sistema que ante una perturbación que ya no existe (se retira la plancha) genera una perturbación en el sistema en general. Esta perturbación tiene una amplitud de unos tres milímetros, pero se ve como a pesar de esto es corregida rápidamente volviendo al entorno del punto de equilibrio en menos de un segundo. Una vez alcanzado se presentan unas pequeñas oscilaciones que se disipan con el tiempo, debidas principalmente a la necesidad de corregir el resto de variables también.

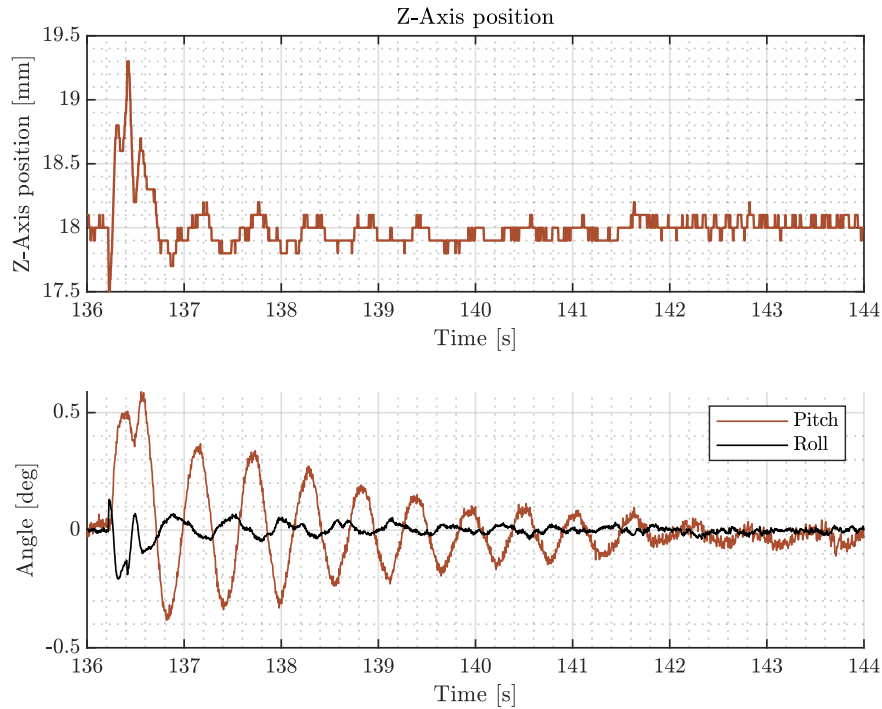


Figura 207. Variables control perturbación HEMS ensayo levitación completo Auran

Se aprecia que la perturbación afecta principalmente a la posición en Z y al cabeceo como es lógico y como este último es la variable que más se tarda en estabilizar debido a la perturbación introducida aumentando el tiempo que el sistema tarda en llegar al punto de equilibrio de forma totalmente estable de nuevo. Aun así, el comportamiento ante perturbación es bueno ya que se consigue corregir de forma satisfactoria y la mayor amplitud de la perturbación se disipa rápidamente.

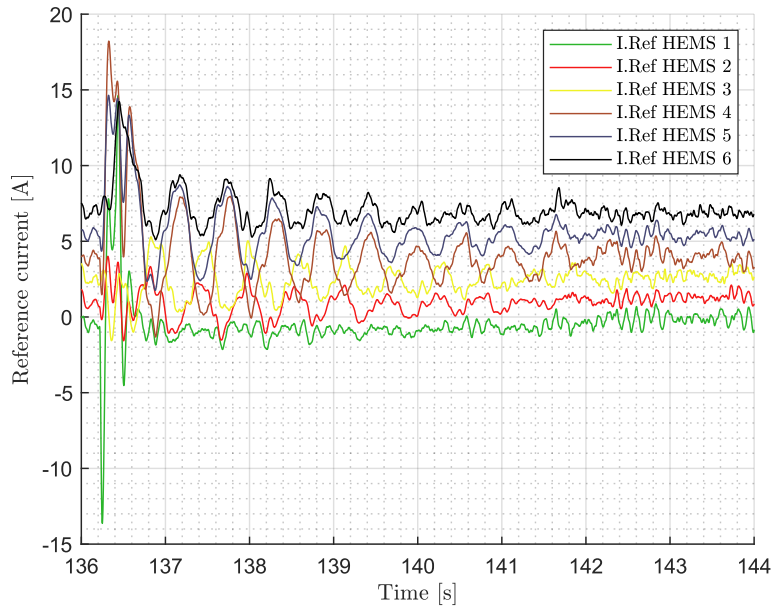


Figura 208. Corriente de referencia perturbación HEMS ensayo levitación completo Auran

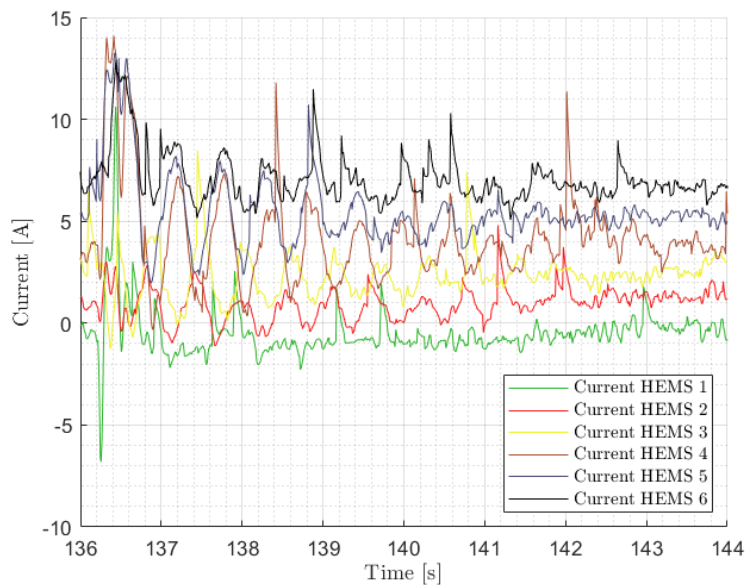


Figura 209. Corriente perturbación HEMS ensayo levitación completo Auran

Con respecto a las corrientes estas presentan el comportamiento esperado, generándose picos de corriente a fin de corregir esa perturbación reduciéndose luego la corriente demandada hasta estabilizarse. Respecto la corriente aplicada se aprecia como al requerirse un pico muy rápido la inductancia del sistema hace que no se llegue a aplicar completamente, aun así, el sistema se consigue estabilizar y alcanzar el estado estable con un consumo de corriente correcto y que es capaz de seguir la referencia la mayor parte del tiempo.

Todo esto lleva a dar por válido el control de los HEMS considerando que es robusto ante perturbaciones y que por lo tanto será capaz de soportar las introducidas por el motor.

Los ensayos presentados anteriormente tienen como objetivo el demostrar el buen funcionamiento del sistema de control. Adicionalmente se adjuntan a este documento videos demostrativos de diferentes aspectos mostrados, estos videos no se corresponden necesariamente con los ensayos mostrados ni con el funcionamiento del vehículo final que ocurrió durante la EHW debido a las necesidades del equipo y falta de tiempo. Por lo que muchos de los videos son de la etapa de testing cuando el comportamiento es ligeramente peor que el final obtenido.

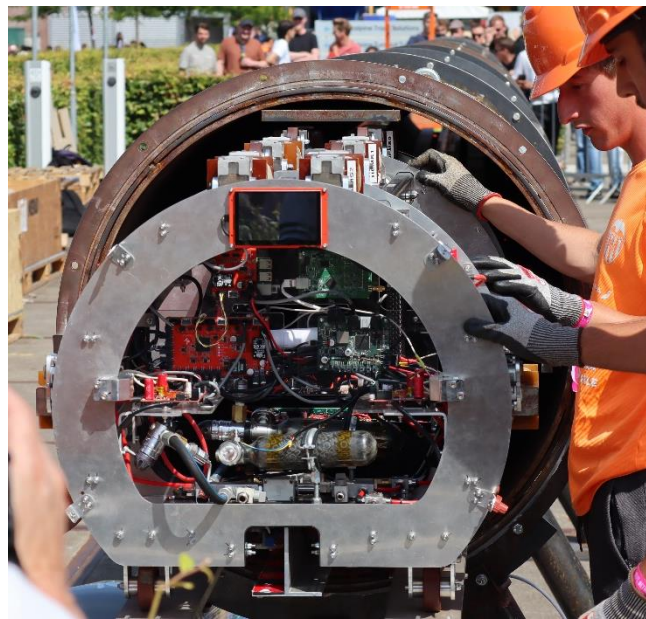


Figura 210. Auran durante demostración EHW

Durante la competición de la EHW Auran completo varias demostraciones, siendo una de las más significativas la que se realizó en las instalaciones de Hardt en su cámara de vacío.



Figura 211. Auran en la cámara de vacío de Hardt

Auran fue el único prototipo de la competición en completar esta demostración durante la cual mantuvo la levitación y guiado de forma estable durante más de 45 minutos, mientras la cámara estaba a presión normal, se hacia el vacío hasta 100 mbar y posteriormente se volvía a la presión normal. Demostrando de esta forma la estabilidad del sistema y su capacidad de los componentes de operar en condiciones de vacío.



Figura 212. Auran levitando durante el ensayo de vacío

Durante todo este ensayo la potencia fue proporcionada por una fuente de alimentación externa situada en el exterior y unos cables que se conectaron de forma que sustituyesen las baterías. La longitud de los cables requirió que se aumentase la tensión usada para compensar la caída en los mismos. Durante el ensayo esta fuente alimento todos los

elementos electrónicos del vehículo, tanto las placas de potencia como las de control y sensores de air gap.



Figura 213. Consumo fuente alimentación externa durante ensayo de vacío

En esta imagen se puede comprobar la corriente consumida por el vehículo completo durante el ensayo. Además, se demuestra que la potencia consumida por el sistema para alcanzar la levitación y guiado de forma estable además de alimentar la electrónica y sensores es de menos de 100 W certificándose así el sistema como de muy bajo consumo de potencia.

Adicionalmente a este ensayo se realizaron tanto la levitación en estático en el interior del tubo, que se corresponde con los datos mostrados en las gráficas. Como el ensayo de levitación dinámica en el interior del mismo, sin embargo, no se obtuvieron datos del mismo como ya se ha explicado y no se pudieron realizar grabaciones del mismo durante la competición. Sin embargo, se adjunta un video de la levitación dinámica en una etapa temprana de testing como muestra del funcionamiento, aunque posteriormente se mejoró ampliamente tanto la respuesta del sistema de levitación como del de propulsión.

5. CONCLUSIÓN

5.1. Objetivos alcanzados

En esta sección se hará una recapitulación de los objetivos y requerimientos que se habían planteado al inicio del proyecto y cuan ha sido su desarrollo y cumplimiento.

Los objetivos que se habían planteado se pueden resumir en los siguientes:

- Desarrollar un sistema de control capaz de gobernar el comportamiento de una unidad de levitación basada en la tecnología de HEMS.
- Desarrollar un sistema de control capaz de gobernar el comportamiento de un vehículo mediante levitación magnética basada en tecnología de HEMS y EMS.
- Lograr un control del vehículo estable y robusto capaz de levitar durante largos periodos de tiempo y resistir perturbaciones.
- Desarrollar un control capaz de permitir al vehículo despegar desde el suelo y comenzar la levitación a la distancia deseada.
- Conseguir alcanzar la levitación y guiado magnéticos con un consumo de corriente casi nulo.
- Lograr mantener la levitación y guiado magnéticos de forma estable mientras el vehículo acelera y decelera a lo largo de un tubo sin tocar ninguna superficie.
- Desarrollar e implementar todo el diseño en un periodo de 9 meses y competir en la EHW 2022.

Estos objetivos principales que se marcan como guía durante las primeras fases del proyecto y se desarrollan y van completando durante el tiempo posterior permitieron que Auran el prototipo de Hyperloop UPV pudiese competir en la EHW 2022 donde completo todas las demostraciones planteadas incluyendo la levitación dinámica convirtiendo así a este prototipo en el primero de su clase capaz levitar y guiarse mientras acelera y frena sin contacto con ninguna superficie en el interior de un tubo así como de levitar durante más de media hora en vacío.

Los principales logros alcanzados por el prototipo y relacionados con los objetivos impuestos para el sistema de control son los siguientes:

- Capacidad para realizar el despegue del vehículo completo desde el suelo de la infraestructura.

- Levitación y guiado estables con oscilaciones de menos de 0,4 mm de amplitud.
- Sistema de muy bajo consumo de potencia con un consumo de menos de 100 W.
- Alcanzado sistema de control estable y robusto que permite soportar perturbaciones y cambios de referencia con un buen comportamiento estático y dinámico.
- Levitación y guiado en vacío durante más de 45 minutos.
- Levitación, aceleración, frenado y guiado sin ningún contacto en el interior del tubo.

5.2.Premios

Adicionalmente a todos los logros conseguidos por Auran, este compitió como se ha mencionado en la EHW 2022 donde se alzó con la mayor cantidad de premios entre todos los competidores con un total de cuatro. Estos premios son los siguientes:

- Best guiding award.
- Most scalable design.
- Ingenuity award.
- Thermal management award.

Todos estos premios demuestran el desempeño e impacto generado por Auran en la competición y en el contexto global de la tecnología de hyperloop siendo de especial relevancia a nivel general el Most scalable design otorgado por Zeleros que premia la propuesta de Hyperloop UPV de no energizar la pista, lograr una levitación sin consumo de corriente, la funcionalidad del prototipo considerando el tubo, etc.

Dentro de los reconocimientos más generales también se encuentra el Ingenuity award otorgado por Swisspod que premia el concepto innovador y disruptivo presentado por factores como la tensión usada, el sistema de levitación y guiado, la levitación en vacío, etc.

Por último, como premio técnico el jurado de la EHW otorgo por unanimidad el premio de Best guiding award a Hyperloop UPV. Este premio hace referencia a sistema de levitación y guiado, desde el diseño de las unidades y el control a su funcionamiento final. Reconociéndose de esta forma el sistema de levitación presentado en este trabajo como el mejor de la mayor competición a nivel global de la tecnología de hyperloop.



Figura 214. Best guiding award



Figura 215. Equipo Hyperloop UPV junto a los premios

6. TRABAJOS FUTUROS

A pesar del buen comportamiento del vehículo obtenido, durante la fase de diseño y desarrollo se detectaron posibles mejoras a realizar que aun no impidiendo el correcto funcionamiento si pudieran mejorar aún más la eficiencia y el rango de trabajo.

Desde el punto de vista del diseño como posible mejora se podría plantear la optimización del circuito magnético desde el punto de vista de la bobina, puesto que al intentar generar flujo el imán permanente es considerado prácticamente aire haciendo que el electroimán este más lejos realmente y por lo tanto disminuyendo su eficiencia.

En la parte de diseño del vehículo como mejoras también se detecta que sería beneficioso tratar de buscar un sistema con el que obtener las velocidades sin necesidades de realizar una derivada de una señal con ruido con todo lo que eso conlleva. Por otra parte, para aumentar el control sobre el alabeo que podría ser problemático para vehículos mayores o con mayor potencia se podría incluir unidades de guiado adicionales lo más separadas posibles de forma que haya al menos una por encima y debajo del centro de gravedad de forma que se maximice el rango de control sobre esta variable.

Respecto al control, aunque esta arquitectura de control haya demostrado ser capaz de gobernar el comportamiento de forma estable y robusta, sigue estando limitado a un control lineal basado en un modelo de forma que si el modelo no se realiza correctamente o no es de calidad se presentaran muchos problemas para el control. Como alternativa a esto podría implementarse un control de lógica difusa o incluso realizar el modelo sobre la parte únicamente de las fuerzas realizándose la transformación entre fuerzas y corriente de forma externa al modelo linealizado, ambos sistemas permitirían en distinta medida incluir las no linealidades en el control lo cual mejoraría el comportamiento.

Continuando con el sistema de control se observó durante la implementación como el comportamiento, aunque era bueno podía mejorarse especialmente para los EMS que demostraron ser más problemáticos por su disposición en el vehículo que afectaba al alabeo desestabilizándose de forma que se tuvo que limitar su corriente máxima y por lo tanto su efecto que debido a los desalineamientos del tubo era especialmente importante. A este respecto se puede plantear la recolocación de las unidades usándose más de estas y repartiéndolas en los extremos superiores e inferiores del lateral de forma que se obtenga un mejor control sobre el alabeo permitiendo que se aplique más fuerza con ellas sin desestabilizar el sistema y por lo tanto que el guiado sea mejor.

Independientemente de todos estos elementos y puesto que el vehículo diseñado supone un salto innovador existen multitud de elementos que con el conocimiento adquirido durante el año y en la EHW se podrían mejorar refinando el concepto de forma que permita alcanzar un vehículo capaz de ser más estable y de resistir mayores velocidades y aceleraciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SpaceX. (2013). *Hyperloop Alpha Document*, [online] Available at: <https://www.tesla.com/hyperloop-alpha.pdf>
- [2] Zeleros. (2021). *Welcome to the future of transportation: Zeleros Hyperloop*. [online] Available at: <https://zeleros.com/>
- [3] EHW, C. (Issue March 2022). *European Hyperloop Week 2022 Rules and Regulations*
European Hyperloop Week
- [4] European Hyperloop Week. 2022. (2022). Event - European Hyperloop Week. [online] Available at: <https://hyperloopweek.com/event/>
- [5] Hyperloop UPV. (2022). *Final Demonstration Documentation*
- [6] Lei Gao, Zhe Shi, Donghui Li, Guifang Zhang, Yindong Yang, Alexander McLean and Kinnor Chattopadhyay (2015). *Applications of Electromagnetic Levitation and Development of Mathematical Models: A Review of the Last 15 Years*
- [7] B. V. Jayawant (1981) *Electromagnetic suspension and levitation*
- [8] Kijung Kim, Jongboo Han, Changhyun Kim and Jongmin Lee (2011). *Dynamic Analysis of Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Suspension*
- [9] Z. Zhang, L. She, L. Zhang, C. Shang and W. Chang (2011) *Structural optimal design of a permanent-electromagnetic suspension magnet for middle-low-speed maglev trains*
- [10] Wenqing Zhang Jie Li, Kun Zhang and Peng Cui (2013) *Design of Magnetic Flux Feedback Controller in Hybrid Suspension System*
- [11] Farhad Safaei, Amir Abolfazl, Ahmad Afshar and Mojtaba Mirsalim (2014). *Characteristics Optimization of the Maglev Train Hybrid Suspension System Using Genetic Algorithm*
- [12] Boldea, I. (2017). *Linear Electric Machines, Drives and MAGLEV's Handbook*. [online] Available at: <https://doi.org/10.1201/b13756/linear-electric-machines>
- [13] Kadir Erkan, Beytullah Okur, Takafumi Koseki and Faruk Yigit (2011). *Experimental evaluation of Zero-Power Levitation Control by Transfer Function Approach for a 4-Pole Hybrid Electromagnet*
- [14] Rong-Jong Wai and Jeng-Dao Lee (2008). *Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control for Maglev Transportation System*

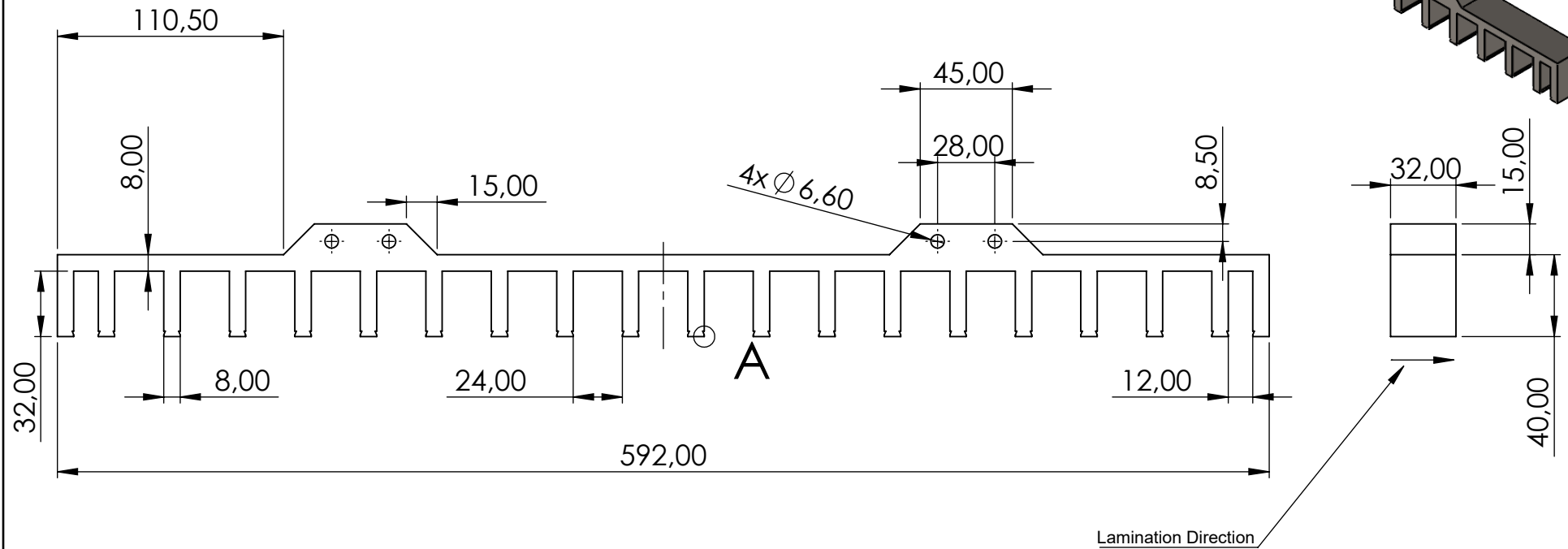
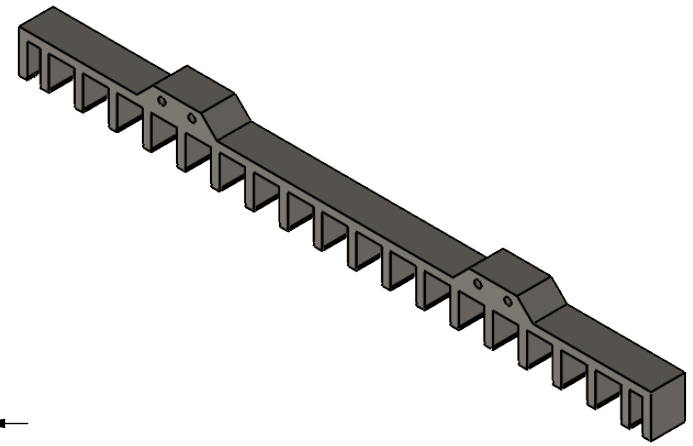
- [15] P. Šuster and A. Jadlovska (2012). *Modeling and control design of Magnetic levitation system*
- [16] Youn Hyun Kim, Kwang Min Kim and Ju. Lee (2001). *Zero Power Control with Load Observer in Controlled-PM Levitation*
- [17] Johan Jeep Norgaard and Fredrik Bentsen (2015). *Zero-Power Control of Hybrid Magnetic Levitation System*
- [18] Chang-Hyun Kim, Han-Woo Cho, Jong-Min Lee, Hyung-Suk Han, Bong-Setup Kim and Dong-Sung Kim (2010). *Zero-Power Control of magnetic Levitation Vehicles with Permanent Magnets*
- [19] Peter Kunkel. Volker Mehlman. (2006). *Differential-Algebraic Equations: Analysis and Numerical Solution*
- [20] A. El Hajjaji and M. Ouladsine (2001). *Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems*
- [21] Bruno E. Silva and Ramiro S. Barbosa (2021). *Experiments with Neural Networks in the Identification and Control of a Magnetic Levitation System Using a Low-Cost Platform*
- [22] SICK Value, O. D. (2021). *Time of Flight Datasheet, model OD2-N50W10I2. OD Value*. [online]. Available at: <https://www.sick.com/datasheet.pdf>
- [23] Sherif M Abuelening (2009). *Design and Simulation of a Hybrid Controller for a Multi-Input Multi-Output Magnetic Suspension System*
- [24] Jaeyoung Kim, Chang-Wan Ha, Galen B. King and Chang-Hyun Kim (2020). *Experimental development of levitation control for a high-accuracy magnetic levitation transport system*
- [25] Blasco Gimenez, B. (2011). *State Space Fundamentals*.
- [26] Hyperloop UPV. (2022). *Testing and Safety Documentation*

DOCUMENTO II.

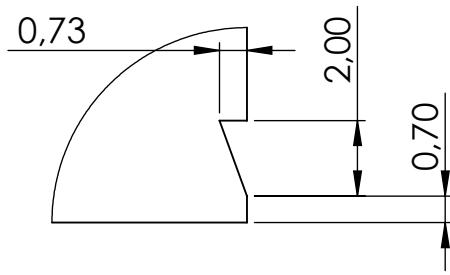
ANEXOS

ÍNDICE ANEXOS

1.	PLANO CONSTRUCTIVO DEL DLIM	239
2.	PLANO BOBINADO DEL DLIM.....	240
3.	FICHA TECNICA SENSOR AIR GAP	241



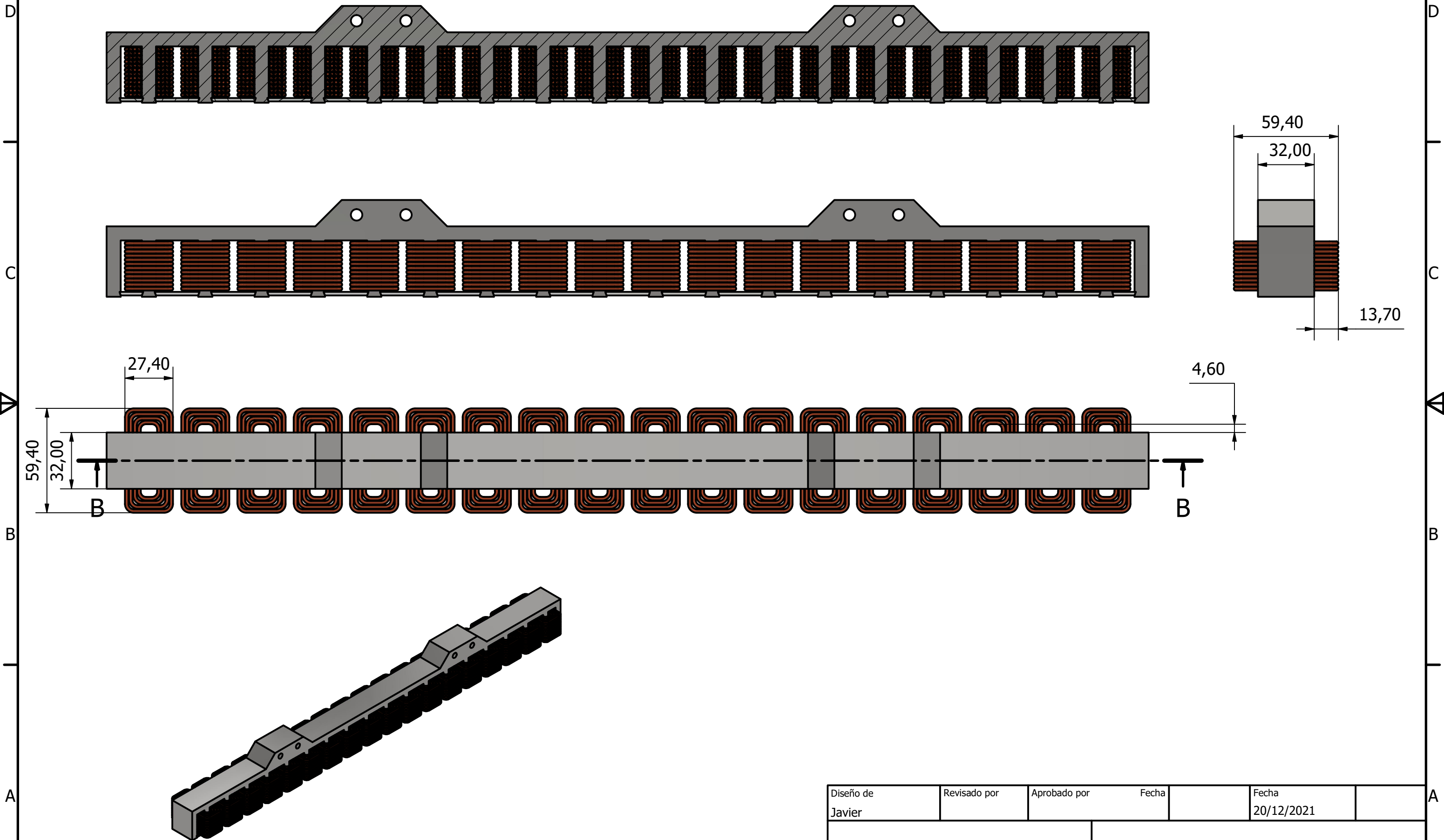
DETAIL A
SCALE 5 : 1



Observations All the dimensions are in mm Lamination 0.5 mm		Title: PR-A001-P01-M- Linear Induction Motor		Version: v1	
Scale: 1:3		Directed by: Jose Luis Lores		Quantity: 4	
Un. dim. mm		Reviewed by: Javier Luján		Date: 07/12/2021	
		Material: M400-50A, fully glued			

48 turns per coil

B-B (1 : 2)



Diseño de Javier	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 20/12/2021	
			Edición		Hoja 1 / 1
			LIM with coils		

3. FICHA TECNICA SENSOR AIR GAP



Imagen aproximada



Información sobre pedidos

Tipo	N.º de artículo
OD2-N50W10I2	6036584

Otros modelos del dispositivo y accesorios → www.sick.com/OD_Value

Datos técnicos detallados

Mecánica/Electrónica

Tensión de alimentación V_S	C.c. 12 V ... 24 V
Consumo de energía	$\leq 2,88 \text{ W}^{1)}$
Tiempo de precalentamiento	$\leq 30 \text{ min}$
Material de la carcasa	Plástico (PBT)
Material de la pantalla frontal	Plástico (PMMA)
Tipo de conexión	Cable, 2 m
Indicador	Indicación visual de las distancias mediante gráfico de barras, hasta 8 LED de estado
Peso	70 g
Dimensiones (An x Al x Pr)	20,4 mm x 60 mm x 50 mm
Grado de protección	IP67
Clase de protección	III

¹⁾ Sin carga, con intensidad de salida analógica.

Rendimiento

Margen de medida	40 mm ... 60 mm ¹⁾
Objeto de medición	Objetos naturales
Precisión de repetición	$5 \mu\text{m}^{2) 3) 4)}$
Linealidad	$\pm 20 \mu\text{m}^{2) 3) 5)}$
Tiempo de respuesta	$\geq 1 \text{ ms}$

¹⁾ 6% ... 90% de reflectancia.

²⁾ Medición con el 90% de reflectancia (cerámica, blanca).

³⁾ Con el ajuste intermedio del valor promedio.

⁴⁾ Condiciones generales constantes.

⁵⁾ En caso de asignación regular de referencias en la aplicación.

⁶⁾ Longitud de onda: 655 nm, potencia máx.: 1 mW.

Frecuencia de medición	$\leq 2 \text{ kHz}^{1)}$
Tiempo de salida	$\geq 0,5 \text{ ms}$
Fuente de luz	Láser rojo Luz roja visible
Clase de láser	2 (IEC 60825-1:2014, EN 60825-1:2014) ⁶⁾
Medida tamaño del punto de luz (distancia)	0,5 mm x 1 mm (50 mm)
Función adicional:	Ajuste de valor promedio 1 ... 64x, Adaptación automática de la sensibilidad, Salidas analógicas memorizables, Proceso analógico invertible, Salida conmutada memorizable, Proceso de conmutación invertible, Entrada multifunción: láser off/aprendizaje externo/disparo, Modo de conmutación: distancia al objeto (DtO), Modo de conmutación: ventana (Wnd)

¹⁾ 6% ... 90% de reflectancia.

²⁾ Medición con el 90% de reflectancia (cerámica, blanca).

³⁾ Con el ajuste intermedio del valor promedio.

⁴⁾ Condiciones generales constantes.

⁵⁾ En caso de asignación regular de referencias en la aplicación.

⁶⁾ Longitud de onda: 655 nm, potencia máx.: 1 mW.

Interfaz

Salida digital	
Número	2 ¹⁾
Tipo	NPN
Intensidad máxima de salida I_A	$\leq 100 \text{ mA}$
Salida analógica	
Número	1
Tipo	Salida de corriente
Corriente	4 mA ... 20 mA, $\leq 300 \Omega$
Resolución	16 bit
Entrada multifunción (MF)	1 x MF ²⁾

¹⁾ PNP: HIGH = $U_V - (< 2 \text{ V})$ / LOW = $< 2 \text{ V}$; NPN: HIGH = $< 2 \text{ V}$ / LOW = U_V .

²⁾ MF se puede utilizar como láser off, disparo, aprendizaje externo o desactivada; tiempo de respuesta $\leq 3 \text{ ms}$.

Datos de ambiente

Temperatura ambiente durante el funcionamiento	$-10 \text{ }^\circ\text{C} \dots +40 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura ambiente de almacenamiento	$-20 \text{ }^\circ\text{C} \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$
Humedad relativa del aire (sin condensación)	35 % ... 95 %
Desviación de temperatura	$\pm 0,08 \text{ \% FS/K}$ (FS = Full Scale = campo de medición del sensor)
Típ. Insensibilidad a la luz artificial	Luz extraña: $\leq 3.000 \text{ lx}$ Luz solar: $\leq 10.000 \text{ lx}$
Resistencia a oscilaciones	10 Hz ... 55 Hz (Amplitud 1,5 mm, ejes x, y, z, 2 horas en cada caso)
Resistencia contra choques	50 G (ejes x, y, z, 3 veces en cada caso)

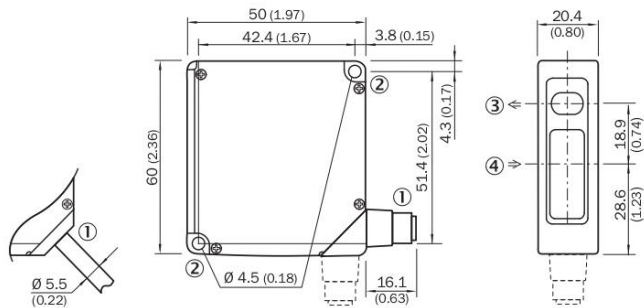
Clasificaciones

ECl@ss 5.0	27270801
ECl@ss 5.1.4	27270801
ECl@ss 6.0	27270801
ECl@ss 6.2	27270801

ECI@ss 7.0	27270801
ECI@ss 8.0	27270801
ECI@ss 8.1	27270801
ECI@ss 9.0	27270801
ECI@ss 10.0	27270801
ECI@ss 11.0	27270801
ETIM 5.0	EC001825
ETIM 6.0	EC001825
ETIM 7.0	EC001825
ETIM 8.0	EC001825
UNSPSC 16.0901	41111613

Esquema de dimensiones (Medidas en mm)

OD2-x50W10xx



- ① Cable de conexión 2 m o conector macho M12; giratorio 90°
- ② Orificio de fijación, $\varnothing 4,5$ mm
- ③ Eje óptico, emisor
- ④ Eje óptico, receptor

Tipo de conexión

OD2-xxxxxA2 OD2-xxxxxC2 OD2-xxxxxI2 OD2-xxxxxU2 cable



DOCUMENTO III. PRESUPUESTO

ÍNDICE PRESUPUESTO

1.	INTRODUCCIÓN	246
2.	CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS.....	246
3.	CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS	248
4.	CUADRO DE MEDICIONES.....	251
5.	PRESUPUESTO	251

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se detalla el presupuesto del proyecto, a pesar de que el marco principal es el desarrollo e implementación del sistema de control se incluirá también al entenderse como parte inseparable el diseño y fabricación de las unidades de levitación y guiado. No así los costes de diseño, fabricación y bobinado del motor lineal a pesar de que se haya presentado en el proyecto.

Se definirán por lo tanto tres unidades de obra diferenciadas, primeramente, el diseño y fabricación de las unidades, segundo el diseño y desarrollo del sistema de control y tercero la implementación y puesta a punto del mismo.

En el cuadro de precios descompuestos se toma un 1.25% en concepto de Costes Directos Complementarios. En el cuadro de mediciones, se toma un 2.5% en concepto de Costes Indirectos.

Por último, para el cálculo del presupuesto de inversión se han tenido en cuenta un 12% de Gastos Generales y un 6% de Beneficio Industrial.

2. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

MATERIALES			
Código	Ud.	Descripción	Importe
MAT.001	ud.	Lenovo Legion 5 16 Gb / 1 Tb / AMD Ryzen 7	1.280,00 €
MAT.002	ud.	Ordenador WS HP 64Gb / 2Tb / IntelXeon	6.524,00 €
MAT.003	ud.	Bloque acero laminado M400 50 A 27x190 (HEMS)	129,60 €
MAT.004	ud.	Bloque acero laminado M400 50 A 52x128 (EMS)	161,60 €
MAT.005	ud.	Bobina conductor cobre 3,3 mm ² 100m	400,00 €
MAT.006	ud.	Bobina aislante 60 mm ancho 25m	35,00 €
MAT.007	ud.	Resina epoxi aislante 750 gr.	4,95 €
MAT.008	h	Maquina laminación	12,00 €
MAT.009	h	Maquina bobinado	15,00 €
MAT.010	ud.	Imanes neodimio N42 40*40*20	30,00 €

MANO DE OBRA

Código	Ud.	Descripción	Precio Unitario
MO.001	h	Ingeniero técnico	17,00 €
MO.002	h	Ingeniero mecánico	17,00 €
MO.003	h	Ayudante de taller	12,00 €
MO.004	h	Técnico informático	14,00 €

SOFTWARE

Código	Ud.	Descripción	Precio Unitario
SW.001	ud.	Licencia software MATLAB & SIMULINK	2.500,00 €
SW.002	ud.	Licencia software JMAG	2.300,00 €

3. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

UO.001	Diseño y fabricación de las unidades de levitación y guiado
Proceso de estudio de diferentes alternativas y proceso de fabricación de las unidades comprendiendo la fabricación del núcleo magnético, bobinado y aislamiento.	

Código	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio	
				Unitario	Importe
1.1		Mano de Obra			
MO.001	h	Ingeniero técnico	76,00	17,00 €	1.292,00 €
MO.002	h	Ingeniero mecánico	32,00	17,00 €	544,00 €
MO.003	h	Ayudante de taller	24,00	12,00 €	288,00 €
Subtotal mano de obra:					2.124,00 €
1.2		Materiales			
MAT.001	ud.	Lenovo Legion 5 16 Gb / 1 Tb / AMD Ryzen 7	20%	1.280,00 €	256,00 €
MAT.002	ud.	Ordenador WS HP 64Gb / 2Tb / IntelXeon	35%	6.524,00 €	2.283,40 €
MAT.003	ud.	Bloque acero laminado M400 50 A 27x190	6,00	129,60 €	777,60 €
MAT.004	ud.	Bloque acero laminado M400 50 A 52x128	4,00	161,60 €	646,40 €
MAT.005	ud.	Bobina conductor cobre 3,3 mm ² 100m	1,00	400,00 €	400,00 €
MAT.006	ud.	Bobina aislante 60 mm ancho 25m	1,00	35,00 €	35,00 €
MAT.007	ud.	Resina epoxi aislante 750 gr.	1,00	4,95 €	4,95 €
MAT.008	h	Maquina laminación	11,00	12,00 €	132,00 €
MAT.009	h	Maquina bobinado	14,00	15,00 €	210,00 €
MAT.010	ud.	Imanes neodimio N42 40*40*20	12,00	30,00 €	360,00 €
Subtotal materiales:					5.114,35 €
1.3		Software			
SW.002	ud.	Licencia software JMAG	1,00	2.300,00 €	2.300,00 €
Subtotal software:					2.300,00 €

1.4	Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	1,25%	9.538,35 €
				119,30 €
Costes directos:				9.657,65 €

UO.002	Diseño del sistema de control
Proceso de estudio de diferentes alternativas y tecnologías, proceso de modelado de los diferentes sistemas y realización de simulaciones.	

Código	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1.1		Mano de Obra			
MO.001	h	Ingeniero técnico	160,00	17,00 €	2.720,00 €
Subtotal mano de obra:					2.720,00 €
1.2		Materiales			
MAT.001	ud.	Lenovo Legion 5 16 Gb / 1 Tb / AMD Ryzen 7	40%	1.280,00 €	512,00 €
MAT.002	ud.	Ordenador WS HP 64Gb / 2Tb / IntelXeon	25%	6.524,00 €	1.631,00 €
Subtotal materiales:					2.143,00 €
1.3		Software			
SW.001	ud.	Licencia software MATLAB & SIMULINK	1,00	2.500,00 €	2.500,00 €
Subtotal software:					2.500,00 €
1.4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	1,25%	7.363,00 €	92,04 €
Costes directos:					7.455,04 €

UO.003 Implementación y puesta a punto

Proceso de estudio de las características reales del sistema, testeo de los diferentes sistemas, ajustes y tuning del control.

Código	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio	
				Unitario	Importe
1.1		Mano de Obra			
MO.001	h	Ingeniero técnico	320,00	17,00 €	5.440,00 €
MO.004	h	Técnico informático	140,00	14,00 €	1.960,00 €
Subtotal mano de obra:					7.400,00 €
1.2		Materiales			
MAT.001	ud.	Lenovo Legion 5 16 Gb / 1 Tb / AMD Ryzen 7	30%	1.280,00 €	384,00 €
Subtotal materiales:					384,00 €
1.3		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	1,25%	7.784,00 €	97,30 €
Costes directos:					7.881,30 €

4. CUADRO DE MEDICIONES

Código	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
UO.001	ud.	Diseño y fabricación de las unidades de levitación y guiado	1,00	9.657,65 €	9.657,65 €
UO.002	ud.	Diseño del sistema de control	1,00	7.455,04 €	7.455,04 €
UO.002	ud.	Implementación y puesta a punto	1,00	7.881,30 €	7.881,30 €
		Costes indirectos			
%		Costes indirectos	2,50%	24.993,99 €	624,85 €
Presupuesto de Ejecución Material (PEM):					25.618,84 €
		Gastos generales			
%		Gastos generales	12,00%	25.618,84 €	3.074,26 €
		Beneficio industrial			
%		Beneficio industrial	6,00%	25.618,84 €	1.537,13 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC):					30.230,23 €
		Impuesto Valor Añadido (I.V.A)			
%		Impuesto Valor Añadido (I.V.A)	21,00%	30.230,23 €	6.348,35 €
Presupuesto de inversión:					36.578,58 €

5. PRESUPUESTO

El presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de TREINTA Y SEIS MIL QUINIENTOS SETENTA Y OCHO euros con CINCUENTA Y OCHO céntimos.

DOCUMENTO IV. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1.	PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES.....	254
1.1.	Objeto del Pliego.....	254
1.2.	Agentes involucrados	254
1.3.	Documentación del proyecto	255
2.	PLIEGO DE CONDICIONES TECNICAS	256
2.1.	Documentación del proyecto	256
2.2.	Documentos de soporte	256
2.3.	Disposiciones legales.....	257
2.4.	Seguridad.....	257
3.	PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS	258
3.1.	Promotor	258
3.2.	Contratista	258
3.3.	Proyectista	258
3.4.	Plazos y entrega del proyecto	259
3.5.	Garantías.....	259

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

1.1. Objeto del Pliego

El pliego de condiciones del presente trabajo final de master pretende recoger las condiciones que deben cumplirse durante la fase de ejecución del proyecto de diseño del control de un sistema de levitación magnética para un prototipo de Hyperloop.

Se reúnen las condiciones facultativas y técnicas a considerar para la correcta ejecución del proyecto, asignando las correspondientes responsabilidades y obligaciones de las distintas partes involucradas en el proceso de ejecución.

Este documento no pretende reunir detalles técnicos constructivos en relación a las unidades de levitación y guiado. Recae bajo la responsabilidad del Contratista que dichos detalles en la fabricación y selección de materiales estén de acuerdo con las últimas normas de diseño, reglamentos y técnicas aplicables.

Se consideran incluidas en este documento las prescripciones técnicas e indicaciones incluidas en el resto de los anteriores documentos. En caso de advertir alguna contradicción y omisión en su contenido, prevalecerá en cualquier caso la palabra del técnico responsable del proyecto sobre el asunto en cuestión.

1.2. Agentes involucrados

En lo referente a los distintos agentes involucrados en el proyecto se definen principalmente:

- *Promotor*: se declara al **equipo directivo de Hyperloop UPV** como promotor del proyecto
- *Proyectista*: La responsabilidad del diseño del sistema de control de la tecnología de levitación magnética de acuerdo a las especificaciones y requerimientos impuestos por el equipo Hyperloop UPV recaerá sobre **Eduardo Maté Orozco**, ingeniero en mecatrónica
- *Contratista*: La responsabilidad de asegurar que la ejecución y fabricación de las unidades de levitación se realice de acuerdo con el diseño realizado recaerá sobre **Javier Luján González director técnico de Hyperloop UPV** y sobre **María Cuesta Martín capitana de Hyperloop UPV**

1.3.Documentación del proyecto

El presente proyecto consta de los siguientes documentos:

- *Documento 1.* MEMORIA DESCRIPTIVA
- *Documento 2.* ANEXOS
- *Documento 3.* PRESUPUESTO
- *Documento 4.* PLIEGO DE CONDICIONES
- *Documento 5.* PLANOS

Se consideran documentos contractuales, los listados a continuación.

- *Documento 2.* ANEXOS
- *Documento 3.* PRESUPUESTO
- *Documento 4.* PLIEGO DE CONDICIONES
- *Documento 5.* PLANOS

En lo referente a los documentos contractuales, se entiende que son de obligado cumplimiento y deben incorporarse al contrato, a excepción de modificaciones previamente autorizadas. El resto de los documentos son meramente informativos y complementarios a los anteriores, no formando parte del mencionado contrato.

Por ello, el Contratista no dispone de capacidad para alegar ninguna modificación en el contrato en base a información precedente de los documentos descriptivos, a excepción de que dicha información aparezca en alguno de los documentos contractuales.

Asimismo, el Contratista se asume responsable de aquellos fallos derivados de la falta de información directa que pueda modificar o corroborar el contenido de los documentos informativos del proyecto.

2. PLIEGO DE CONDICIONES TECNICAS

2.1.Documentación del proyecto

Para la ejecución del proyecto, contratista y promotor pondrán a disposición del proyectista aquellas características y requerimientos técnicos que se deban cumplir. Dichos requerimientos responderán de acuerdo a las necesidades del proyecto, el desarrollo de la tecnología de control para levitación magnética aplicado a un prototipo de Hyperloop.

Así mismo el proyectista debe mantener actualizado al promotor acerca de los avances del proyecto, así como ofrecer un informe final, con los resultados obtenidos y los pasos seguidos detallados.

2.2.Documentos de soporte

El contenido mínimo pactado por los agentes del proyecto, debe incorporar los siguientes documentos:

- Documento 1. **MEMORIA DESCRIPTIVA**: define los objetivos, la metodología de trabajo, los objetivos técnicos del conjunto en el que se ha de integrar, el proceso de diseño y validación seguidos, así como los resultados obtenidos.
- Documento 2. **ANEXOS**: incorpora todos aquellos documentos debidamente referenciados en los otros documentos del proyecto.
- Documento 3. **PRESUPUESTO**: cuantifica el coste económico total del proyecto, desglosado en las diferentes unidades de obra.
- Documento 4. **PLIEGO DE CONDICIONES**: permite delimitar los derechos y responsabilidades de los agentes involucrados, estableciendo un marco legal para el desarrollo del proyecto.
- Documento 5. **PLANOS**: se incluyen algunos planos proporcionados por parte del promotor para justificar las especificaciones técnicas del proyecto y los que definen el diseño final de las unidades.

2.3. Disposiciones legales

Se cumplirán, en todos los sentidos, los reglamentos, requisitos locales o normativas aplicables, tanto para los equipos como para el personal implicado. Destacándose:

- Real Decreto 842/2002: Reglamento electrotécnico de baja tensión.
- Real Decreto 1066/2001: Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
- Reglamento de los Servicios de Prevención, y el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción. Real Decreto 604/2006, de 19 de mayo.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril. Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Norma UNE 157001:2002, febrero: Criterios generales para la elaboración de proyectos, AENOR.

2.4. Seguridad

La validación experimental cae bajo la responsabilidad del proyectista. Así mismo, cualquier procedimiento deberá ser supervisado por el responsable debidamente cualificado.

Durante los ensayos la seguridad recaerá sobre el proyectista, quien podrá delegar dicha responsabilidad en un ingeniero técnico debidamente cualificado. Bajo ningún concepto los ensayos podrán realizarse fuera del marco del procedimiento previamente establecido y aprobado por el proyectista, quien contara con el debido asesoramiento.

En cada ensayo, es responsabilidad del proyectista garantizar la disposición de todos los elementos de seguridad necesarios para los trabajadores y para el espacio de trabajo.

3. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS

El pliego de condiciones facultativas pretende definir y delimitar las responsabilidades y obligaciones de los distintos agentes involucrados en el desarrollo del presente proyecto.

3.1.Promotor

La figura del Promotor recae sobre el equipo directivo de Hyperloop UPV que encarga este proyecto al contratista y, por ende, al proyectista. El promotor es responsable en todo momento de la correcta definición de las especificaciones bajo las que debe diseñarse el sistema de control.

De esta manera, el promotor se asume responsable de cualquier fallo que conlleve un incremento en el coste del proyecto, o un retraso en la fecha de fin del mismo.

El promotor podrá solicitar al Contratista y Proyectista, la información que desee en relación al estado del proyecto y cumplimiento de los plazos, independientemente del estado en el que se encuentre la ejecución del mismo.

3.2.Contratista

El papel del Contratista recae sobre Javier Luján González y María Cuesta Martín. Es responsabilidad del Contratista, asegurar que la fabricación de las unidades se lleva a cabo de acuerdo con lo establecido en los documentos del proyecto.

De igual manera el Contratista se guarda el derecho de consultar el estado del proyecto e incluso detener el avance de este de acuerdo con las cláusulas que se expondrán más adelante.

3.3.Proyectista

La figura del Proyectista recae sobre Eduardo Maté Orozco. Siendo responsabilidad del mismo solventar cualquier incoherencia que se produzca en el

desarrollo del mismo tanto durante la fabricación como durante la validación. Por lo que cualquier sobrecoste asociado a una mala interpretación o aplicación de las especificaciones técnicas correctamente expuestas por el Promotor recaerá sobre esta figura.

El Projectista se guarda el derecho de realizar el diseño de acuerdo con su criterio profesional, independientemente de los intereses del Promotor o Contratista siempre que no sean parte explícita de las especificaciones técnicas del proyecto.

3.4. Plazos y entrega del proyecto

Tanto los plazos de ejecución como la fecha de inicio del diseño quedan definidos en el contrato, siendo ambas de obligado cumplimiento para el Projectista:

- Fecha de inicio del proyecto: 26/08/2021
- Fecha de fin del proyecto: 18/07/2022

El projectista se reserva el derecho de solicitar una prolongación de los plazos de entrega, siempre bajo debida justificación. No obstante, dicho retraso tendrá que ser aceptado por el Contratista, asumiendo este la responsabilidad de los nuevos plazos de cara a la justificación de los mismos ante el Promotor del proyecto.

3.5. Garantías

El diseño del sistema de control tendrá una garantía de dos años a partir de la entrega del proyecto al cliente. Siempre y cuando no se incurra en una modificación significativa de las características del sistema sin aprobación del Projectista, produciéndose en ese caso la anulación inmediata de la garantía.

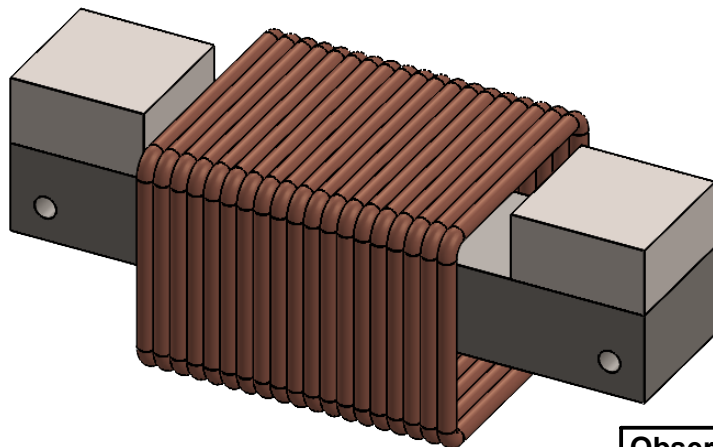
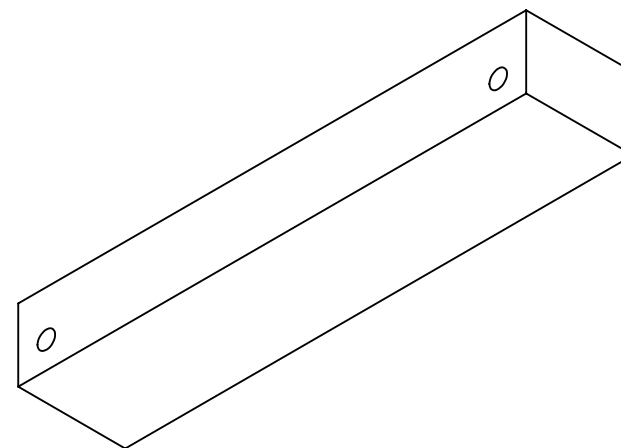
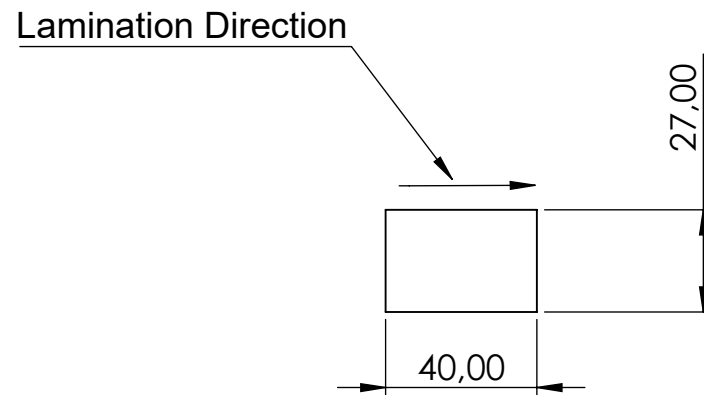
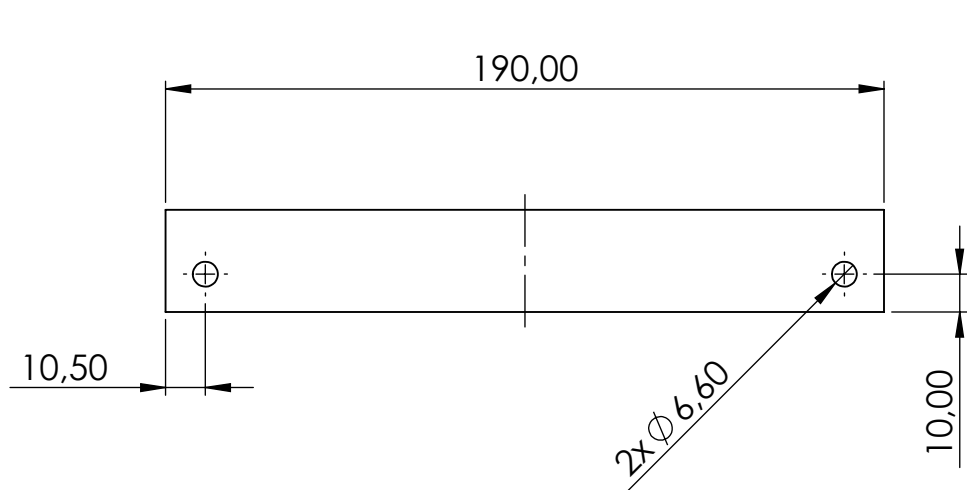
Durante este periodo, es responsabilidad de cualquier falla en el diseño recaerá sobre el Projectista que deberá realizar el rediseño. No obstante, bajo ningún caso el Projectista deberá abonar gasto alguno por este rediseño, fabricación o validación del nuevo sistema.

DOCUMENTO V.

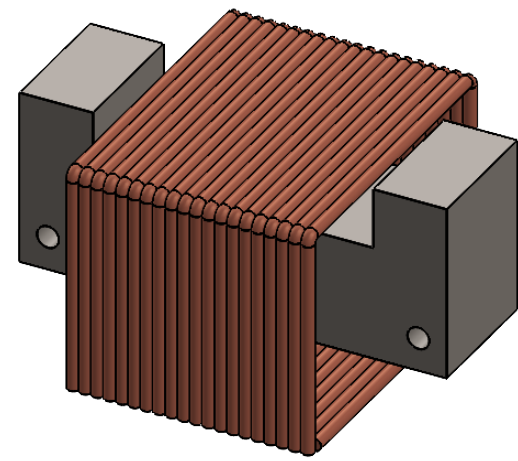
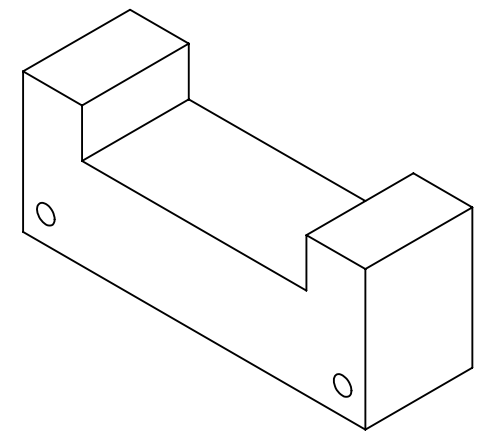
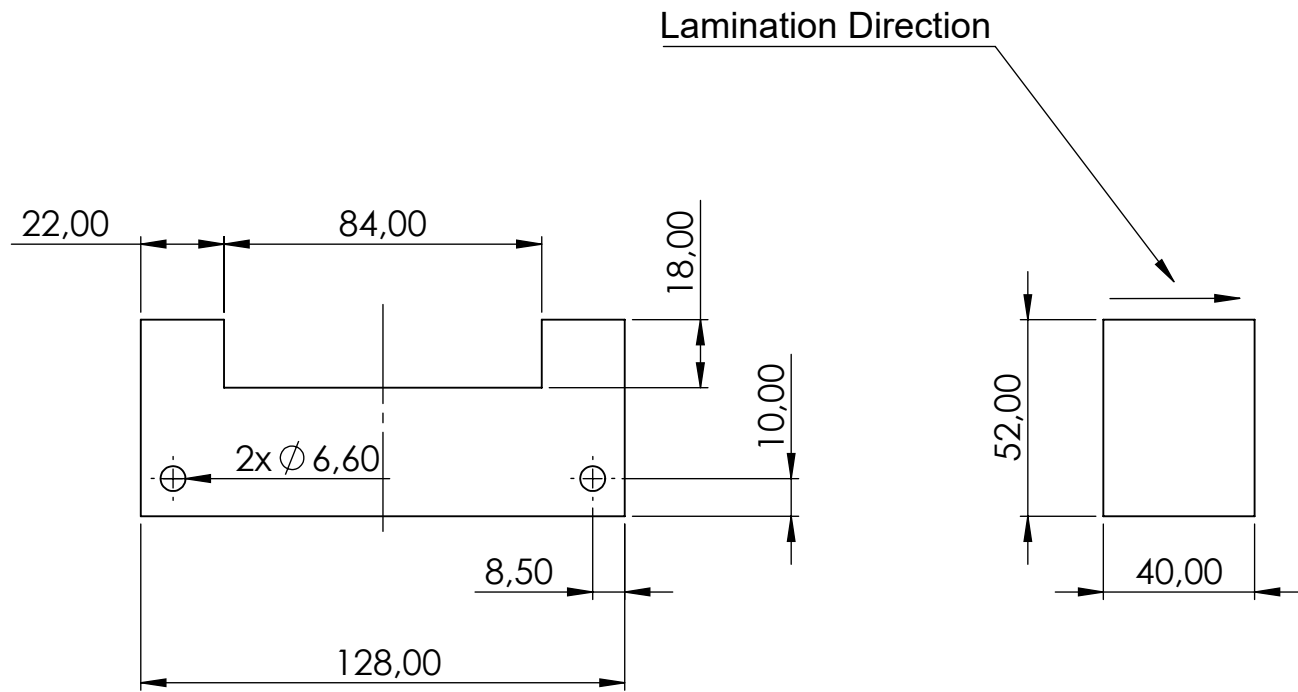
PLANOS

ÍNDICE PLANOS

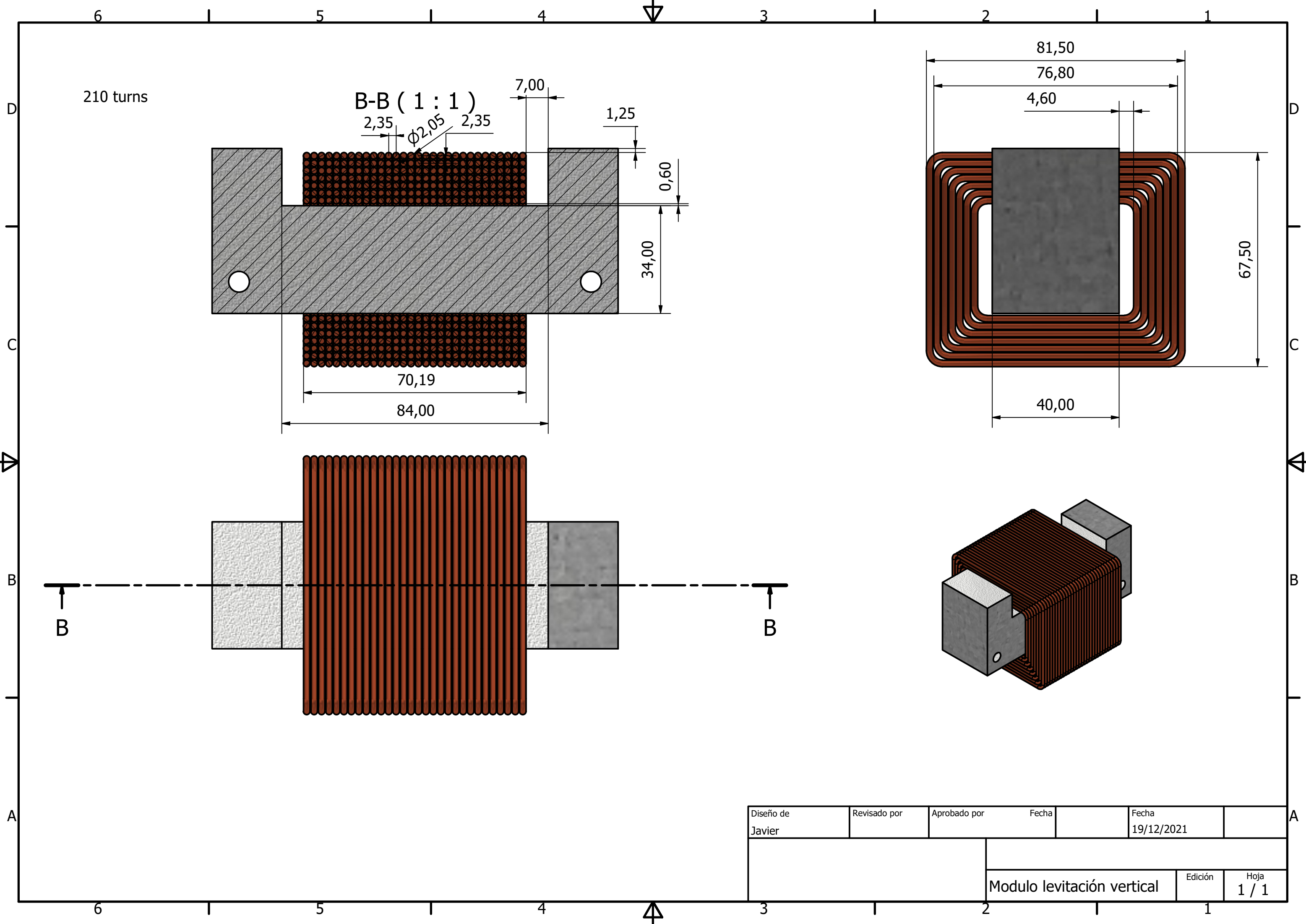
1.	PLANO 1: Plano fabricación acero unidad de levitación (HEMS)	262
2.	PLANO 2: Plano bobinado unidad de levitación (HEMS)	263
3.	PLANO 3: Plano fabricación acero unidad de guiado (EMS)	264
4.	PLANO 4: Plano bobinado unidad de guiado (EMS)	265



Observations All the dimensions are in mm Lamination 0.5 mm		Title: EM-A001-P01-M-HEMS Steel		Version: v1
Scale 1:2		Directed by: Jose Luis Lores		Quantity 9
Un. dim. mm		Reviewed by: Javier Luján		Date 29/11/2021
		Material: Laminated Steel		



Observations All the dimensions are in mm Lamination 0.5 mm		Title: EM-A003-P01-M- EMS Steel		Version v1
Scale 1:2		Directed by: Jose Luis Lores		Quantity 6
Un. dim. mm		Reviewed by: Javier Luján		Date 29/11/2021
				Material: Laminated Steel



Diseño de Javier	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 19/12/2021
			Edición	
			Hoja 1 / 1	