



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño y validación del sistema de control de un motor
doble lineal de inducción para un vehículo Hyperloop

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Sitges Nicolau, Miquel

Tutor/a: Adán Roca, Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

1.	Memoria	1
2.	Planos	54
3.	Pliego de Condiciones	58
4.	Presupuesto	62

Resumen

Hyperloop UPV es un equipo de estudiantes de la Universitat Politècnica de València (UPV) que lleva 8 años investigando y desarrollando tecnología Hyperloop. Hyperloop se define como el quinto medio de transporte, combinando las ventajas de la alta velocidad de los aviones con la eficiencia de los trenes.

Este año la propuesta de Hyperloop UPV para la European Hyperloop Week (EHW) es un vehículo y una infraestructura formada por 25 m de conducto cerrado que permiten realizar el vacío con raíles de metal. El vehículo contiene unidades EMS (Electromagnetic Suspension) y HEMS (Hybrid Electromagnetic Suspension) que permiten que levite, y junto con el motor doble lineal de inducción, siguiendo los principios de Hyperloop, se mantiene sin contacto en ningún momento con el conducto, minimizando el rozamiento.

El sistema de control deberá actuar sobre un motor doble lineal de inducción (DLIM) diseñado por Hyperloop UPV. Se ha seleccionado este tipo de motor porque, al estar constituido por dos primarios enfrentados con un desfase de 180° , las líneas de campo magnético atraviesan en mayor medida el secundario, aumentando la fuerza y la eficiencia del motor. Estos motores son asíncronos, la velocidad mecánica dependerá de la frecuencia de la onda aplicada y del deslizamiento que aparezca. Este deslizamiento en condiciones de aceleración variará entre 0 y 1 y dependerá de la carga aplicada.

Para alimentar el motor se usará un inversor trifásico con modulación de ancho de pulso del vector espacio (SVPWM) alimentado por un conjunto de baterías capaces de suministrar hasta 220 V. La corriente máxima se ha fijado en 100 A.

El objetivo del sistema de control, del tipo V/F (actúa sobre la frecuencia y la tensión de la onda aplicada), es acelerar hasta 35 km/h y frenar electromagnéticamente en menos de 18 m, estando optimizado para la máxima eficiencia de operación.

Uno de los aspectos más críticos para conseguir un control robusto es la obtención del modelo del motor. En el caso de los motores lineales, la obtención del circuito equivalente se complica porque el secundario es un raíl y las corrientes no tienen un camino fijo. Por ese motivo se obtendrá el modelo del motor mediante un barrido de simulaciones electromagnéticas empleando como parámetros la corriente aplicada, el deslizamiento (slip) del motor y la frecuencia de la onda, para obtener la fuerza y el flujo que realizará obtenidos en el motor, permitiendo caracterizarlo.

El control actuará sobre las dos variables analizadas. Para la frecuencia se calculará el slip óptimo para todas las velocidades mecánicas mediante el análisis de los datos del anterior barrido, obteniendo una ecuación lineal que relacione la velocidad actual y la frecuencia que se debe aplicar. El control de la velocidad se realizará mediante dos controladores PI (Proporcional Integral) en cascada. El bucle externo se cerrará con los valores de velocidad obtenidos integrando una IMU (Inertial Measurement Unit) y determinará la corriente de referencia; y el bucle interno con los valores de corrientes obtenidos de un sensor obtendrá la magnitud de la tensión de la onda a aplicar. Con estos dos valores se calculará

el ciclo de trabajo de cada uno de los transistores del inversor para realizar la modulación SVPWM.

Una vez diseñado el sistema de control, empezara la validación mediante la metodología de Testing In the Loop (TIL). TIL es una metodología de validación formada por 4 fases para sistemas de control que cubre desde la creación de la planta y los controladores hasta la implementación en microprocesador:

- MIL (Model In the Loop): Creación de los bloques del modelo y del control en un programa de simulación.
- SIL (Software In the Loop). Se substituyen todos los bloques que deben ser implementados en el microprocesador por código en el mismo lenguaje a ser usado en el microprocesador y se ejecuta en el mismo programa que el MIL, permitiendo depurar el código y comprobar la correcta correlación.
- PIL (Processor In the Loop): Se ejecuta el código del SIL en los microprocesadores y se conectan mediante un protocolo de comunicación con el programa de simulación.
- HIL (Hardware In the Loop). Se conectan las entradas y salidas del microprocesador a una plataforma externa que ejecuta un modelo virtual, pudiendo comprobar el correcto accionamiento de todas las señales.

Una vez validado el sistema de control en el TIL, se procederá a las pruebas.

- En laboratorio: Con una rueda de metal de 2 m de diámetro que funcionará como un rail infinito. A pesar de que se desplazará el secundario y el primario estará fijo, permite comprobar el correcto funcionamiento del motor y del control realizando cambios para adaptar la velocidad angular obtenida por el transductor (encoder) de la rueda.
- Funcionamiento en pista. Montando el motor en el vehículo e insertándolo en la infraestructura diseñada se comprobará el funcionamiento e integración con el resto de elementos y se ajustarán los parámetros del control.

Resum

Hyperloop UPV és un equip d'estudiants de la UPV que porta 8 anys investigant i desenvolupant tecnologia Hyperloop. Hyperloop es defineix com el cinquè mitjà de transport, combinant els avantatges de l'alta velocitat dels avions amb l'eficiència dels trens.

Enguany la proposta de Hyperloop UPV per la European Hyperloop Week (EHW) és un vehicle i una infraestructura formada per 25 m de conducte tancat que permeten realitzar el buit amb raïls de metall. El vehicle conté unitats EMS (Electromagnetic Suspension) y HEMS (Hybrid Electromagnetic Suspension) que permeten que levite, i juntament amb el motor doble lineal d'inducció, seguint els principis de Hyperloop, es manté sense contacte en cap moment amb el conducte, minimitzant el fregament.

El sistema de control haurà d'actuar sobre un motor doble lineal d'inducció (DLIM) dissenyat per Hyperloop UPV. S'ha seleccionat aquest tipus de motor perquè, en estar constituït per dos primaris enfrontats amb un desfasament de 180° , les línies de camp magnètic travessen en major mesura el secundari, augmentant la força i l'eficiència del motor. Aquests motors són asíncrons, la velocitat mecànica dependrà de la freqüència de l'ona aplicada i del lliscament que aparegui. Aquest lliscament, en condicions d'acceleració variarà entre 0 i 1 i dependrà de la càrrega aplicada.

Per a alimentar el motor s'usarà un inversor trifàsic amb modulació d'ample de pols del vector espai (SVPWM) alimentat per un conjunt de bateries capaços de subministrar fins 220 V. El corrent màxim s'ha fixat en 100 A.

L'objectiu del sistema de control, del tipus V/F (actua sobre la freqüència i la tensió de l'ona aplicada), és accelerar fins 35 km/h i frenar electromagnèticament en menys de 18 m, estant optimitzat per a la màxima eficiència d'operació.

Un dels aspectes més crítics per a aconseguir un control robust és l'obtenció del model del motor. En el cas dels motors lineals, l'obtenció del circuit equivalent es complica perquè el secundari és un raïl i els corrents no tenen un camí fix. Per aquest motiu, s'obindrà el model del motor mitjançant un conjunt de simulacions electromagnètiques emprant com a paràmetres el corrent aplicat, el lliscament (slip) del motor i la freqüència de l'ona, per a obtenir la força i el flux que realitzarà obtinguts en el motor, permetent caracteritzar-lo.

El control actuarà sobre les dues variables analitzades. Per a la freqüència es calcularà l'eslip òptim per a totes les velocitats mecàniques mitjançant l'anàlisi de les dades de l'anterior escombratge, obtenint una equació lineal que relacione la velocitat actual i la freqüència que s'ha d'aplicar. El control de la velocitat es realitzarà mitjançant dos controladors PI (Proporcional Integral) en cascada. El bucle extern es tancarà amb els valors de velocitat obtinguts integrant una IMU (Inertial Measurement Unit) i determinarà el corrent de referència; i el bucle intern amb els valors de corrents obtinguts d'un sensor obtindrà la magnitud de la tensió de l'ona a aplicar. Amb aquests dos valors es calcularà el cicle de treball de cadascun dels transistors de l'inversor per a realitzar la modulació SVPWM.

Una vegada dissenyat el sistema de control, començarà la validació mitjançant la metodologia de Testing In the Loop (TIL). TIL és una metodologia de validació formada per 4 fases per a sistemes de control que cobreix des de la creació de la planta i els controladors fins a la implementació en microprocessador:

- MIL (Model In the Loop): Creació dels blocs del model i del control en un programa de simulació.
- SIL (Software In the Loop). Se substitueixen tots els blocs que han de ser implementats en el microprocessador per codi en el mateix llenguatge a ser usat en el microprocessador y s'executa en el mateix programa que el MIL, permetent depurar el codi y comprovar la correcta correlació.
- PIL (Processor In the Loop): S'executa el codi del SIL en els microprocessadors i es connecten mitjançant un protocol de comunicació amb el programa de simulació.
- HIL (Hardware In the Loop). Es connecten les entrades i eixides del microprocessador a una plataforma externa que executa un model virtual, podent comprovar el correcte accionament de tots els senyals.

Una vegada validat el sistema de control en el TIL, es procedirà a les proves.

- En laboratori: Amb una roda de metall de 2 m de diàmetre que funcionarà com un raíl infinit. A pesar que es desplaçarà el secundari i el primari estarà fix, permet comprovar el correcte funcionament del motor i del control fent canvis per a adaptar la velocitat angular obtinguda pel transductor (encoder) de la roda.
- Funcionament en pista. Muntant el motor en el vehicle i inserint-lo en la infraestructura dissenyada es comprovarà el funcionament i integració amb la resta d'elements i s'ajustaran els paràmetres del control.

Abstract

Hyperloop UPV is a team of students of the UPV that has been researching and developing Hyperloop technology for 8 years. Hyperloop is defined as the fifth mean of transport, combining the advantage of the high speed of airplanes with the efficiency of trains.

This year the Hyperloop UPV propose for the European Hyperloop Week (EHW) is a vehicle and an infrastructure made up of 25 m of closed conduit that allow the vacuum to be carried out with metal rails. The vehicle contains EMS (Electromagnetic Suspension) and HEMS (Hybrid Electromagnetic Suspension) that units that allow it to levitate, and together with the double linear induction motor, following Hyperloop principles, it is kept without contact with the duct al any time, minimizing the friction.

The control system must act on a double linear induction motor (DLIM) designed by Hyperloop UPV. This type of motor has been selected because, as it consists of two facing primaries with a 180° phase shift, the magnetic field lines cross the secondary to a greater extent, increasing the strength and efficiency of the motor. These motors are asynchronous, the mechanical speed will depend on the frequency of the applied wave and the slip that appears. This slip under accelerating conditions vary between 0 and 1 and will depend on the applied load.

To power the motor a three-phase inverter with Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) will be used. Powered by a set of batteries capable of supplying up to 220 V. The maximum current has been set at 100 A.

The objective in the control system, formed by a V/F type (acts on the frequency and voltage of the applied wave), is to accelerate up to 35 km/h and brake electromagnetically in less than 18 m, being optimized for maximum operating efficiency.

One of the most critical aspects to achieve robust control is obtaining the motor model. In the case of lineal motor, obtaining the equivalent circuit is complicated because the secondary is a rail and the currents do not have a fixed path. For this reason, the model of the motor will be obtained through a sweep of electromagnetic simulations using as parameters the applied current, the slip (slip) of the motor and the frequency of the wave, to obtain the force and the flux that will be obtained in the motor, allowing to characterize it.

The control will act on the two variables analysed. For the frequency, the optimal slip will be calculated for all mechanical speeds by analyzing the data from the previous sweep, obtaining a linear equation that relates the current speed and the frequency that must be applied. The speed control will be carried out by means of two PI (Proportional Integral) controllers in cascade. The external loop will close with the speed values obtained by integrating an IMU (Inertial Measurement Unit) and it will determine the reference current; and the internal loop with the current values obtained from a sensor will obtain the magnitude of the voltage of the wave to be applied. With these two values, the duty cycle of each one of the inverter transistors will be calculated to carry out the SVPWM

modulation.

Once the control system has been designed, validation will begin using the Testing In the Loop (TIL) methodology. TIL is a validation methodology made up of 4 phases for control systems that covers from the creation of the plant and the controller to the implementation in the microprocessor:

- MIL (Model In the Loop): Creation of model and control blocks in a simulation program.
- SIL (Software In the Loop). All the blocks that must be implemented in the microprocessor are replaced by code in the same language to be used in the microprocessor and it is executed in the same program as the MIL, allowing code debugging and checking the correct correlation.
- PIL (Processor In the Loop): The SIL code is executed in the microprocessor and they are connected by means of a communication protocol with the simulation program.
- HIL (Hardware In the Loop). The inputs and outputs of the microprocessor are connected to an external platform that executes a virtual mode, being able to check the correct activation of all the signals.

Once the control system has been validated in the TIL, the tests will proceed.

- In the laboratory: With a 2 m diameter metal wheel that will function as an infinity rail. Despite the fact that the secondary will move while the primary will be fixed, it allows checking the correct operating of the motor and the control by making changes to adapt the angular speed obtained with the transducer (encoder) of the wheel.
- Operation on track: By assembling the engine in the vehicle and insert it into the designed infrastructure, the operation and integration with the rest of the elements will be checked and the control parameters will be adjusted

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Documento N°1: Memoria

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

1.1.	Objeto	1
1.2.	Antecedentes	1
1.2.1.	Hyperloop	1
1.2.2.	Hyperloop UPV	3
1.2.3.	Kénos	4
1.2.4.	DLIM	7
1.2.5.	Atlas	7
1.3.	Factores a considerar: Necesidades y Limitaciones	8
1.4.	Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada	10
1.4.1.	Control	10
1.4.2.	Validación	12
1.5.	Justificación detallada de la solución adoptada	12
1.5.1.	Organigrama del proyecto	12
1.5.2.	Control	13
1.5.2.1.	Referencia	13
1.5.2.2.	Controlador Velocidad	14
1.5.2.3.	Controlador corriente	15
1.5.2.4.	Controlador frecuencia	15
1.5.2.5.	Cálculo voltajes	16
1.5.2.6.	Sensor IMU	16
1.5.2.7.	Calculo de la velocidad	17
1.5.2.8.	Sensor de corriente	18
1.5.2.9.	Cálculo del máximo	18
1.5.3.	Modelo del motor	19
1.5.3.1.	Equivalente eléctrico	19
1.5.3.2.	Bloque calentamiento de 1 fase	20
1.5.3.3.	Equivalente mecánico	21
1.5.3.4.	Dinámica del vehículo	21
1.5.3.5.	Velocidad real	22
1.5.3.6.	Cálculo del deslizamiento	23
1.5.4.	Modulación SVPWM	23

1.5.4.1.	Alpha-Beta	24
1.5.4.2.	Vref y Theta	24
1.5.4.3.	Tiempos	24
1.5.4.4.	Switches	25
1.5.4.5.	Ciclos de trabajo	25
1.5.5.	Inversor Trifásico	26
1.5.6.	Validación	27
1.6.	Estudio Económico	29
1.7.	Conclusiones	29
1.8.	Bibliografía	30
Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados		31
Anexo B: ODS		50
Anexo C: Planificación Temporal		52

TABLA DE FIGURAS

1.	Kénos dentro de Atlas	1
2.	Esquema de Hyperloop Alpha [2]	2
3.	Linea Temporal de Hyperloop UPV	3
4.	Vista explosionada de Kénos	5
5.	Aspectos importantes de Kénos para el sistema de control	5
6.	Motor doble lineal de inducción	7
7.	Vista de la infraestructura Atlas completa	8
8.	Vista isométrica del interior de una sección del tubo	8
9.	Onda resultante de la modulación SPWM [3]	11
10.	Onda resultante de la modulación SVPWM [3]	11
11.	Organigrama del proyecto	13
12.	Esquema de bloques de control en Simulink	13
13.	Bloque de referencia	14
14.	Bloque del controlador de velocidad	14
15.	Bloque del controlador de corriente	15
16.	Bloque del controlador de frecuencia	16
17.	Bloque del cálculo de voltajes	16
18.	Bloque de la IMU	17
19.	Bloque del cálculo de la velocidad	17
20.	Bloque del sensor de corriente	18
21.	Bloque del cálculo del máximo	18
22.	Esquema de bloques del modelo del motor en Simulink	19
23.	Bloque del equivalente eléctrico	20
24.	Bloque del calentamiento de 1 fase	20
25.	Bloque del equivalente mecánico	21
26.	Resistencia de un HEMS en función de la velocidad	22
27.	Bloque de la dinámica del vehículo	22
28.	Bloque la velocidad real	23
29.	Bloque del cálculo del deslizamiento	23
30.	Esquema de bloques del SVPWM en Simulink	24
31.	Vista de la placa PPU	26

32.	Esquema del inversor trifásico en Simscape	27
33.	Vista de la placa SHUTUP	28
34.	Rueda de pruebas en laboratorio	29

TABLA DE TABLAS

1.	Distribución por subsistemas	4
2.	Tiempo de conmutación de fases y sector	25

LISTADO DE SIGLAS

- **TIL:** Testing in the loop
- **MIL:** Model in the loop
- **SIL:** Software in the loop
- **PIL:** Processor in the loop
- **HIL:** Hardware in the loop
- **EHW:** European Hyperloop Week
- **SVPWM:** Modulación por ancho de pulso del vector espacio
- **SPWM:** Modulación por ancho de pulso sinusoidal
- **PCU:** Propulsion Control Unit
- **PPU:** Propulsion Power Unit
- **SHUTUP:** Software & Hardware Universal Testing Unit Platform
- **LIM:** Motor lineal de inducción
- **DLIM:** Motor doble lineal de inducción
- **ARM:** Advanced RISC Machine
- **IMU:** Inertial Measurement Unit
- **FDD:** Final Demonstration Document
- **TSD:** Testing & Safety Document
- **TFG:** Trabajo Final de Grado
- **TCP:** Transmission Control Protocol
- **ETSII:** Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

1.1. Objeto

El objeto de este proyecto es el diseño y validación de un sistema de control para un motor doble lineal de inducción (DLIM) utilizado en un prototipo de vehículo de Hyperloop diseñado por Hyperloop UPV con el fin de participar en la European Hyperloop Week (EHW)[1]. Este proyecto incluye la obtención del modelo del motor y el diseño del sistema de control con la posterior validación mediante la metodología de testing in the loop (TIL) y con pruebas en la infraestructura diseñada por Hyperloop UPV.

El prototipo de Hyperloop UPV para le EHW, Kénos dentro de la infraestructura Atlas, se puede observar en la Figura 1.

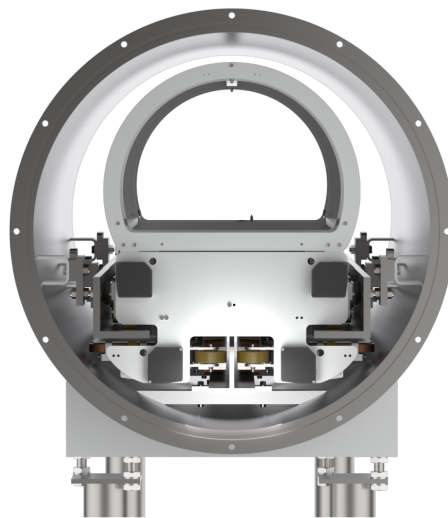


Figura 1: Kénos dentro de Atlas

El principal objetivo del sistema de control es acelerar hasta los 35 km/h y frenar de forma electromagnética el vehículo en menos de 18 m. El objetivo de Hyperloop UPV para la competición EHW 2023 es conseguir un prototipo fiable que demuestre la aplicación de esta tecnología y la posibilidad de escalarla para que sea un nuevo medio de transporte. Por este motivo se introduce la metodología de validación TIL que permite realizar análisis exhaustivos del propio sistema de control y de las placas en las que se implementara. Además, la tecnología Hyperloop se caracteriza por buscar la máxima eficiencia con el vehículo levitando y con una infraestructura formada por un tubo con cámara de vacío. Por tanto, el sistema de control deberá ser lo más eficiente posible.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Hyperloop

El primer concepto con las bases de Hyperloop lo expuso Robbert Goddard en 1909 cuando escribió el artículo The Limit of Rapid Transit. En el describía un tren capaz de recorrer la distancia entre Boston y Nueva York (350 km) en solo 12 minutos. Este tren contenía bloques que le permitiría levitar y se encontraría en un tubo con infraestructura

de vacío, reduciendo al mínimo el rozamiento. A pesar del estudio que realizó, no se llevó a cabo ningún tipo de prueba con prototipos.

En 2012, el creador de Tesla y SpaceX, Elon Musk, anunció que estaba trabajando en un nuevo concepto que definiría el quinto medio de transporte, denominándolo como Hyperloop, siendo esta la primera vez que se usó este término. En agosto de 2013 presentó un documento de 57 páginas en el que exponía su concepto Hyperloop Alpha, tanto técnicamente como socio-económicamente. En la Figura 2 se puede observar que seguía con los principios técnicos definidos por Robbert Goddard al estar compuesto por cápsulas para transportar pasajeros con una capacidad de 28 personas cada una, con un sistema de levitación por aire, motores de inducción lineal, alimentación por energía eléctrica y una infraestructura de tubo en vacío.

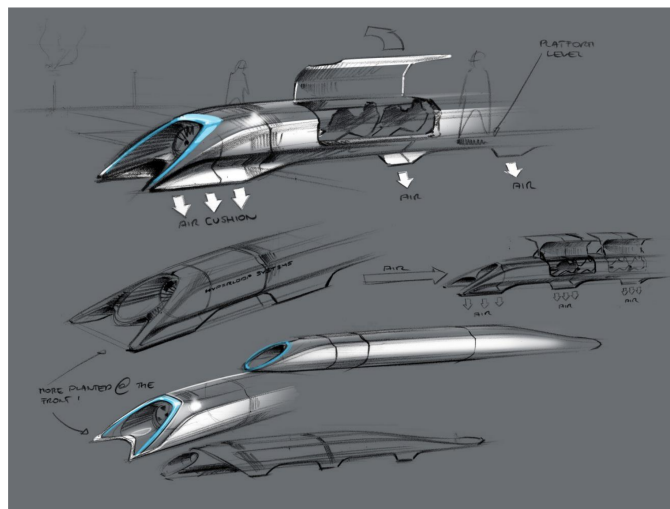


Figura 2: Esquema de Hyperloop Alpha [2]

Respecto a los aspectos social económicos, Elon Musk no patentó la tecnología Hyperloop, sino que lo registró como proyecto abierto para que se pudiera desarrollar esta tecnología libremente. también estableció unos criterios necesarios para que esta tecnología pudiera convertirse en el 5º medio de transporte, siendo los más destacables la seguridad, la alta velocidad, la sostenibilidad energética y el coste. En conjunto Hyperloop busca obtener la alta velocidad de los aviones, con la eficiencia y el coste de los trenes, además de ser ecológico por el bajo consumo.

Para desarrollar esta tecnología, SpaceX organizó en 2015 una competición para el desarrollo de prototipos y conceptos Hyperloop, llamada Hyperloop Design Weekend.

Las empresas de Elon Musk dejaron de desarrollar Hyperloop después de 2019, pero desde entonces han surgido múltiples empresas en todo el mundo con el fin de diseñar sistemas Hyperloop. Además, se creó otra competición, la EHW, en la que grupos de estudiantes de todas las universidades de Europa presentan prototipos de Hyperloop y hacen demostraciones.

1.2.2. Hyperloop UPV

Hyperloop UPV es un equipo multidisciplinar de estudiantes del programa de Generación Espontánea de la UPV. La línea temporal de Hyperloop UPV se puede observar en la Figura 3, destacando los siguientes acontecimientos.

El equipo fue formado en 2015 por 5 miembros con el objetivo de participar en la competición creada por Space X, la Hyperloop Design Weekend. En su participación consiguieron ganar dos premios de concepto, el de mejor diseño y el de subsistema de propulsión. En los posteriores años, Hyperloop UPV fue expandiéndose, creando prototipos de vehículos y compitiendo en la Hyperloop Pod Competition, llegando a quedar dentro del top 8 en 2019 y recibiendo el premio a la innovación.

A partir de 2020 se cambió el foco del equipo, centrando los esfuerzos en organizar y competir en un nuevo evento para 2021, la EHW. Para esta competición se creó Ignis, el primer vehículo de España motorizado con un DLIM. Para la EHW de 2022 se creó un nuevo prototipo, Auran, dando especial énfasis en la levitación electromagnética y la tecnología de guiado. Gracias a este prototipo Hyperloop UPV fue el equipo más galardonado de la competición con 4 premios incluyendo el de gestión térmica, prototipo mas escalable, mejor subsistema de guiado y el de mayor ingenio. Este año el objetivo es participar en la EHW de 2023, poniendo el foco en conseguir una tecnología escalable, fiable y, a la vez, lo más optimizada posible.

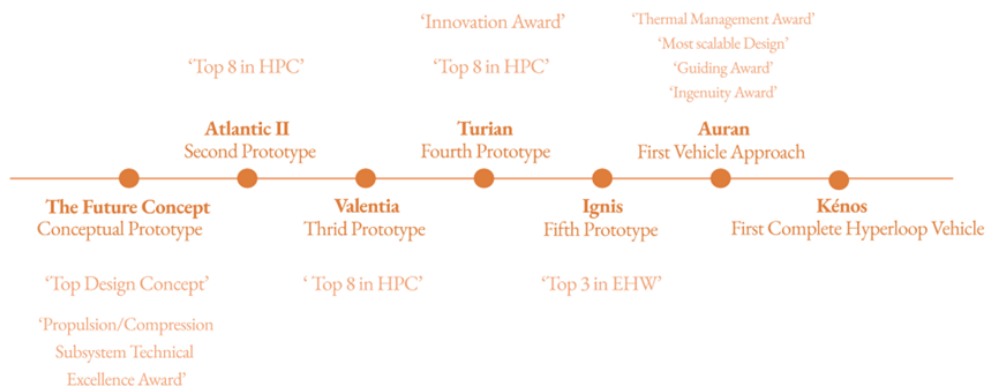


Figura 3: Línea Temporal de Hyperloop UPV

Actualmente el equipo está formado por 44 miembros divididos en 9 subsistemas, 13 colaboradores expertos en distintas áreas de la Hyperloop y 2 asesores facultativos. Todos hemos trabajado juntos para crear Kénos, nuestro primer prototipo completo de Hyperloop ya que mantiene la levitación y el motor de inducción y añade un sistema de vacío en la nueva infraestructura, Atlas. Cada subsistema tiene distintas funciones, como se puede observar en la Tabla 1. Como miembro del subsistema Electromagnetics, estoy encargado de diseñar y validar el sistema de control del motor, siendo este el objeto de este proyecto.

Tabla 1: Distribución por subsistemas

Subsistema	Funciones principales
Team Board	<ul style="list-style-type: none">• Dirección y organización del equipo
Electromagnetics	<ul style="list-style-type: none">• Diseño de los sistemas electromagnéticos del vehículo, motor y unidades de levitación.• Diseño y validación del sistema de control para los sistemas electromagnéticos.
Structures & Mechanisms	<ul style="list-style-type: none">• Diseño y montaje de todos los elementos mecánicos del vehículo, incluyendo infraestructura, frenos, carenado, chasis, vacío y guiados.
Software	<ul style="list-style-type: none">• Diseño de los sistemas de recopilación de datos y de las interfaz gráfica.
Firmware	<ul style="list-style-type: none">• Implementación del código a las placas de circuito impreso, tanto comunicación entre ellas como el control diseñado por Electromagnetics.
Hardware	<ul style="list-style-type: none">• Diseño y creación de las placas de circuito impreso de control, potencia y comunicaciones
Partners & Logistics	<ul style="list-style-type: none">• Comunicaciones con empresas para buscar patrocinios• Organización para los eventos a asistir como equipo
Economics	<ul style="list-style-type: none">• Manejo de las cuentas económicas del equipo
Outreach	<ul style="list-style-type: none">• Diseño de la imagen corporativa del equipo• Diseño del interior del prototipo

1.2.3. Kénos

El vehículo diseñado por Hyperloop UPV es Kénos. El principal objetivo de Kénos es demostrar el estado actual de la tecnología Hyperloop, pudiendo tener un prototipo completo con la mínima fricción posible gracias a las unidades de levitación, la cámara de vacío y el motor de inducción lineal.

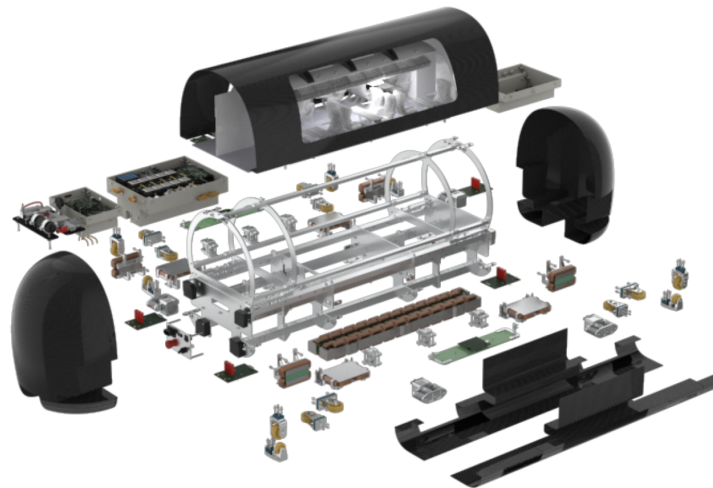


Figura 4: Vista explosionada de Kénos

Como se puede observar en la Figura 4, Kénos está compuesto por una gran variedad de sistemas distintos. Esto provoca una gran dependencia entre ellos para conseguir las altas exigencias de fiabilidad y robustez buscadas para la EHW. Por este motivo se analizarán los aspectos más importantes del propio vehículo para el diseño y validación del sistema de control, mostrados en la Figura 5.

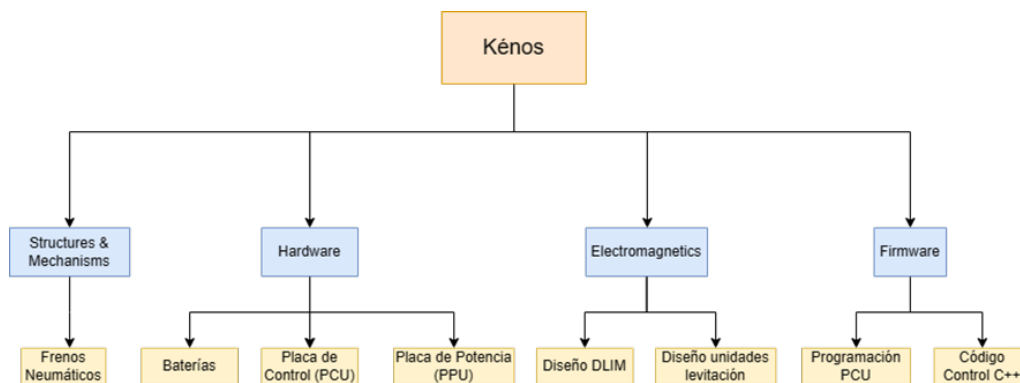


Figura 5: Aspectos importantes de Kénos para el sistema de control

■ Structures & Mechanisms:

- Frenos neumáticos: El prototipo debe poder frenar electromagnéticamente, pero para aumentar la seguridad también debe disponer de frenos externos a los sistemas electromagnéticos. Estos frenos solo deben utilizarse en caso de emergencia si Kénos entra dentro de los últimos 6 m de tubo, por este motivo el sistema de control debe plantearse sin tener en cuenta el frenado con frenos.

■ Hardware:

- **Baterías:** El motor estará alimentado por un conjunto de baterías con una tensión nominal de 220 V. Al ser un motor de inducción, la alimentación que recibe deberá ser alterna trifásica, necesitando un inversor. Debido al propio inversor y a los cables de potencia, se ha estimado que habrá una caída máxima de tensión a 200 V. Como es el peor caso posible para el sistema de control se utilizara este valor de 200 V como voltaje del bus corriente continua para el inversor que definirá la amplitud máxima de la onda sinusoidal que se podrá aplicar.
- **Placa de control (PCU):** esta placa tendrá un microprocesador STM32F4 de arquitectura Advanced RISC Machine (ARM) y será la encargada de adquirir los datos de los sensores, procesarlos, ejecutar los bucles de control y calcular las conmutaciones que se deben realizar en el inversor para aplicar la onda sinusoidal con el voltaje y la frecuencia deseada.
- **Placa de potencia (PPU):** esta placa contiene los inversores trifasicos. Hay una PPU para cada uno de los dos motores lineales de inducción (LIM) y funcionaran con las mismas conmutaciones ya que el desfase de 180° estará incluido invirtiendo las bobinas del segundo LIM. Esta compuesto por 1 controlador de puerta y 8 transistores MOSFET por cada fase del motor, con tres en paralelo.

■ Electromagnetics:

- **Diseño del DLIM:** el sistema de control deberá actuar sobre el DLIM diseñado por el subsistema de Electromagnetics. Es una pieza fundamental del control ya que es la planta sobre la que actuar, debiendo modelizar correctamente su funcionamiento. Se explicara en detalle en el apartado 1.2.4 DLIM.
- **Diseño unidades de levitación:** las unidades de levitación permiten reducir el rozamiento debido a la fricción ya que el vehículo no tiene ningún punto de contacto con la infraestructura. Pero la unidad HEMS encargada de la levitación en el eje z, al tener imanes permanentes, crea una fuerza de fricción siendo la única fuerza que se opondrá al movimiento cobrando así importancia. Una simulación de las unidades fue diseñada en función de la velocidad del vehículo para estimar la magnitud de las fuerzas y incluirlas en el modelo.

■ Firmware:

- **Programación PCU:** este subsistema realiza todas las funciones en código C++ necesarias para que la placa que pueda leer los sensores y enviar los ciclos de trabajo de los transistores a la PPU. El rendimiento de la placa una vez implementada limitara los valores máximos de frecuencia para el control.

- Código de control C++: siguiendo la metodología de TIL, todo el control se diseñará y validará en Simulink, siendo este el ámbito principal del proyecto, a continuación, Firmware escribirá el código a C++ y se validará la correcta correlación con el SIL.

1.2.4. DLIM

El DLIM está formado por dos motores lineales de inducción (LIM) enfrentados 180°. Esto implica que cada LIM se coloca uno frente al otro y al estar bobinados a la inversa se consigue que usando los mismos ciclos de trabajo en ambos se cree un campo magnético norte en uno y campo magnético sur, cerrando el flujo a través del raíl y a partir de variarlos con una onda sinusoidal creando la fuerza de empuje. La Figura 6 muestra ambos LIM formando el DLIM.

El motor es una carga trifásica en estrella diseñado por un conjunto de 8 bobinas por fase, formando así un motor de 4 polos. Cada bobina está formada por 34 vueltas de un conductor de cobre de 3.3 mm² de sección. El circuito eléctrico equivalente resulta en un sistema equilibrado trifásico en estrella con una resistencia de 0.384 Ω en serie con una bobina con una inductancia de 3.5 mH.

Los esquemas del bobinado se pueden observar en los planos 2.1 Esquema del bobinado del LIM derecho y 2.2 Esquema del bobinado del LIM izquierdo.

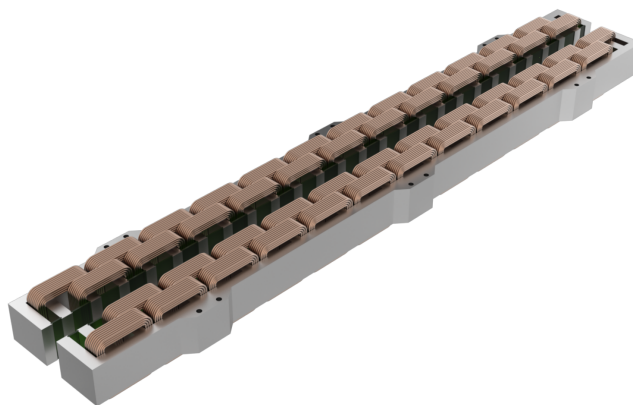


Figura 6: Motor doble lineal de inducción

Respecto al control del DLIM, a pesar de llevar dos años utilizando este tipo de motor, Hyperloop UPV no había diseñado ningún sistema de control debido a la dificultad de obtener un modelo equivalente con el que poder diseñar y ajustar el control, funcionando únicamente por introducir una onda sinusoidal de voltaje de frecuencia y amplitud fija.

1.2.5. Atlas

Atlas es el nombre puesto por Hyperloop UPV para la infraestructura creada para que Kénos levite y se desplace. La estructura se ha diseñado teniendo en consideración las

dos líneas maestras de este año, la escalabilidad y la robustez. Por este motivo, está formada por 20 secciones de tubo de 1.5 m cada uno con un diámetro exterior de 864 mm resultando en un total de 30m. En la Figura 7 se puede observar el conjunto completo de Atlas. Al principio y al final del tubo hay 6 m de tubo de seguridad, en los que si el vehículo entra se activarían los frenos mecánicos y se activaría el modo de emergencia desactivando la potencia de las baterías de alto voltaje. El control deberá trabajar con 18 m de tubo, equivalentes a los útiles para la demostración.

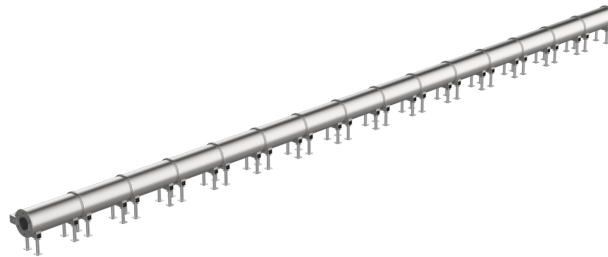


Figura 7: Vista de la infraestructura Atlas completa

La principal novedad del equipo respecto al año pasado en la infraestructura es el diseño de una cámara de vacío en todo el tubo que reducirá el rozamiento, obteniendo así un prototipo Hyperloop completo con el vacío, la levitación y la propulsión de motores lineales de inducción.

En el interior del tubo se encuentran tantos los perfiles para la levitación en la parte media del tubo como el raíl usado como secundario para el motor en el parte inferior centrado. El raíl será comercial para cumplir con el propósito de la escalabilidad. Estará hecho de aluminio con forma de T de 100x100x10 mm y 1.5 m de largo, teniendo un raíl en cada sección del tubo.



Figura 8: Vista isométrica del interior de una sección del tubo

1.3. Factores a considerar: Necesidades y Limitaciones

El sistema de control debe ser capaz de acelerar hasta los 35 km/h y frenar de forma electromagnética a Kénos en menos de 18 m cuando se encuentre en la infraestructura Atlas.

Un aspecto crítico para diseñar un sistema de control robusto es la obtención de un modelo para poder realizar simulaciones. En los motores rotativos asíncronos de inducción, como los de jaula de ardilla, este modelo se obtiene mediante el circuito equivalente formado por un conjunto de bobinas y resistencias que representan el primario y el secundario. Los valores de estos componentes se obtienen mediante las potencias calculadas en los casos de slip límite. Pero en el caso de los motores lineales, las corrientes no tienen un camino definido, por lo que la obtención de este modelo no es trivial y tendría mucho error. Por ese motivo se ha realizado un barrido de simulaciones en JMAG con la simetría del motor en el que se envuelve como entrada las siguientes variables:

- Deslizamiento: 11 casos entre 0 y 1 con incrementos de 0.1.
- Frecuencia de la sinusoidal aplicada: 16 casos entre 3 Hz y 49 Hz con incrementos de 3 Hz.
- Corriente pico de la sinusoidal: 10 A casos entre 10 y 100 A con incrementos de 10 A.

Juntando todos estos casos se ha obtenido un barrido de simulaciones formado por 1760 casos. Para todos los casos se obtuvo la fuerza que realiza el motor completo. Debido al alto coste computacional en el que derivaba el barrido y a las exigencias de temporales de Hyperloop UPV se realizaron en dos dimensiones con dos simetrías al motor, con ajustes a los valores de fuerza obtenidos. La fuerza obtenida en 3D era 1.3 veces mayor que la 2D, por lo que al resultado de la simulación se multiplica por este coeficiente.

La parte de potencia provendrá de un conjunto de baterías de 200 V que darán una tensión continua, mientras que para el motor es necesario aplicar un voltaje de corriente alterna. Por este motivo se utilizará un inversor trifásico creado con transistores MOSFET implementado en la PPU. El inversor trifásico será capaz de entregar 100 A a cada fase del motor, siendo esta la corriente límite.

Por otro lado, el control se implementará en la PCU cuyo núcleo será un STM32F4, por lo que el control deberá ser implementable en este tipo de microcontroladores. Además de ser lo más eficiente posible ya que esta placa también se ocupa de la comunicación con la placa máster de Kénos mediante Ethernet.

Para el control, es necesario conocer la velocidad de Kénos. Debido a la distancia a recorrer, no se puede utilizar un sensor GPS ya que no tendría suficiente precisión. Tampoco es viable utilizar un encoder debido a que el prototipo levita, por tanto no tiene ningún componente en contacto con Atlas. Por este motivo se utilizará una IMU para calcular la aceleración, que se integrará en el propio bucle de control para obtener la velocidad.

1.4. Planteamiento de soluciones alternativas y justificación de la solución adoptada

1.4.1. Control

El eje central del proyecto es el control. Debe ser capaz de obtener la máxima eficiencia en el sistema para conseguir la meta de acelerar hasta 35 km/h y frenar en menos de 18 m. Se han evaluado varias alternativas distintas con el fin de obtener el mejor control posible, siendo las más destacadas las siguientes:

- Control V/F: este tipo de control es comúnmente utilizado para los motores de inducción asíncronos debido a su sencillez de diseño. Se utilizan en bucle abierto y se basan en variar el voltaje y la frecuencia con un ratio fijo, manteniendo constante el flujo y la corriente. Se podría realizar una modificación a este control cerrando el bucle con una realimentación de velocidad, pero el principal inconveniente es que no se controla el deslizamiento, por lo que es poco eficiente.
- Control en cascada de corriente: este control se basa en dos controladores PI en cascada. Actúan de forma independiente sobre las dos variables del sistema, la frecuencia y el voltaje de la sinusoidal aplicada. Por un lado, la frecuencia se calculará mediante la velocidad del motor, para así definir el deslizamiento y por tanto poder obtener la máxima eficiencia del sistema. Por otro lado, el voltaje se calculará en el bucle interno mediante una corriente de referencia. Esta corriente de referencia será computada por el bucle externo que se calculará con el error de velocidad.
- Control vectorial: este control también es ampliamente utilizado para los motores de inducción rotativos. Se utiliza para controlar un inversor de frecuencia variable y así desacoplar el par motor y el flujo magnético, permitiendo controlar el motor como si fuese de corriente continua. Permiten un mayor control sobre las variables del sistema y obtener la máxima eficiencia. El principal inconveniente es la necesidad de realizar las transformaciones de Clarke y Park para transformar un sistema trifásico rotativo en un vector en un marco de referencia rotativo de a la velocidad síncrona. Para poder realizar esta transformación es necesario conocer con gran precisión el ángulo eléctrico y mecánico. En los motores rotativo se puede obtener mediante encoders y sensores hall, pero en los motores lineales no es posible obtener los ángulos con la suficiente precisión, creando comportamientos no deseados en el control y bajando la eficiencia de este.

Finalmente se escogió el control en cascada de corriente ya que de los implementables en un sistema Hyperloop es el más eficiente.

Respecto a la alimentación, por condiciones del proyecto interpuestas por el subsistema de Hardware, deberá ser alimentado mediante un conjunto de baterías capaz de generar 200 V en bornes del inversor trifásico que se encargara de alimentar el motor. Se han evaluado dos alternativas de modulación:

- Modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM): esta modulación se consigue comparando una señal sinusoidal con una señal triangular. La amplitud de las señales y su frecuencia crean unos índices de modulación que establecen la onda sinusoidal a la salida. Como se puede observar en la Figura 9, la principal limitación en este tipo de modulación es el voltaje máximo de la onda sinusoidal, el cual sin sobre modulación es solamente la mitad del bus de alimentación.



Figura 9: Onda resultante de la modulación SPWM [3]

$$V_{picoSPWM} = \frac{V_{DC}}{2} = 0.5 \cdot V_{DC} \quad (1)$$

- Modulación por ancho de pulso del vector espacio (SVPWM): esta modulación se basa en inyectar el tercer armónico a la señal sinusoidal de comparación como se puede apreciar en la Figura 10. Esto introduce también un armónico a la salida de la sinusoidal, pero en cargas trifásicas de estrella sin el neutro conectado a masa este armónico se elimina en el voltaje entre líneas ya que se compensa, permitiendo que la carga se comporte como igual que en la modulación SPWM. La principal ventaja y motivo por el cual se ha escogido este tipo de modulación es el mayor aprovechamiento del bus de continua, pudiendo alcanzar un voltaje máximo del bus de continua dividido entre raíz cuadrada de 3, siendo un 15 % superior al de la modulación SPWM como se puede observar en la Ecuación 2.

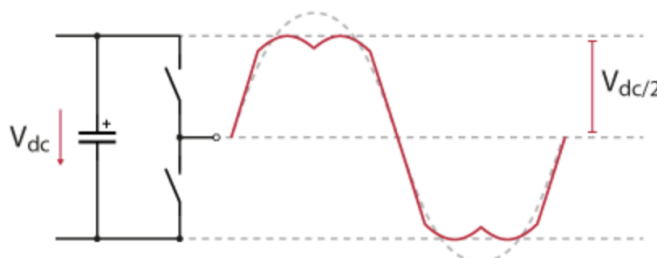


Figura 10: Onda resultante de la modulación SVPWM [3]

$$V_{picoSVPWM} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} = 0.5774 \cdot V_{DC} \quad (2)$$

1.4.2. Validación

Siguiendo los principios de escalabilidad y fiabilidad buscados por Hyperloop UPV este año, la validación del sistema de control cobra gran importancia por la naturaleza del proyecto y los plazos temporales.

En el sistema de control intervienen distintos subsistemas como se ha expuesto en el apartado 1.2.3 Kénos. Cuando se hace validación de todos los sistemas a la vez el número de fallos aumenta debido a la combinación de fallos. Esto provoca un aumento del tiempo de desarrollo ya que con pocos fallos aleatorios pueden aparecer muchos fallos del sistema completo. Por ejemplo, si existen 3 errores críticos aleatorios en el sistema por el código de las placas, 4 por el diseño del Hardware y 2 por el sistema de control acaban ocurriendo $4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$. Estos 24 errores aleatorios dificultan la detección y corrección de los fallos, aumentando el tiempo necesario para validar correctamente todos los sistemas, un aspecto crítico para Hyperloop UPV.

Por este motivo es importante gestionar correctamente la validación. Tradicionalmente el sistema de control se diseña sobre un programa de simulación, a continuación, se implementa el código a partir del modelo y finalmente se prueba todos los sistemas a la vez. Esta solución no es válida ya que no cumple los criterios de fiabilidad y escalabilidad buscados.

Se adoptará la metodología de TIL, que permitirá encontrar los fallos existentes en el sistema antes de realizar pruebas en pista, reduciendo así el tiempo de desarrollo, aspecto crítico para poder presentar el prototipo en la competición.

1.5. Justificación detallada de la solución adoptada

A continuación, se describe la solución adoptada para el diseño y la validación del sistema de control para un DLIM para un vehículo Hyperloop.

1.5.1. Organigrama del proyecto

El organigrama de este proyecto se puede observar en la Figura 11 y esta formado por las dos ramas principales de este proyecto, el sistema de control y la validación del mismo.

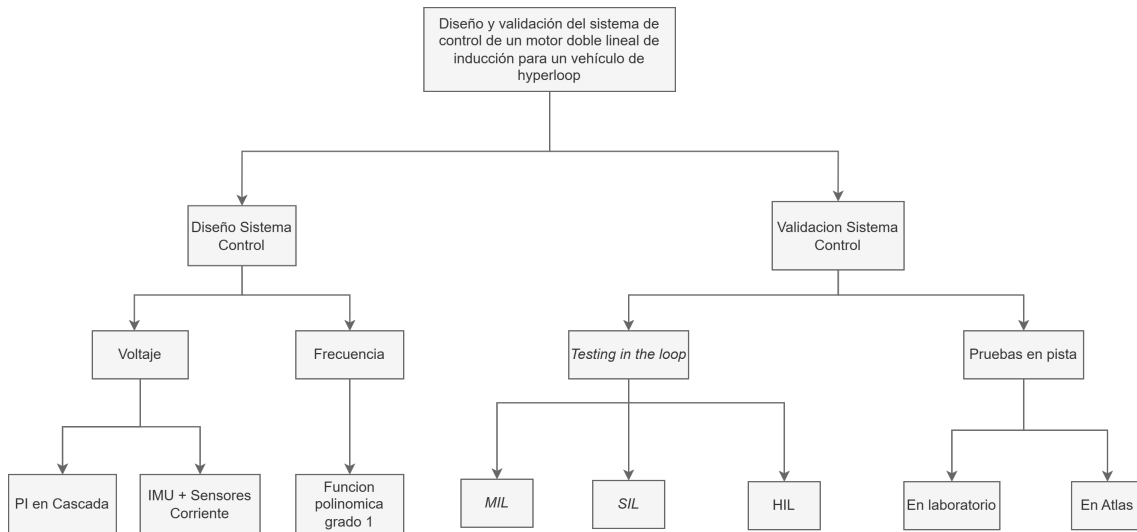


Figura 11: Organigrama del proyecto

1.5.2. Control

El sistema de control se puede apreciar en la Figura 12. Está diseñado en Simulink y formado por un controlador para la frecuencia, un control en cascada para la corriente y velocidad, los sensores de corriente y de aceleración y la referencia de velocidad.

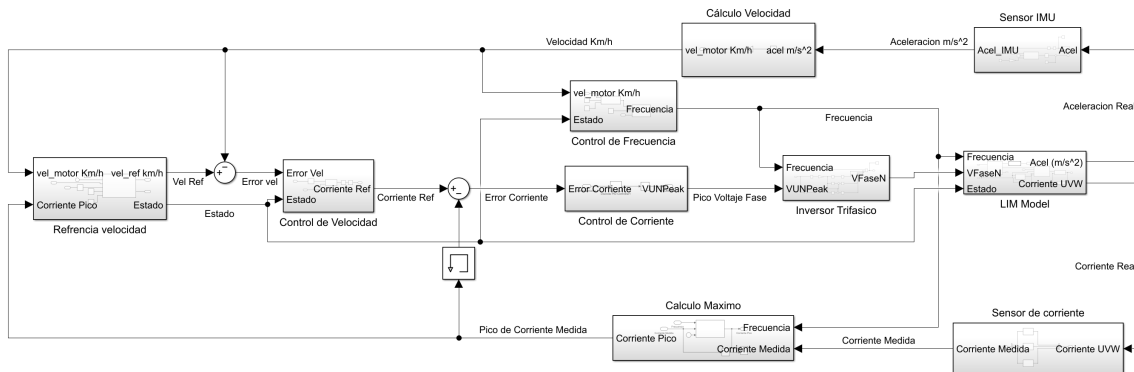


Figura 12: Esquema de bloques de control en Simulink

1.5.2.1 Referencia

La Figura 13 muestra el bloque de la referencia de velocidad. Este bloque del sistema de control establece la velocidad de referencia y el estado general del sistema según el tiempo transcurrido y la posición del vehículo.

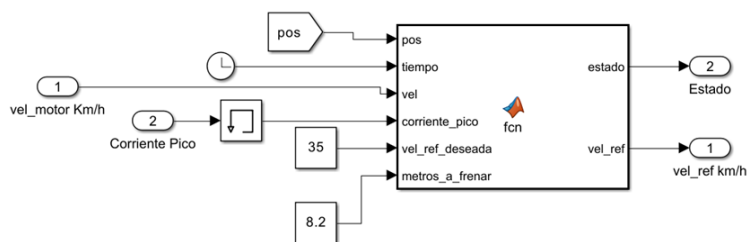


Figura 13: Bloque de referencia

Para adaptarlo a la demostración que desea realizar Hyperloop UPV, habrán 4 estados que influirán en el resto de los bloques del control:

- Estado 0: es el estado inicial y en reposo. La velocidad de referencia es 0 km/h y esta a la espera de la orden de arrancar. Para modelarlo en Simulink, a partir del segundo 1 le llega la orden de arrancar, transitando al estado 1.
- Estado 1: este estado es el de aceleración, estableciendo la velocidad de referencia a la velocidad deseada (35 km/h) y activando los controladores. Se mantiene en este estado siempre que la posición sea menor que la posición introducida como metros a frenar (8.2 m). Cuando es superior se transita al estado 2.
- Estado 2: en este estado se establece una corriente de referencia de 0 A en el controlador de corriente para bajar la corriente que atraviesa el DLIM y poder intercambiar la fase V-W para conseguir una frecuencia negativa y por tanto empezar a frenar. Este estado se mantiene mientras que la corriente pico sea superior a 10 A.
- Estado 3: Una vez que la corriente pico es inferior a 10 A, se intercambian la fase V con la W para poder frenar, se establece una velocidad de referencia de 0 km/h y se activan los controladores. Una vez que el vehículo está completamente detenido se vuelve al estado 0.

1.5.2.2 Controlador Velocidad

El bloque que forma el controlador del bucle externo es el controlador de velocidad. Se puede apreciar en la Figura 14 el PI discreto, la saturación y la función de análisis de estado que lo forman.

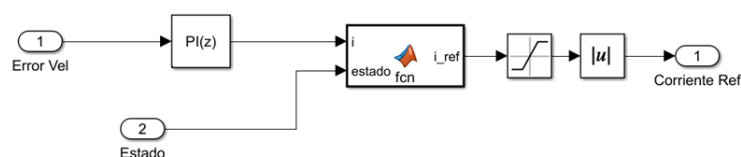


Figura 14: Bloque del controlador de velocidad

El PI discreto se ejecuta a una frecuencia de 1kHz y calcula la corriente de referencia en función del error de velocidad. A la salida del PI hay una función que analiza en que estado está el sistema, y si esta en el estado 0 (reposo) o estado 2 (espera para intercambio fase) la corriente de referencia será 0 A. En el resto de los estados la corriente será la obtenida por el bloque del PI y analizara si el signo coincide con la deseada, estado 1 corriente positiva, estado 2 corriente negativa ya que la frecuencia es lo que define si acelera o frena. En caso de que no coincida la corriente de referencia también será 0 A.

Finalmente, a la salida hay una saturación entre -100 A y 100 A debido a las limitaciones interpuestas por el subsistema de Hardware que establecen la corriente máxima y un bloque de valor absoluto, ya que la corriente de referencia será positiva y el sentido de la aceleración lo definirá el signo de la frecuencia.

1.5.2.3 Controlador corriente

El bucle interno del controlador en cascada esta formado por el controlador de corriente, correspondiente a la Figura 15.



Figura 15: Bloque del controlador de corriente

Este bloque está compuesto por un PI discreto a 5 kHz ya que al ser el bucle interno del controlador en cascada debe ser más rápido que el controlador de velocidad que forma el bucle externo [4]. La saturación de esta acción de control se encuentra comprendida entre 0 V y 117 V porque solo tiene corrientes de referencia positivas. La saturación de 0 V corresponde a que no habrá una acción de control negativa, mientras que la saturación máxima corresponde al limite que impone el inversor trifásico en modulación SVPWM, el cual solo puede entregar una onda sinusoidal con un pico cuyo valor máximo es igual del valor de baterías dividido entre raíz de tres como se observa en la Ecuación 2.

1.5.2.4 Controlador frecuencia

La Figura 16 muestra el controlador de frecuencia formado por dos bloques de función. En el bloque se calcula la frecuencia de la onda sinusoidal a aplicar según la velocidad mecánica del vehículo. Como se demuestra en el apartado 1 Cálculos del Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados, la máxima eficiencia en aceleración se consigue mediante una función en forma de recta, mientras que en frenado la máxima eficiencia se consigue a una frecuencia fija de -3 Hz, la cual se consigue invirtiendo la fase V con la W.

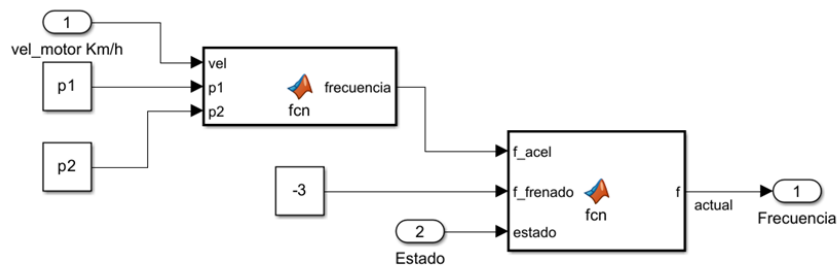


Figura 16: Bloque del controlador de frecuencia

1.5.2.5 Cálculo voltajes

Este bloque se encarga de calcular las ondas de voltaje de cada una de las fases del LIM a partir del voltaje de referencia y de la frecuencia, desfasándolas 120° para aplicar la voltaje a la carga trifásica de manera correcta. También se encarga de invertir la fase V con la W si la frecuencia es negativa, implicando que frenaría el motor. Se puede apreciar en detalle su funcionamiento en la Figura 17.

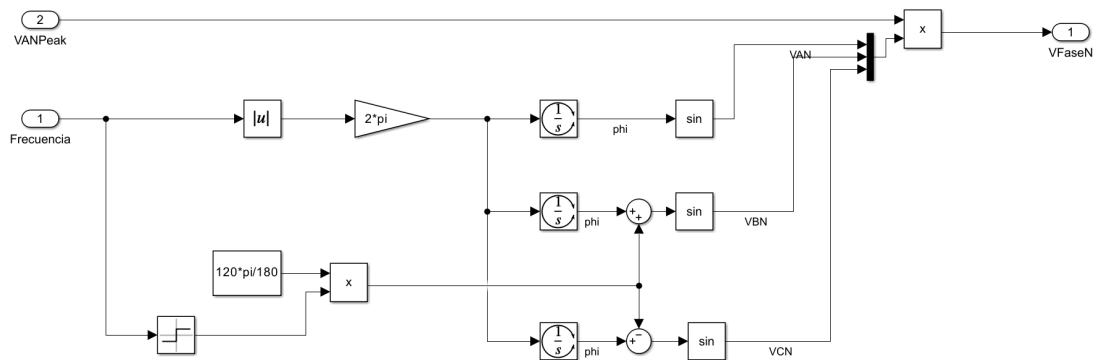


Figura 17: Bloque del cálculo de voltajes

1.5.2.6 Sensor IMU

La IMU utilizada en Kénos es la IIM-42652 de TDK [5]. Esta IMU proporciona los valores de aceleración mediante SPI ya filtrados, por lo que no es necesario utilizar ningún tipo de filtro. Se ha configurado la IMU para tener un fondo de escala de ± 4 g con 16 bits. Los bloques que la conforman se pueden observar en la Figura 18.

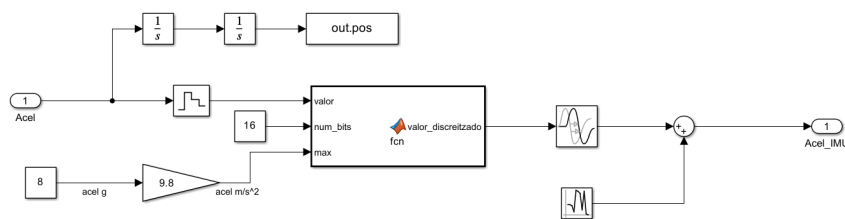


Figura 18: Bloque de la IMU

Se ha modelado el comportamiento de la dinámica de la señal discretizando en amplitud los 8 g con los 16 bits, en temporal de 1 kHz y añadiendo un retardo 1 ms y ruido blanco obtenido en el apartado 3.1.2 Sensor IMU del Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados.

Además, se calcula la posición haciendo una doble integral a la aceleración. En las demostraciones reales, el raíl de Atlas tiene unas cintas de color rojo cada 5 cm que permitirán obtener la posición con gran exactitud a partir de dos sensores de reflectividad.

1.5.2.7 Cálculo de la velocidad

La Figura 19 muestra los procesos realizados para obtener la velocidad a partir de la aceleración. Uno de los mayores problemas al utilizar una IMU para el cálculo de velocidad es la deriva que presentan, la cual se acumula al integrar para calcular la velocidad. Por este motivo se ha diseñado un algoritmo en el cual, si la aceleración es menor que una aceleración umbral, se establece que el vehículo está en estacionario y la aceleración que se observa es la deriva, por lo que se calcula la media de los valores. Si la aceleración es mayor que la umbral, se utiliza la media calculada para compensar tanto el valor de aceleración para integrar como la umbral.

Mediante pruebas se ha obtenido que el mejor valor de aceleración umbral es 0.1 m/s^2 , siendo mucho menor que la aceleración que experimentara Kénos en las demostraciones, pudiendo así utilizarlo sin perder información.

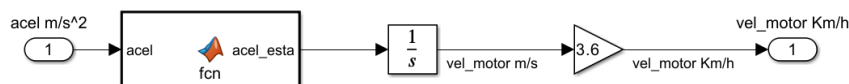


Figura 19: Bloque del cálculo de la velocidad

Una vez obtenida la aceleración real, se realiza una integral discreta a un 1 kHz y se convierte a unidades de km/h multiplicando el valor obtenido por el factor de 3.6.

1.5.2.8 Sensor de corriente

Se ha modelado en Simulink el sensor de corriente L01Z300S05 [6], utilizado en cada una de las fases del LIM. Se ha hallado su función de transferencia para obtener el voltaje que ofrecerá el sensor en función de la corriente que lo atraviese. Además, se ha modelado con el ruido obtenido en la prueba explicada en el apartado 3.1.1 Sensor de corriente del Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados y se ha discretizado tanto temporalmente como en amplitud la señal en voltaje. El conjunto de todos estos bloques se muestra en la Figura 20.

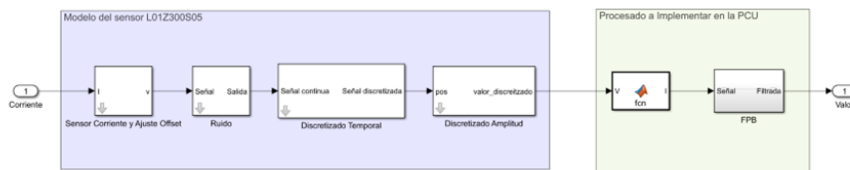


Figura 20: Bloque del sensor de corriente

1.5.2.9 Cálculo del máximo

Este último bloque del sistema de control representado por la Figura 21 se encarga de calcular cual es la amplitud máxima de la onda de corriente que atraviesa el LIM para poder realimentar al controlador de corriente. Al ser un sistema trifásico equilibrado las tres corrientes deben ser iguales en amplitud y solo estar desfasadas en el tiempo. Por ese motivo se analiza el valor de las tres fases del LIM. Además, como se ha comentado en el apartado 1.5.2.2 Controlador Velocidad, solo se trabajara con corrientes de referencia positivas, por lo que se usaran los valores absolutos de todas las corrientes, duplicando la frecuencia en la que se encuentran los máximos.

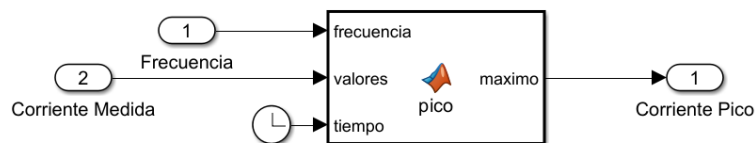


Figura 21: Bloque del cálculo del máximo

La función pico analiza si alguno de los valores absolutos es mayor que el último máximo. Si lo es, lo establece como nuevo máximo, sino analiza si puede ser un máximo intermedio. Si al pasar un período completo no hay ningún máximo nuevo, se establece como nuevo máximo el máximo intermedio. Así se consigue mayor suavidad al calcular máximos que se decrementan, además de reducir el retardo al analizar el valor absoluto de las tres fases

1.5.3. Modelo del motor

Uno de los aspectos más críticos para diseñar un control robusto y el motivo por el Hyperloop UPV no había realizado un sistema de control los 2 años anteriores es el modelo del motor. El modelo se puede observar en la Figura 22 y está formado por 6 bloques que permiten obtener todas las variables necesarias para analizar correctamente el funcionamiento del control del modelo real.

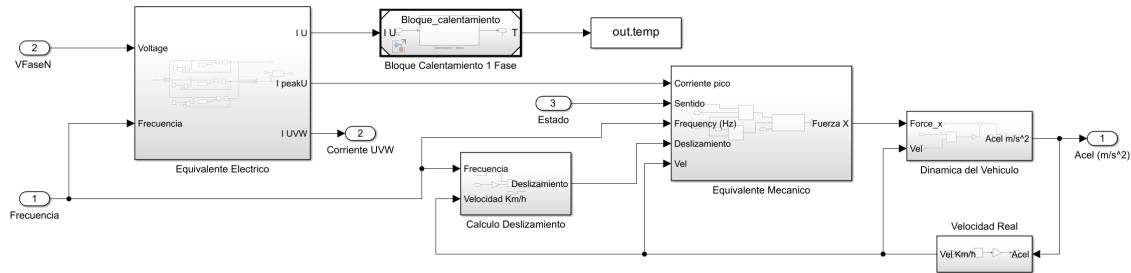


Figura 22: Esquema de bloques del modelo del motor en Simulink

1.5.3.1 Equivalente eléctrico

El control se encarga de calcular el voltaje y las frecuencias de cada una de las tres fases del LIM. Una vez obtenido el voltaje hay que convertirlo a corriente ya que es la que define la magnitud del flujo magnético y por tanto la fuerza que realiza el motor. La Figura 23 muestra los pasos seguidos para obtener la corriente.

Primero se debe restar la caída de voltaje por la propia resistencia de cada fase, siendo de 0.384Ω , calculada como la corriente que atraviesa por el valor de resistencia.

$$V_R = I_R * R \quad (3)$$

Obtenido ya el voltaje de la parte resistiva de la fase, para calcular la corriente que atraviesa cada fase se debe dividir el voltaje que cae en la bobina entre la inductancia y realizar una integral.

$$I = \frac{1}{L} * \int V - V_R dt \quad (4)$$

Por último, se utiliza el bloque del cálculo del pico explicado en 1.5.2.9 Cálculo del máximo para obtener el máximo de la onda corriente necesario para el bloque del apartado 1.5.3.3 Equivalente mecánico .

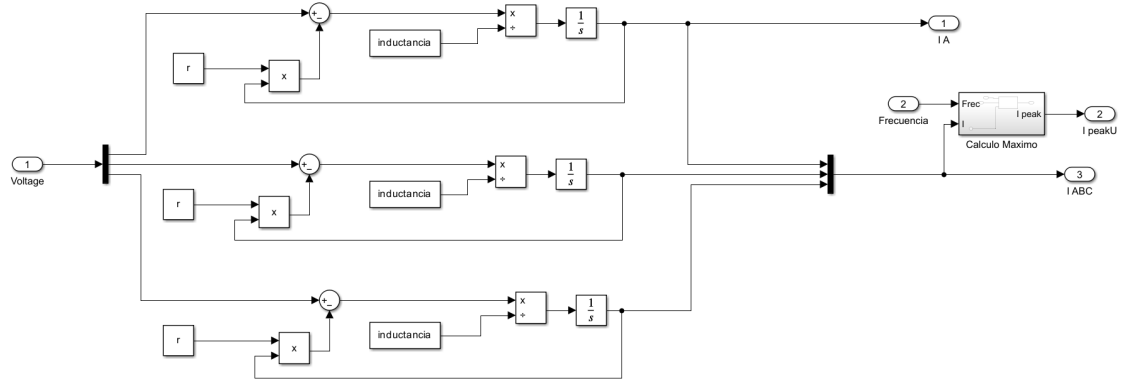


Figura 23: Bloque del equivalente eléctrico

1.5.3.2 Bloque calentamiento de 1 fase

A pesar de no ser un valor utilizado directamente para el control, es importante conocer el incremento de temperatura que sufrirán las bobinas del motor al atravesar corriente ya que pueden soportar una temperatura máxima de 150°C. El bloque se muestra en la Figura 24.

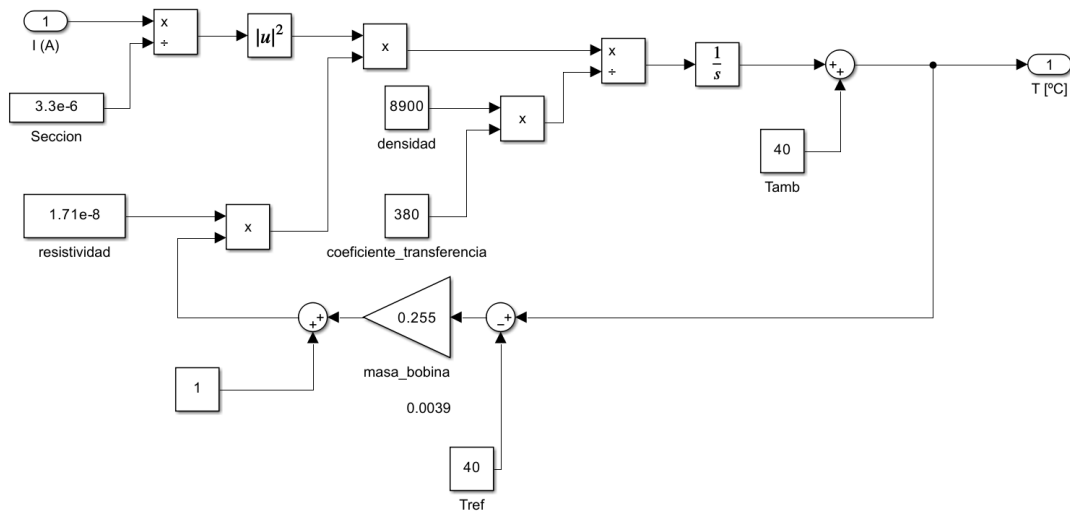


Figura 24: Bloque del calentamiento de 1 fase

Como el peor caso para la temperatura son las condiciones de vacío que se encontrara en Atlas, este bloque calcula el incremento de temperatura en condiciones adiabáticas teniendo en cuenta la sección del conductor, la resistividad, la temperatura ambiente y la propia inercia térmica.

Para calcular el incremento utiliza como entrada la corriente de una de las fases ya que el motor es un sistema trifásico equilibrado, por lo que las corrientes serán de la misma magnitud y desfasadas 120°.

1.5.3.3 Equivalente mecánico

El bloque del equivalente mecánico se muestra en la Figura 25 y está formado por dos tablas de consultas. Por un lado, la primera se utiliza para calcular la fuerza cuando se está acelerando. Está formada por el mega barrido de 1.760 casos realizado para calcular el modelo del motor y necesita los valores de corriente pico, deslizamiento y frecuencia de la onda sinusoidal.

Por otro lado, la segunda tabla de consulta calcula la fuerza de frenado, es decir, la que realiza el motor en contra de la dirección actual invirtiendo la fase V con la W. Para esta tabla solo se necesita la frecuencia y la velocidad ya que debido a frenar con frecuencia constante de 3 Hz la corriente pico se establece en 100 A de manera instantánea y por tanto es despreciable los casos con corrientes pico inferiores que si suceden en aceleración.

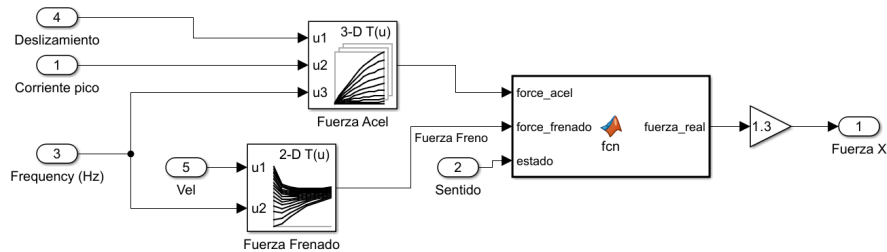


Figura 25: Bloque del equivalente mecánico

Finalmente, el último bloque analiza si se está en el sentido de acelerar o frenar y establece como fuerza la correspondiente, multiplicándola por el factor de 1.3 de compensación por ser una simulación de JMAG en 2D explicado en el apartado 1.3 Factores a considerar: Necesidades y Limitaciones.

1.5.3.4 Dinámica del vehículo

Una vez obtenida la fuerza desarrollado por el DLIM en el eje de avance hay que analizar como se comportara Kénos. Al encontrarse en un tubo en condiciones de vacío el rozamiento con el aire es completamente despreciable. Además, las unidades de levitación permiten eliminar completamente la resistencia mecánica al avance. Por ese motivo la única fuerza en contra es la fuerza de que realizan los imanes permanentes de la unidades de levitación vertical, los HEMS. Se obtuvo mediante una simulación de JMAG una tabla de las resistencias al avance en función de la velocidad y de la altura de levitación, cuyos resultados se observan en la Figura 26.

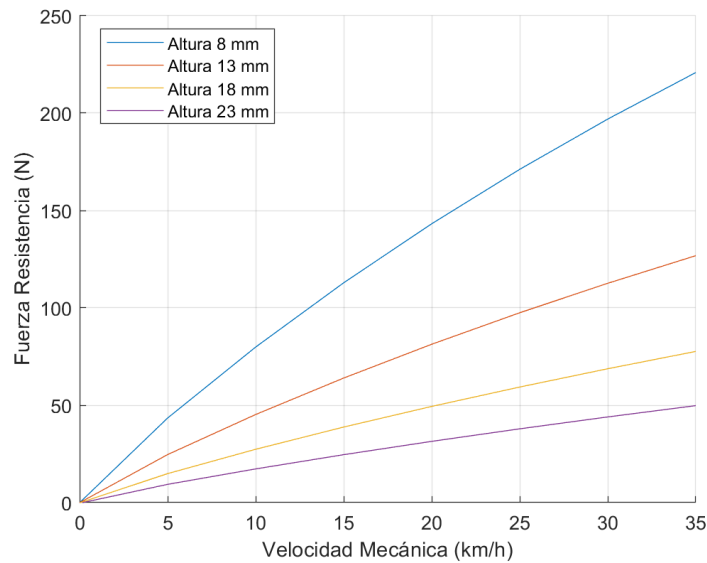


Figura 26: Resistencia de un HEMS en función de la velocidad

Para las simulaciones se estableció la altura a la nominal de 18 mm. La fuerza calculada es solo de una unidad, por lo que se multiplica el valor por los 4 HEMS que presenta Kénos.

Una vez obtenida la fuerza neta, se divide entre la masa para así obtener la aceleración en m/s según la segunda ley de Newton.

$$a = \frac{\sum F}{m} \quad (5)$$

El conjunto de bloques que conforman la dinámica del vehículo se muestran en la Figura 27.

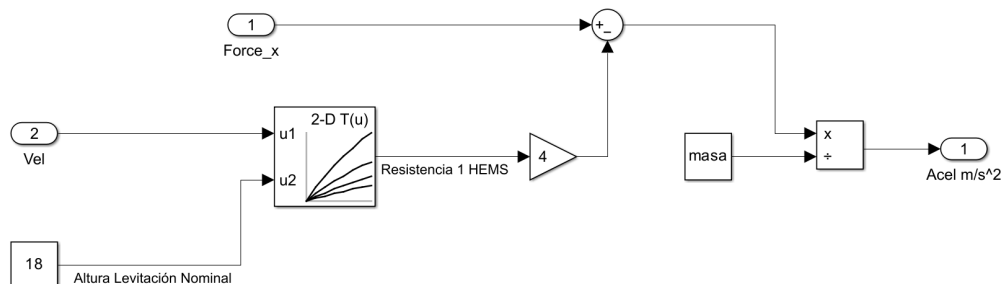


Figura 27: Bloque de la dinámica del vehículo

1.5.3.5 Velocidad real

Este bloque mostrado en la Figura 28 permite obtener la velocidad real en km/h que experimenta el control para poder cerrar la realimentación del modelo mecánico. Está

formado por una integral continua para obtener la mejor aproximación y una conversión de m/s a km/h.

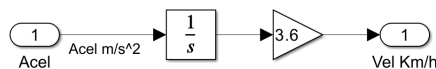


Figura 28: Bloque la velocidad real

1.5.3.6 Cálculo del deslizamiento

La fuerza que realiza el motor depende en gran medida del deslizamiento, por ese motivo se realiza una realimentación con la frecuencia de la onda sinusoidal aplicada correspondiente a la velocidad de sincronismo y la velocidad del vehículo en km/h equivalente a la velocidad mecánica. La Figura 29 muestra el cálculo del deslizamiento.

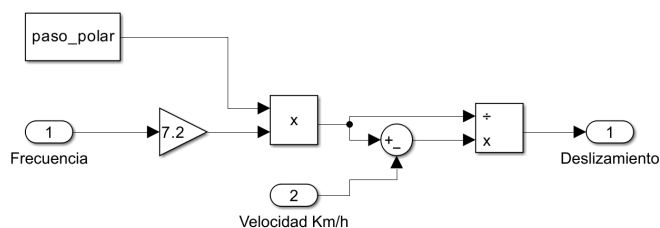


Figura 29: Bloque del cálculo del deslizamiento

La frecuencia se transforma a velocidad lineal multiplicándola por el factor de 7.2 que combina la distancia de paso polar del LIM con la conversión a km/h para poder calcular el deslizamiento con la siguiente formula:

$$Deslizamiento = \frac{Vel_{ref} - Vel_{mec}}{Vel_{ref}} \quad (6)$$

1.5.4. Modulación SVPWM

A partir de las ondas de voltaje deseadas, la modulación SVPWM es capaz de calcular los ciclos de trabajo que hay que aplicar al inversor trifásico. Para el cálculo se tiene en cuenta el voltaje de baterías, 200 V, y la frecuencia de conmutación de los transistores de la PPU, 20 kHz. En la Figura 30 se muestra la interconexión de todos los bloques relacionados con la modulación.

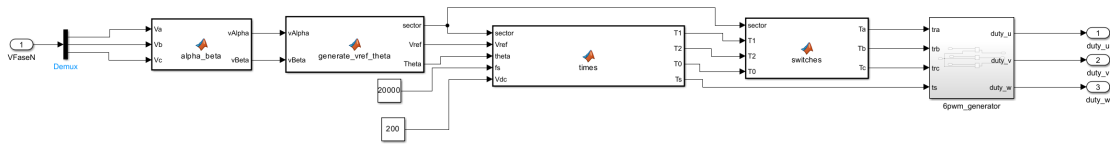


Figura 30: Esquema de bloques del SVPWM en Simulink

1.5.4.1 Alpha-Beta

Este primer bloque transforma las tres ondas sinusoidales trifásicas equilibradas de voltaje en el dominio tiempo calculadas por el control a dos ondas en un marco estacionario ortogonal. Esta operación es conocida como la transformación de Clarke y permite simplificar los cálculos al convertir las tres fases a solo dos variables ya que al ser un sistema equilibrado la tercera componente de Clarke es nula [7].

La transformada de Clarke se obtiene operando los voltajes instantáneos como se observa en la Ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.5.4.2 Vref y Theta

A partir de las dos componentes Alpha y Beta es posible obtener tanto el módulo como la dirección del vector de voltaje a partir de las siguientes operaciones.

$$V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan(V_\alpha, V_\beta) \quad (9)$$

Con el ángulo también se divide todo el círculo en el que se encuentra comprendido el vector en 6 sectores de 60° empezando en 0.

1.5.4.3 Tiempos

Este bloque utiliza el modulo, ángulo y sector del vector, además de la frecuencia de conmutación de los transistores y el voltaje del bus de continua proporcionado por las baterías para calcular los tiempos que deben estar activos los transistores independientemente del sector. Estos tiempos se calculan como se observa en las Ecuación 10, 11 y 12.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} * |V_{ref}|}{V_{DC} * f_s} \cdot \sin\left(\frac{sector * \pi}{3} - \theta\right) \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} * |V_{ref}|}{V_{DC} * f_s} \cdot \sin\left(\theta - \frac{(sector - 1) * \pi}{3}\right) \quad (11)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (12)$$

1.5.4.4 Switches

Una vez obtenidos los tiempos genéricos para todos los sectores, hay que asignarlos en función del sector según la Tabla 2

Tabla 2: Tiempo de conmutación de fases y sector

Sector	Tiempo Activo
1	$T_u = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_v = T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_w = \frac{T_0}{2}$
2	$T_u = T_1 + \frac{T_0}{2}$ $T_v = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_w = \frac{T_0}{2}$
3	$T_u = \frac{T_0}{2}$ $T_v = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_w = T_2 + \frac{T_0}{2}$
4	$T_u = \frac{T_0}{2}$ $T_v = T_1 + \frac{T_0}{2}$ $T_w = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
5	$T_u = T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_v = \frac{T_0}{2}$ $T_w = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
6	$T_u = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ $T_v = \frac{T_0}{2}$ $T_w = T_1 + \frac{T_0}{2}$

1.5.4.5 Ciclos de trabajo

La PPU tiene un controlador de puerta ADUM4221ARIZ [8] el cual acepta los tiempos de conmutación de cada fase en un valor entre 0 y 1. Por ese motivo, para obtener el ciclo de trabajo de los transistores se divide el valor de tiempo activo de cada uno de las fases entre el periodo de conmutación.

$$Ciclo_n = \frac{T_n}{T_s} \quad (13)$$

1.5.5. Inversor Trifásico

El inversor trifásico que utiliza Kénos está formado por el conjunto de dos PPU, una para cada LIM. La PPU se muestra en la Figura 31. Está formada tres ramas, una para cada fase del LIM y contiene 8 transistores MOSFET por cada fase que forman un semi-puente de 4 transistores en paralelo capaces de soportar los 200 V de baterías y los 25 A que atravesaran cada uno de los transistores en la corriente máxima. Cada transistor tiene un diodo de descarga que permite la circulación de la corriente de la carga inductiva en corte. Los transistores conmutan a una frecuencia de 20 kHz mediante y son controlados mediante el controlador de puerta ADUM4221ARIZ [8].

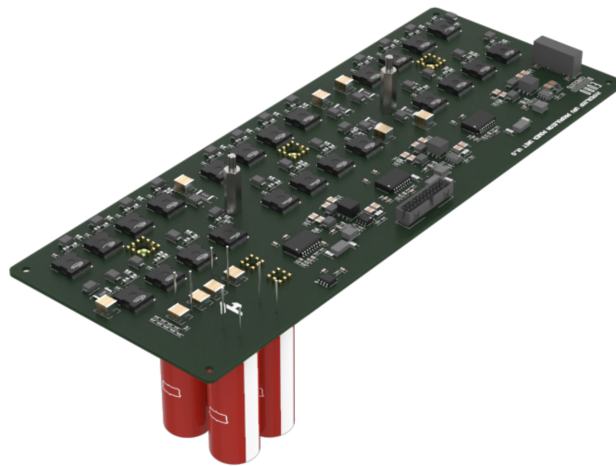


Figura 31: Vista de la placa PPU

Para modelar el inversor se ha decidido implementar el circuito eléctrico en Simulink mediante la librería auxiliar de Simscape. Debido a la alta frecuencia de conmutación de los transistores las simulaciones eran muy costosas desde un punto de vista computacional, por lo que se optó por realizar todo el ajuste del sistema de control sin usar el inversor y introducirlo en la simulación final debido a su baja importancia en el comportamiento del sistema.

Con el fin de poder introducirlo en la simulación sin la necesidad de obtener un modelo del controlador de puerta en Simulink se modificó el bloque del apartado 1.5.4.5 Ciclos de trabajo para obtener los tiempos que el transistor debe estar activo dividiendo los tiempos de cada fase entre el periodo de la conmutación y comparando el resto con el tiempo de simulación.

La Figura 32 muestra el inversor trifásico diseñado en Simscape, agrupando el semi-puente formado por 4 transistores y 4 diodos de descarga a solo un transistor con un diodo con los mismos parámetros que los reales, como la resistencia en conducción y la caída de voltaje del diodo.

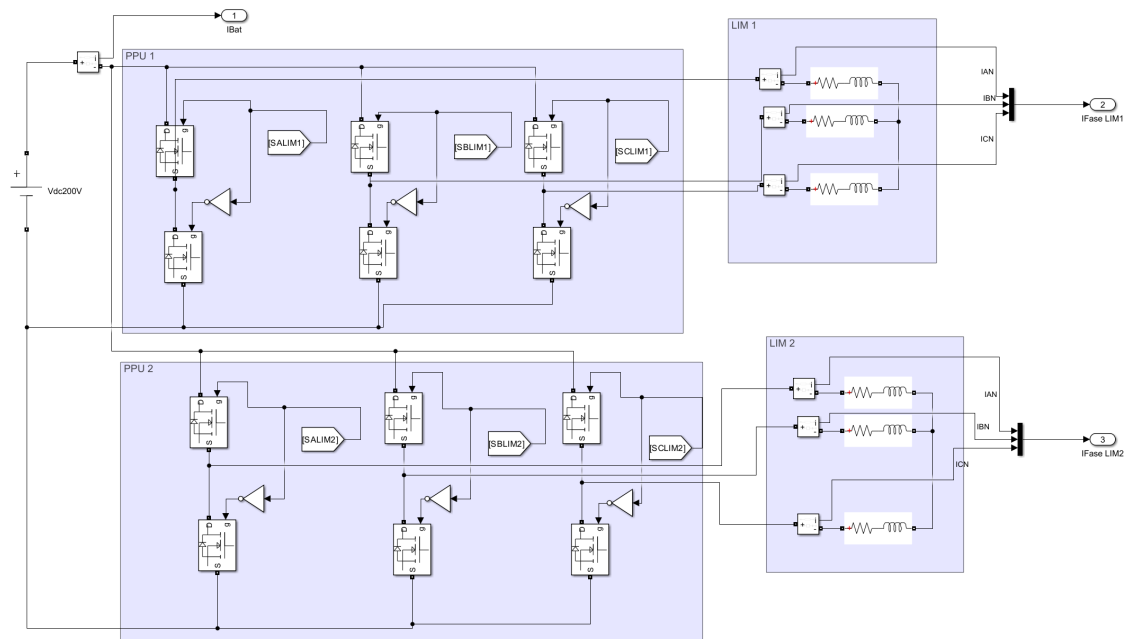


Figura 32: Esquema del inversor trifásico en Simscape

Para realizar una correcta simulación se ha implementado el equivalente eléctrico del modelo del motor con una resistencia y una bobina en serie de la propia librería de Simscape con los valores reales del motor. Los resultados se pueden observar en el apartado 3 Resultados del Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados.

1.5.6. Validación

La validación del sistema de control está dividida en dos partes. La primera parte está definida por la metodología TIL, mientras que la segunda se realizará con pruebas del sistema real.

TIL es una metodología formada por 4 fases. La primera fase es Model in the Loop (MIL). En esta fase se diseñó modelo del motor y los bloques de control en el programa de simulación. Como se explica en el apartado 1.5.2, el diseño se ha realizado con el programa de Simulink.

La segunda fase es el Software in the Loop (SIL). Esta fase se constituye escribiendo el código del sistema de control diseñado en el MIL en el lenguaje de programación que se utilizara para implementar en los microprocesadores.

Para realizar esta fase se usa la librería Simulink Coder, que permite importar el código C++ que escribe el subsistema de Firmware. Una vez introducido los bloques con el código en C++, se conectaron a las mismas entradas que su homónimo de los bloques de simulación y se compararon las salidas. De esta forma se consiguió observar la correcta correlación entre el código a implementar y el diseño.

Finalmente, la fase de Processor in the Loop (PIL) y Hardware in the Loop (HIL) se fu-

sionaron debido a las semejanzas que presentan ambas. PIL analiza el funcionamiento del código ejecutándose en el microprocesador, pudiendo compararlo con lo obtenido en el SIL y analizar posibles problemas de rendimiento. Los valores del control se obtienen directamente de la memoria del microcontrolador, sin usar ninguno de sus pines. En el HIL también se ejecuta el código en el microcontrolador, pero la obtención de los parámetros de control se realiza mediante conexiones físicas, conectando la placa del microcontrolador al ordenador que ejecuta el modelo.

En Hyperloop UPV, el subsistema de Hardware creó una placa de circuito impreso llamada Software & Hardware Universal Testing Unit Platform (SHUTUP), que se puede observar en la Figura 33. Esta placa permite conectarse mediante pines físicos a la PCU. Así pues, el modelo del motor se ejecutó en un ordenador mediante Simulink Real Time Desktop y enviaba mediante Ethernet a la SHUTUP el valor de los sensores. La SHUTUP ponía los pines de los sensores a los valores recibidos y la PCU los leía, ejecutaba el bucle de control y ponía a los pines correspondientes los valores del ciclo de trabajo de cada uno de los transistores que eran leídos por la SHUTUP y enviados a Simulink Real Time Desktop, cerrando así el bucle.

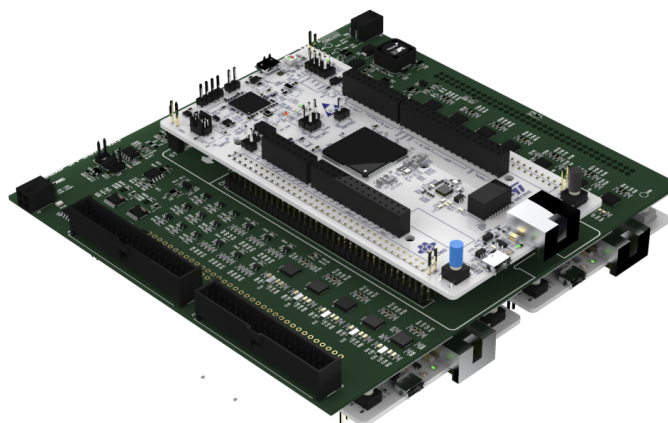


Figura 33: Vista de la placa SHUTUP

La segunda parte estuvo comprendida por las pruebas con el sistema real que incluía todos los componentes como son el motor, las placas de control y potencia y las baterías. La primera prueba se realizó con una rueda de metal de 2 m de diámetro que funciona como un raíl infinito. Esta rueda se encuentra en el sótano de la ETSII y se puede observar en la Figura 34. En la rueda se probó el sistema de control. Debido a la imposibilidad de montar la IMU sobre la rueda, se obtuvo la velocidad mediante un encoder derivando los datos de posición obtenidos.

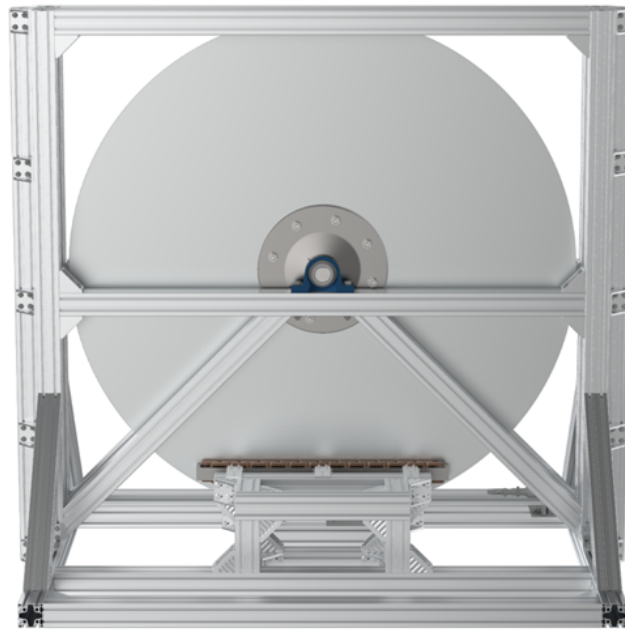


Figura 34: Rueda de pruebas en laboratorio

Finalmente se realizaron pruebas en pista, montando el motor en el vehículo e insertándolo en Atlas, comprobando el correcto funcionamiento del control y de la IMU. Todos los resultados de las pruebas realizadas se pueden observar en el apartado 3 Resultados del Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados.

1.6. Estudio Económico

El coste total de este proyecto asciende a la cuantía de TRECE MIL CIENTO CUARENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS, 13.147,39 €. Su desglose se desarrolla en detalle en el documento N° 4 Presupuesto.

1.7. Conclusiones

El principal objetivo de este proyecto se ha alcanzado satisfactoriamente al diseñar y validar el sistema de control para el motor DLIM de Kénos el cual consigue acelerar y frenar hasta los 35 km/h en menos de 18 m, a la vez que está optimizado para la eficiencia. Se han respetando los plazos temporales exigidos por Hyperloop UPV y se ha conseguido un sistema fiable y robusto gracias a la metodología TIL y a la coordinación entre los distintos subsistemas de Hyperloop UPV, demostrando la posibilidad de escalar la tecnología Hyperloop.

A su vez, este proyecto satisface distintos requisitos necesarios para alcanzar varias metas de los objetivos de desarrollo sostenible relacionadas con la eficiencia energética y la investigación de nuevas tecnologías sostenibles .



1.8. Bibliografía

- [1] EHW. *European Hyperloop Week*. 2023. URL: <https://hyperloopweek.com/>.
- [2] Tesla. *Hyperloop Alpha*. 2013. URL: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf.
- [3] Simon Strobl. *SVPWM vs SPWM modulation techniques*. 2021. URL: <https://imperix.com/doc/implementation/svpwm-vs-spwm-modulation-techniques>.
- [4] RICARDO S. SANCHEZ PEÑA y JUAN IGNACIO GIRIBET. *FUNDAMENTOS DEL CONTROL LINEAL ROBUSTO*. EUDEBA, 2021.
- [5] TDK InvenSense. *Datasheet IIM-42652*. 2023. URL: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/motion-inertial/imu/data_sheet/ds-000440-iim-42652-typ-v1.1.pdf.
- [6] Tamura. *Datasheet L01Z300S05*. 2023. URL: https://www.mouser.es/datasheet/2/397/TCOA_S_A0009485006_1-2563935.pdf.
- [7] controlsystemsacademy.com. *TRANSFORMATIONS FOR MOTOR DRIVE DESIGN - CLARKE*. 2018. URL: <https://controlsystemsacademy.com/0031/0031.html>.
- [8] Analog Devices. *Datasheet Adum4221*. 2023. URL: https://www.mouser.es/datasheet/2/609/adum4221_4221_1_4221_2-3122252.pdf.

VALENCIA, JULIO de 2023

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Anexo A: Cálculos, simulaciones y resultados

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

1.	Cálculos	31
2.	Simulaciones	33
3.	Resultados	38
3.1.	Pruebas de sensores	38
3.1.1.	Sensor de corriente	38
3.1.2.	Sensor IMU	40
3.2.	Testing in the loop	41
3.2.1.	Software in the loop	41
3.2.2.	Hardware in the loop	41
3.3.	Pruebas en laboratorio	44
3.3.1.	Pruebas en la rueda	44
3.3.2.	Pruebas en pista	47

TABLA DE FIGURAS

1.	Fuerza en función de la frecuencia y velocidad	31
2.	Frecuencia en función de la velocidad	32
3.	Fuerza de frenado en función de la frecuencia y velocidad	32
4.	Velocidad en función del tiempo	33
5.	Velocidad en función del espacio recorrido	34
6.	Frecuencia en función del tiempo	34
7.	Corriente pico y referencia en función del tiempo	35
8.	Corrientes en función del tiempo	36
9.	Temperatura en función del tiempo	36
10.	Voltaje de referencia en función del tiempo	37
11.	Fuerza en función del tiempo	37
12.	Potencia consumida en función del tiempo	38
13.	Medidas del sensor en función de la corriente	39
14.	Medidas filtradas y sin filtrar para 78 A	39
15.	Medidas de aceleración con y sin el algoritmo estacionario	40
16.	SIL realizado para el SVPWM	41
17.	Contenido del Alpha-Beta del SIL	41
18.	Sistema completo implementado en HIL	42
19.	Comparación MIL y HIL de la velocidad	43
20.	Comparación MIL y HIL en las corrientes	43
21.	Montaje del DLIM en la rueda	44
22.	Rueda con el DLIM, las PPU y la PCU	45
23.	Velocidad de la rueda en función del tiempo	45
24.	Frecuencia en la rueda en función del tiempo	46
25.	Corriente pico y referencia en función del tiempo	46
26.	Corrientes y pico ampliados	47
27.	Dinámica de Kénos en Atlas	47
28.	Velocidad en función del tiempo de la dinámica de Kénos en Atlas	48
29.	Velocidad en función de la posición de Kénos en Atlas	48
30.	Corrientes de la dinámica de Kénos en Atlas	49

1. Cálculos

Una vez obtenidos los 1760 casos de la simulación de JMAG para caracterizar el motor se procesaron los datos en Matlab. Se obtuvo la Figura 1 en la que se puede observar la fuerza que realiza el motor a una corriente pico de 100 A en función de la frecuencia y de la velocidad mecánica.

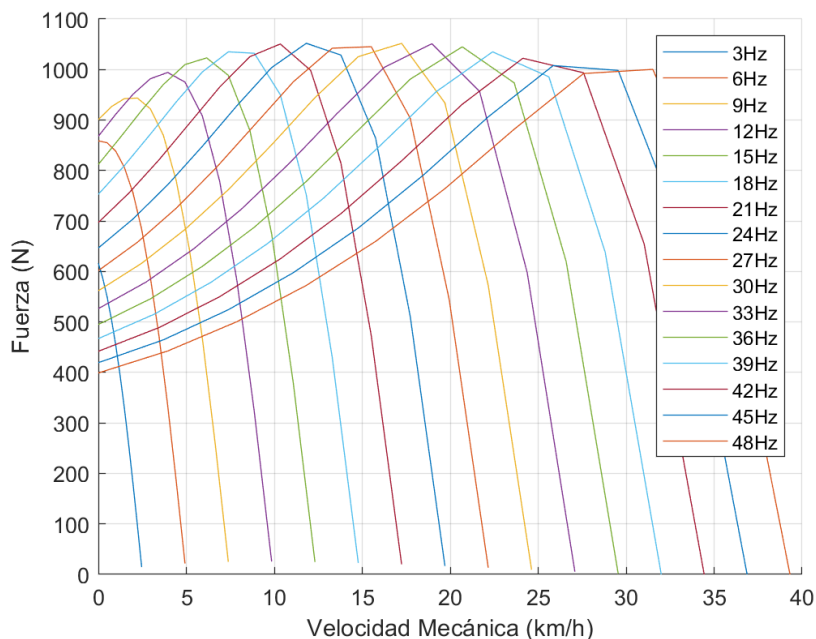


Figura 1: Fuerza en función de la frecuencia y velocidad

Para conseguir que el motor desarrolle la máxima fuerza independientemente de la corriente y por tanto la máxima eficiencia, se debe variar la frecuencia en función de la velocidad. La frecuencia de la onda de voltaje sinusoidal debe coincidir con la que desarrolle la mayor fuerza, por ese motivo se calculó a que frecuencia corresponden los máximos. Usando la herramienta Curve Fitter de Matlab se obtuvo una recta que se aproxima a una función lineal con una ρ^2 de 0.998 a la función de de los máximos. Se pueden comparar ambas funciones en la Figura 2. La Ecuación 14 toma como constantes p1 1.3 y p2 8.4.

$$f = p2 + p1 * vel \quad (14)$$

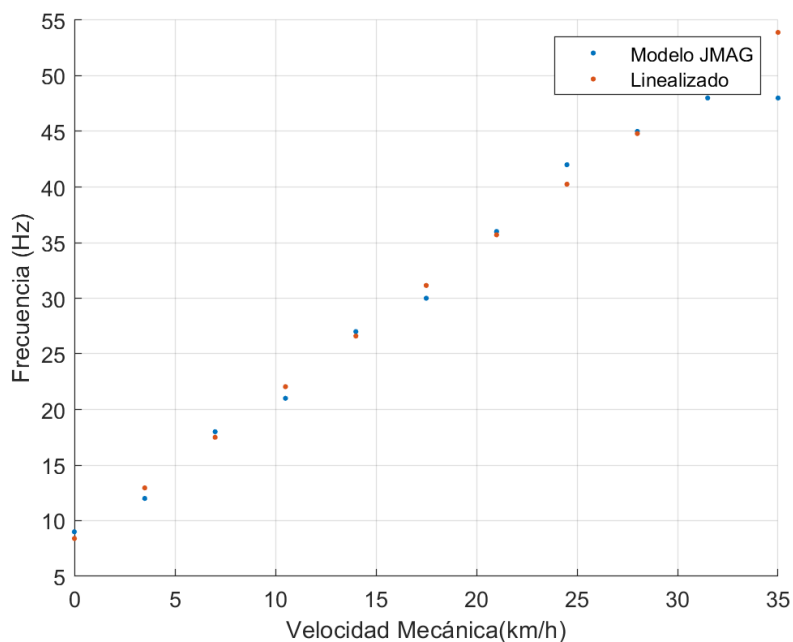


Figura 2: Frecuencia en función de la velocidad

Por último, también se analizó el comportamiento del motor en frenado intercambiando la fase V con la W. La gráfica obtenida fue la mostrada en la Figura 3 en la que se observa como la máxima eficiencia en frenado se consigue con una frecuencia fija de 3 Hz.

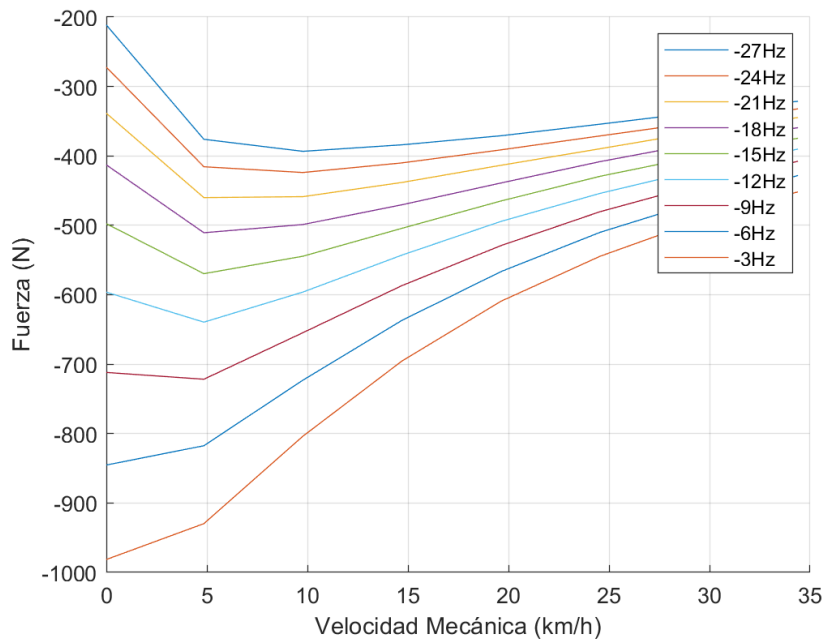


Figura 3: Fuerza de frenado en función de la frecuencia y velocidad

2. Simulaciones

Se realizó una simulación completa en la que se incluyeron todos los bloques explicados en el apartado 1.5 Justificación detallada de la solución adoptada de la memoria. Se estableció la distancia máxima a recorrer en 18 m correspondientes a la distancia útil de Atlas y la velocidad de referencia a 35 km/h. También se limitó los valores de corriente a 100 A y el voltaje pico a 115 V correspondientes a las limitaciones interpuestas por Hyperloop UPV.

En la Figura 4 se observa como la velocidad alcanza el valor de referencia en menos de 2 s. También se aprecia que cuando empieza a frenar tarda 0.2 s en reaccionar. Esto es debido a que el sistema debe esperar a que las corrientes sean de 0 A para poder invertir las fases y empezar a frenar. Esta gráfica permite comprobar el correcto funcionamiento del bucle externo, es decir, el controlador de velocidad.

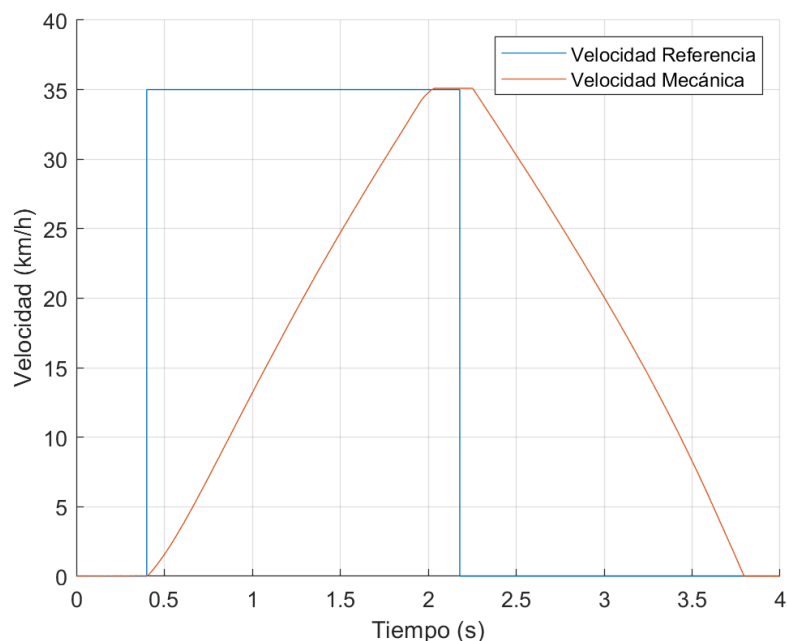


Figura 4: Velocidad en función del tiempo

Debido a la limitación de espacio proveniente de los metros útiles de Atlas, en la Figura 5 se analiza la velocidad en función de la posición permitiendo comprobar que Kénos se detendrá completamente en menos de 18 m.

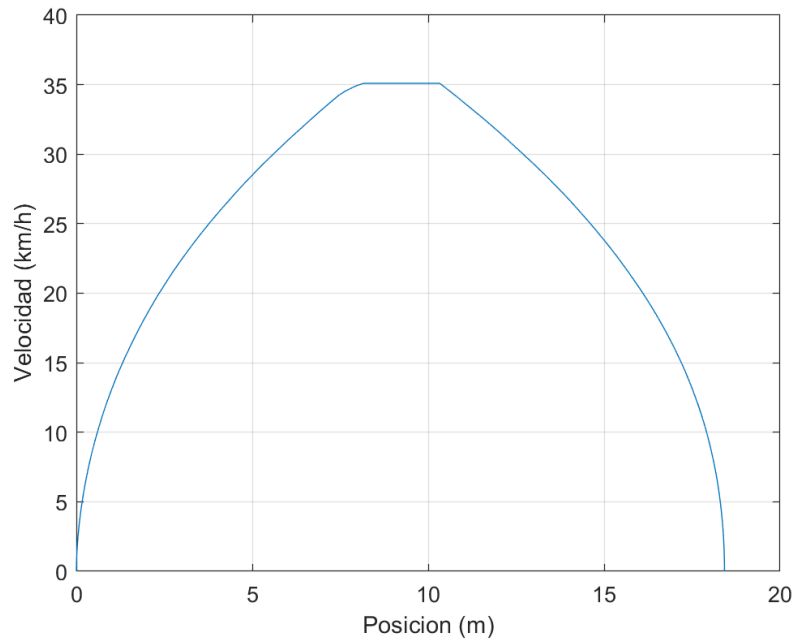


Figura 5: Velocidad en función del espacio recorrido

Respecto a la frecuencia, la Figura 6 muestra la fase de aceleración con una frecuencia de 9 Hz para el arranque, la cual aumenta gradualmente en función de la velocidad y que se mantiene constante en -3 Hz al frenar.

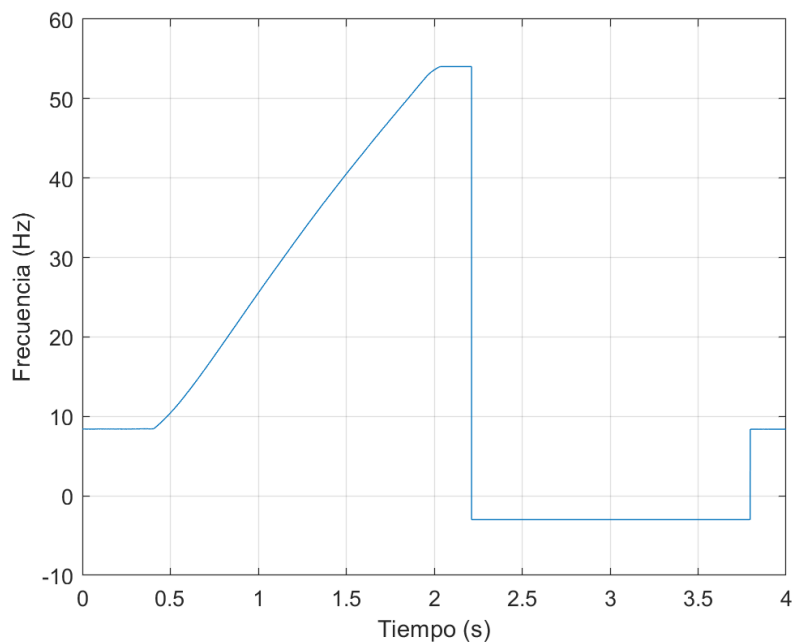


Figura 6: Frecuencia en función del tiempo

La Figura 7 muestra en detalle el comportamiento del controlador de corriente del bucle

interno. Como se ha comentado, el controlador no es capaz de corregir completamente en la fase de aceleración, pero si lo consigue en frenado con la frecuencia fija. En esta gráfica se aprecia el paso por 0 A antes de empezar a frenar

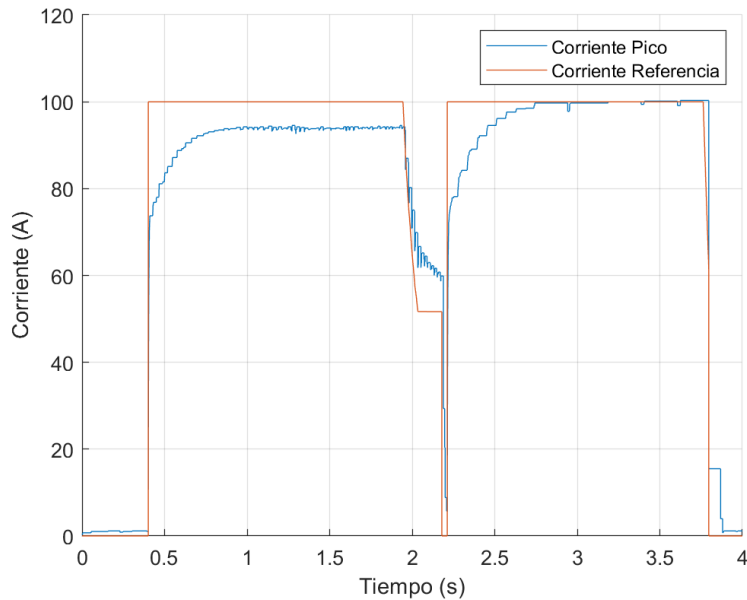


Figura 7: Corriente pico y referencia en función del tiempo

Las corrientes de las tres fases de un LIM y el pico calculado se pueden observar en la Figura 8. Una vez activado el control, el pico se mantiene muy cercano a la referencia de 100 A en aceleración y la alcanza completamente en frenado. El motivo por el cual no consigue alcanzarla en aceleración es por estar aumentando continuamente la frecuencia, lo que aumenta la reactancia de las fases y por tanto necesita más voltaje y el controlador no consigue corregir error, sino que solo lo mantiene.

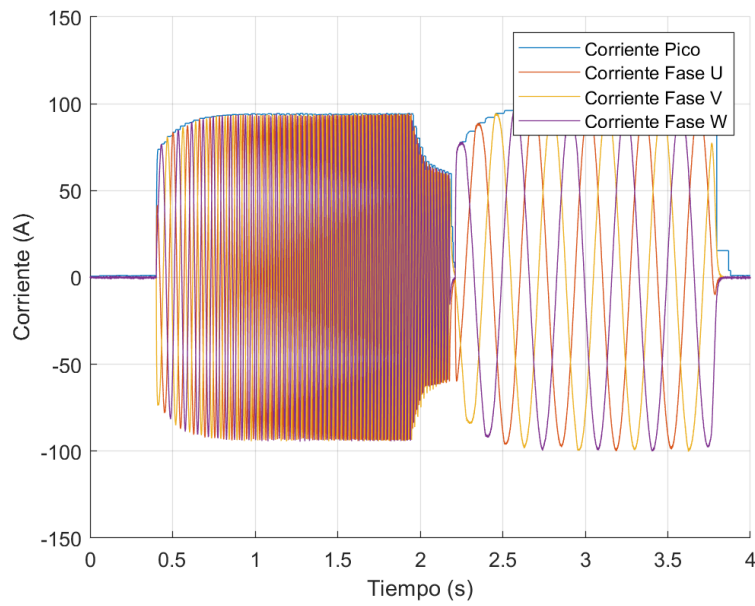


Figura 8: Corrientes en función del tiempo

Un aspecto importante para proteger el motor es la temperatura, que no debe ser superior a 150°C. La Figura 9 muestra el comportamiento partiendo desde una temperatura ambiente de 40°C en condiciones adiabáticas similares a las que se encontrara Kénos al estar en vacío dentro de Atlas. El incremento es menor de 20°C, resultando una temperatura final inferior de 60°C permitiendo así realizar más de un prueba seguida.

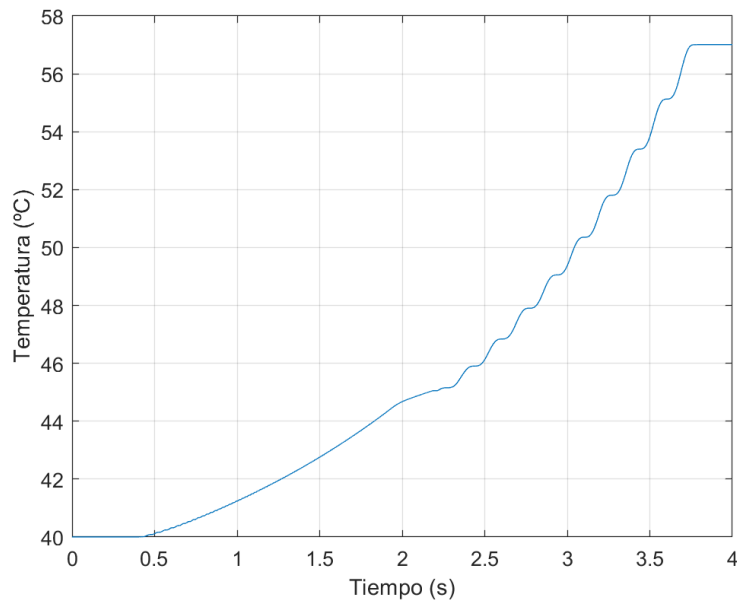


Figura 9: Temperatura en función del tiempo

La frecuencia va aumentando en la fase de aceleración, por eso la amplitud de la onda de

voltaje debe aumentar para conseguir mantener la corriente en el valor de referencia. Esto se puede observar en la Figura 10. En frenado el voltaje es mucho menor y constante ya que la frecuencia es más baja, reduciendo la reactancia de las fases del motor y además también es constante, por lo que una vez alcanzada la referencia no varía.

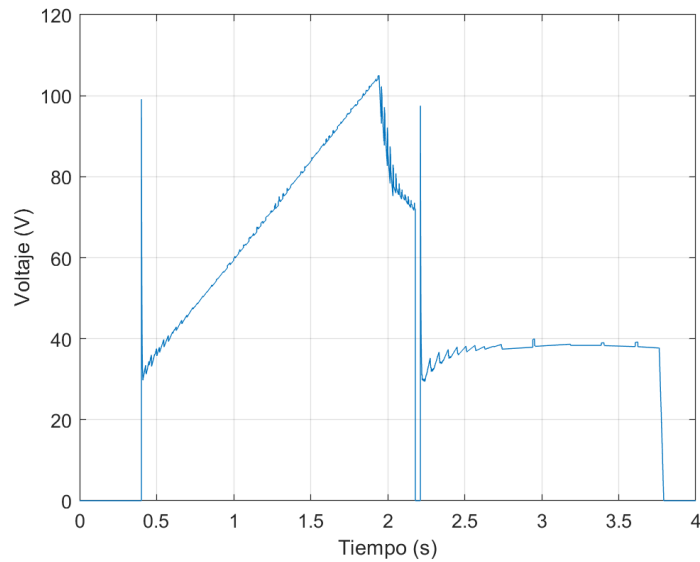


Figura 10: Voltaje de referencia en función del tiempo

En la Figura 11 se puede apreciar la fuerza que realiza el motor y la fuerza real que sufre Kénos. En aceleración la fuerza real es menor ya que las unidades HEMS se oponen al movimiento, pero en frenado aumentan la fuerza del motor.

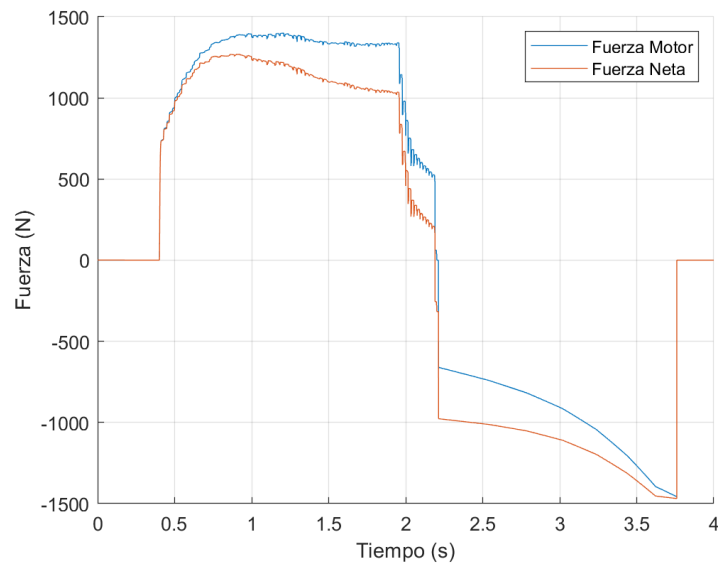


Figura 11: Fuerza en función del tiempo

Finalmente, la Figura 12 muestra la potencia acumulada consumida de las baterías a partir de multiplicar el voltaje de las baterías con la corriente que ofrecen. Esta gráfica se ha obtenido a partir de introducir el inversor trifásico en Simscape y simularlo a la vez que el resto del sistema de control.

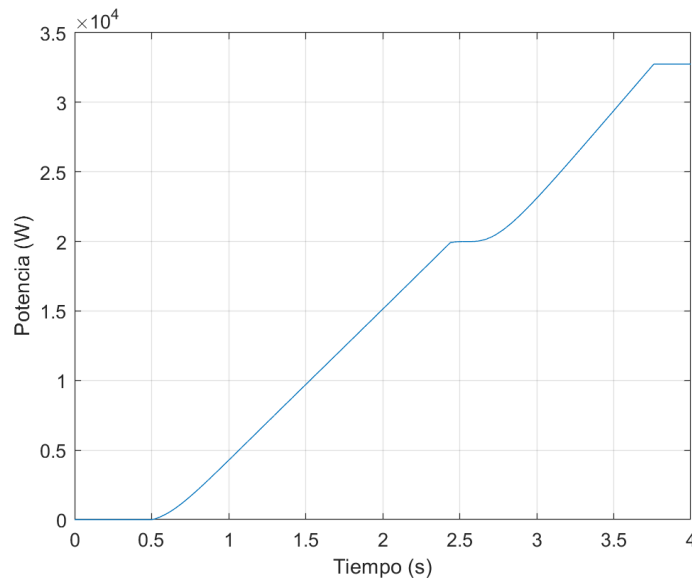


Figura 12: Potencia consumida en función del tiempo

3. Resultados

A continuación se describirán todas las pruebas realizadas a lo largo de este proyecto para obtener los modelos de los sensores, validar el sistema de control y la realización de las pruebas en laboratorio con los componentes reales.

3.1. Pruebas de sensores

El sistema de control se realimenta con dos sensores distintos, el sensor de corriente y la IMU. Se han realizado distintas pruebas con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los sensores y modelarlos en Simulink.

3.1.1. Sensor de corriente

Kénos utiliza el sensor de corriente L01Z300S05 [6] mediante una placa de adquisición diseñada por Hyperloop UPV. Con el fin de eliminar el error de offset, se realiza una puesta a cero del sensor cada vez que se inicia la PCU adquiriendo los primeros 100 valores leídos correspondientes a una corriente de 0 A y usándolos para compensar continuamente.

Para caracterizar los sensores se atravesaron 8 valores distintos de corriente y se obtuvo una recta lineal mediante la herramienta Curve Fitter de Matlab. La Figura 13 muestra

que el error de linealidad con la función de transferencia lineal calculada respecto a los valores obtenidos en la prueba es menor de 2 A en el fondo de escala de 100 A.

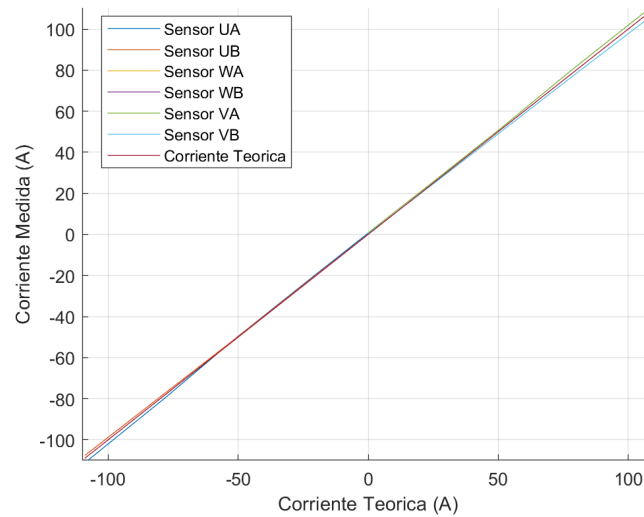


Figura 13: Medidas del sensor en función de la corriente

También se analizaran los valores obtenidos a una frecuencia de 5kHz, correspondiente a la usada para el control de corriente, para una corriente fija. Se obtuvo una varianza máxima de $4.57e^{-6} A^2$. Aun siendo un valor reducido, se decidió implementar un filtro paso bajo de 2º orden Butterworth con una frecuencia de corte de 500 Hz con el fin de reducirlo sin afectar a la onda de corriente sinusoidal que deberán medir durante el control que tendrá una frecuencia máxima de 50 Hz, una década menor. Los resultados de un test para una corriente constante de 78 A se puede observar en la Figura 14

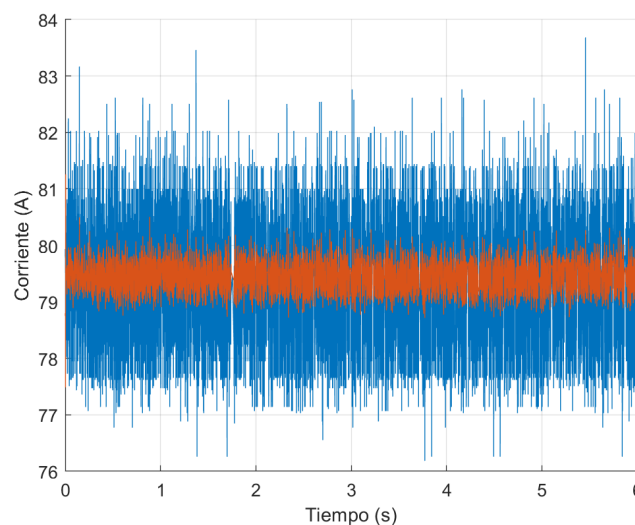


Figura 14: Medidas filtradas y sin filtrar para 78 A

3.1.2. Sensor IMU

La IMU es el sensor más crítico para el sistema de control ya que realimenta al bucle externo y presenta ciertos errores inherentes de los sensores inerciales. Se utilizará la IMU IIM-42652 de TDK [5]. Al utilizar la IMU para obtener la velocidad de Kénos se debe integrar los valores de aceleración que obtiene, eliminando así el posible ruido blanco presente en los sistemas electrónicos, además la propia IMU implementa un filtro paso bajo por su propio hardware. Por este motivo, el análisis se centrará en la deriva propia de este tipo de sensor.

Cabe destacar que debido al montaje de la PCU que contiene la IMU en Kénos y el hecho de moverse a través de Atlas únicamente en una dirección alineada con la PCU solo se deberá extraer el valor de aceleración en el eje X, sin necesidad de obtener la orientación y compensar la gravedad.

Con el fin de reducir el error procedente a la deriva se ha diseñado un algoritmo que analiza si la IMU está en estacionario o moviéndose para compensar los valores, como explicado en detalle en el apartado 1.5.2.6 Sensor IMU.

Se realizó una prueba moviendo la PCU con la IMU sobre la estructura móvil de una impresora 3D, pudiendo alinear el eje x en la dirección del movimiento y encontrándose totalmente horizontal, imitando la posición dentro de Kénos. Se movió primero en una dirección, se esperó 2 segundos y se volvió a la posición inicial.

Los resultados se pueden observar en la Figura 15, observando que el algoritmo consigue compensar la deriva que se encuentra tanto en el momento de pausa intermedia como al final de la prueba.

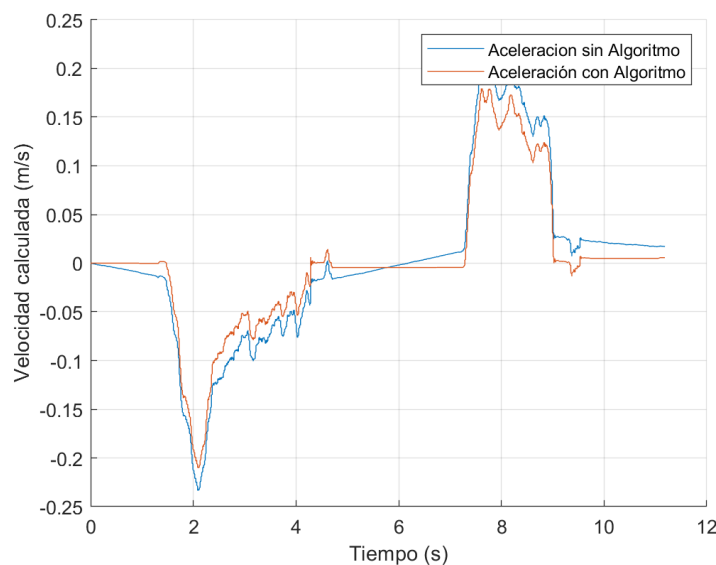


Figura 15: Medidas de aceleración con y sin el algoritmo estacionario

3.2. Testing in the loop

La metodología TIL se adoptó para conseguir alcanzar la fiabilidad y robustez deseada por Hyperloop UPV. La fase del MIL se realizó usando Simulink y se puede comprobar a lo largo del apartado 2 Simulaciones. La fase del SIL y del HIL se demostrará a continuación:

3.2.1. Software in the loop

Esta fase se realizó con ayuda del subsistema de Firmware de Hyperloop UPV que escribió el código del control que se debía implementar en las placas.

Una vez escrito el código C++ de las placas, se procedió a importarlo en Simulink gracias a la herramienta Simulink Test que permite importar código propio a bloques de Simulink.

En la Figura 16 se muestran los bloques C Caller de la librería Simulink Test que conforman todo el SIL de la modulación SVPWM

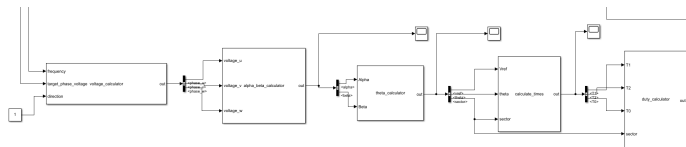


Figura 16: SIL realizado para el SVPWM

La Figura 17 muestra el contenido del bloque Alpha-Beta para la realización del SIL, estableciendo la frecuencia de ejecución a 5 kHz, igual que en el control.

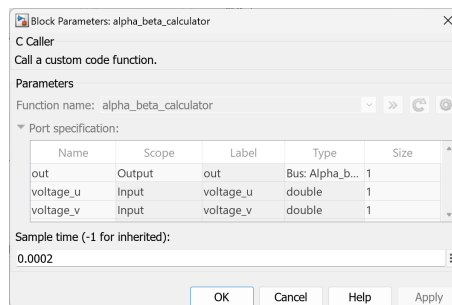


Figura 17: Contenido del Alpha-Beta del SIL

Una vez introducido todo el código C++ en Simulink se comparó el comportamiento del sistema de control del MIL con el del SIL, permitiendo localizar y corregir los distintos errores de lógica e implementación que habían surgido en el código, cumpliendo así su objetivo principal.

3.2.2. Hardware in the loop

Los sistemas HIL permiten comprobar el correcto funcionamiento de las placas de control y la integración del código con las mismas.

El principal inconveniente de esta fase de la metodología TIL es el coste de los sistemas de simulación en tiempo real y de los bloques de entrada y salidas, siendo muy elevados y por tanto no utilizados habitualmente. Hyperloop UPV ha planteado su propia herramienta de validación del HIL, creando la placa SHUTUP que puede conectarse con las placas de control a validar mediante conexiones físicas a través de sus pines y con un ordenador ejecutando un modelo del sistema de control en Simulink Real Time Desktop a través de una conexión Ethernet por paquetes Transmission Control Protocol (TCP).

De esta forma se consigue validar la integración de todo el sistema de control analizando fallos que no surgirían con el SIL como problemas de rendimiento en la placa de control, errores de mapeado de pines y problemas de hardware en la placa.

Gracias a la compatibilidad de Simulink, únicamente se han tenido que sustituir los bloques de control implementados en la placa por bloques de conexiones TCP a la entrada de la planta, manteniendo todos los bloques de Simulink de la planta y añadiendo a sus salidas los bloques TCP de entrada al control como se puede observar en la Figura 18.

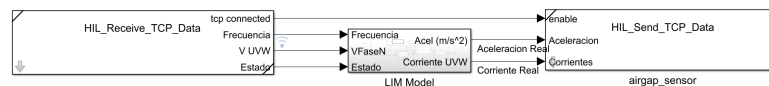


Figura 18: Sistema completo implementado en HIL

La PCU se conecta con la SHUTUP mediante los pines y SHUTUP se encarga de recibir los datos correspondientes al modelo como las corrientes, traducirlas a los valores de voltaje equivalentes que se obtendrían del sensor de corriente y captar la salida del control calculada en la PCU como los ciclos de trabajo que se aplicarían en los transistores, traducirlos a ondas de voltaje y enviarlos de vuelta a Simulink Real Time Desktop.

Para poder recibir y mandar los paquetes TCP, el subsistema de Firmware configuró completamente SHUTUP y crearon un script en Python para ejecutarse en el ordenador con Simulink Real Time Desktop encargado de crear el servidor y administrar los paquetes.

Se realizó una simulación completa igual que la realizada para el MIL con el objetivo de poder compararlas. La Figura 19 compara las velocidades obtenidas, siendo prácticamente iguales validando la implementación del sistema de control en la PCU.

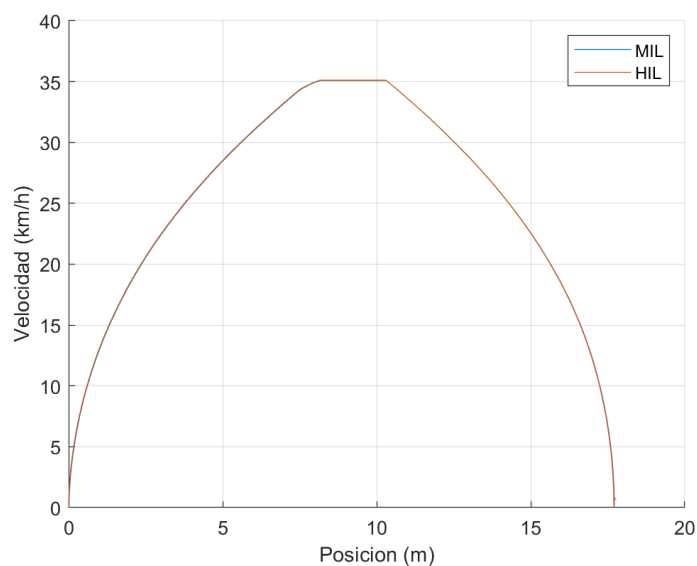


Figura 19: Comparación MIL y HIL de la velocidad

Respecto a la Figura 20, se comparan las corrientes calculadas de un LIM. Las del HIL presentan más ruido debido a las operaciones de escritura de la SHUTUP del voltaje en los pines y la lectura de los convertidores analógico digital del microprocesador de esos mismos voltajes. A pesar de ello la diferencia es mínima y por tanto se puede dar por validado la implementación del sistema de control.

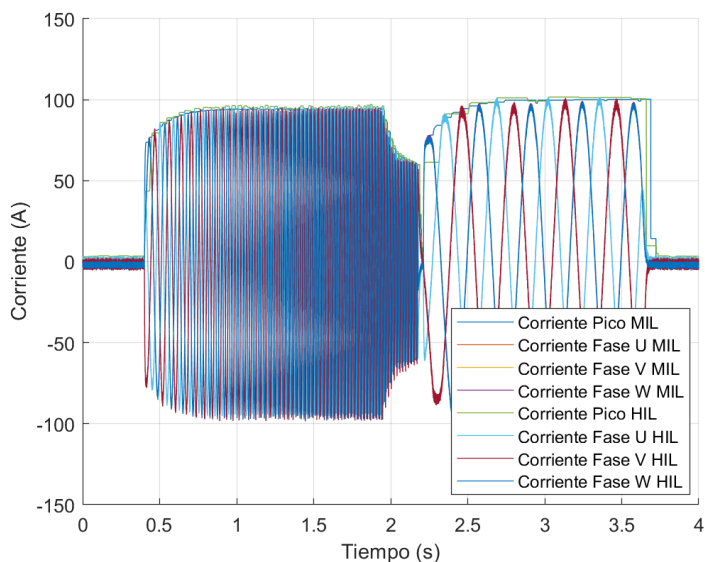


Figura 20: Comparación MIL y HIL en las corrientes

3.3. Pruebas en laboratorio

Una vez completada todas las fases de la metodología TIL, se procedió a realizar las pruebas con todos los componentes reales para completar las pruebas de servicio definidas en el apartado 3.3.4 Pruebas y ajustes de servicio del Pliego de Condiciones.

3.3.1. Pruebas en la rueda

La primera prueba se realizó en la bancada del sótano de la ETSII donde se encuentra la rueda de metal de 2 m de diámetro que simula un raíl infinito. El montaje del motor en la bancada se puede observar en la Figura 21.

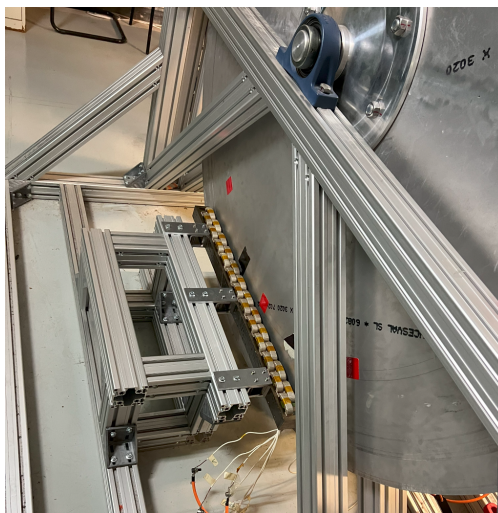


Figura 21: Montaje del DLIM en la rueda

El promotor del proyecto, Hyperloop UPV, decidió limitar la frecuencia mínima de aceleración a 20 Hz y la de frenado a 15 Hz, la corriente máxima a 50 A y el voltaje de baterías a 75 V por limitaciones en la validación de la PPU y de las baterías, tareas correspondientes al subsistema de Hardware.

Para adaptar el control a estos cambios, se ajustaron los valores de saturación de los bloques de control para no superar los límites establecidos y se estableció como velocidad de referencia 20 km/h. Además, debido a la imposibilidad de montar la IMU sobre la rueda, se realimentó el controlador de velocidad mediante el uso de un encoder con precisión de 0.25°. En la Figura 22 se puede observar todo el sistema completo.

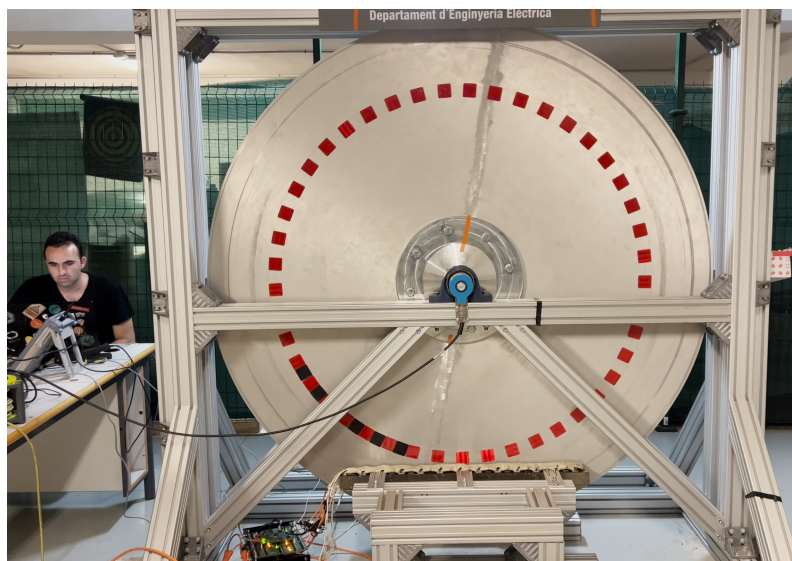


Figura 22: Rueda con el DLIM, las PPU y la PCU

La Figura 23 muestra la velocidad alcanzada en función del tiempo. Se observa como se mantiene ligeramente sobre el valor de velocidad de referencia. Esto es debido a que la fuerza en contra de la rueda es mucho menor que la que se encontraría el motor en Kénos. Aun así, el control se mantiene estable en un valor cercano a la referencia. En el momento de la frenada también sigue correctamente la referencia.

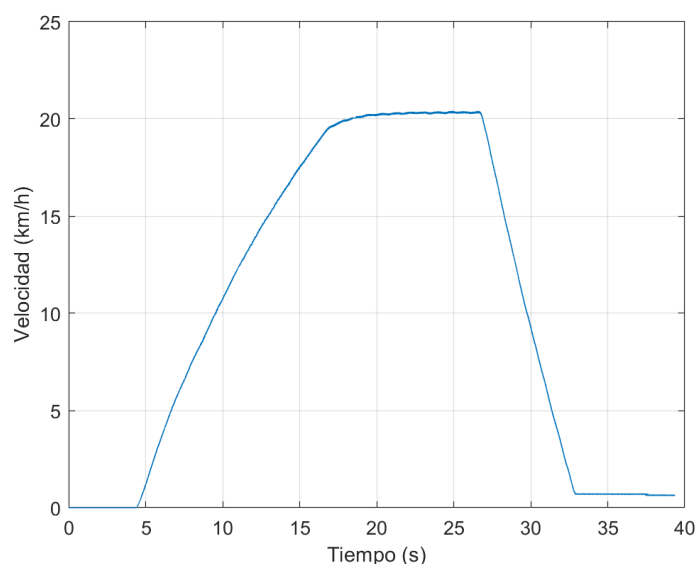


Figura 23: Velocidad de la rueda en función del tiempo

En la Figura 24 se puede observar como varía la frecuencia en función de la velocidad. Al arrancar no baja hasta la frecuencia óptima de 9 Hz por las limitaciones interpuestas, sino que arranca en 20 Hz y va aumentando en función de la velocidad. Para frenado la

frecuencia se mantiene constante en los -15 Hz, implicando que se ha invertido el orden de las ondas trifasicas de U-V-W a U-W-V.

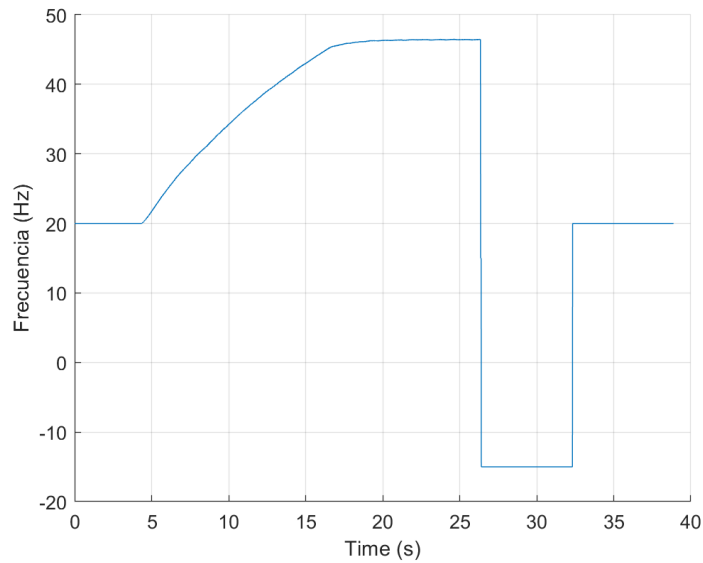


Figura 24: Frecuencia en la rueda en función del tiempo

El control de velocidad y corriente se puede observar en la Figura 25. En la gráfica se observa como la corriente pico satura correctamente en los 50 A de limitación establecidos por Hyperloop UPV. También se observa como se reduce la corriente una vez que se ha alcanzado la referencia. Finalmente en el instante 26 s se observa que se ha dado el orden de frenar ya que las corrientes pasan por un valor inferior a 5 A para volver a aumentar.

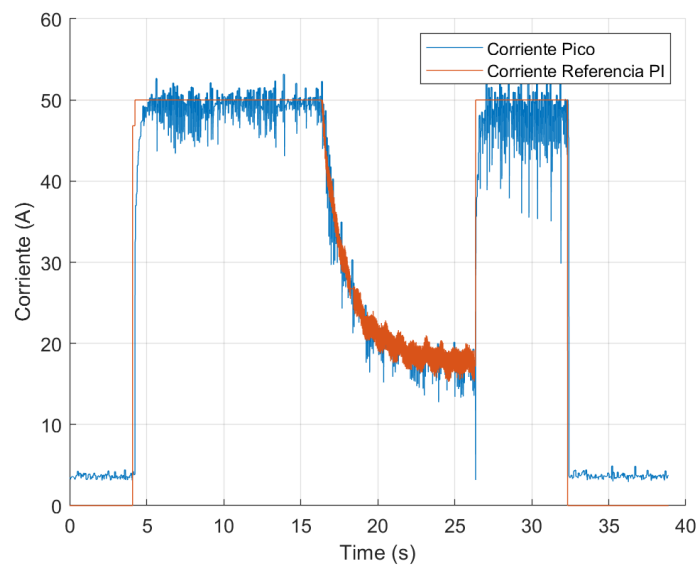


Figura 25: Corriente pico y referencia en función del tiempo

Para finalizar, las Figura 26 muestra las tres ondas de corrientes de los dos LIM y el cálculo del pico, que se mantiene en el valor máximo de la onda.

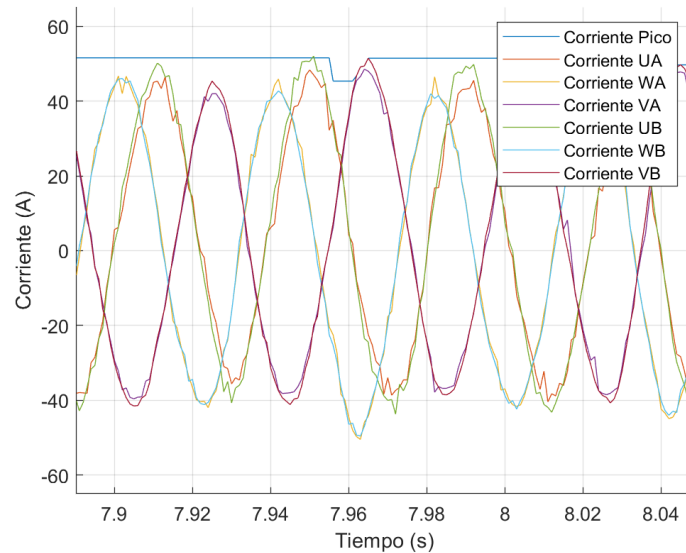


Figura 26: Corrientes y pico ampliados

3.3.2. Pruebas en pista

La última prueba de servicio se basa en realizar un desplazamiento de Kénos dentro de Atlas mientras esta levitando, conocido como la demostración de dinámica. Debido a las limitaciones de la distancia de Atlas, ya que solo se han montado 6 secciones, Hyperloop UPV ha decidido limitar la corriente a 30 A, con la frecuencia mínima de 20 Hz y manteniendo el voltaje de baterías en 75V. Además debe recorrer solamente 3 m y empezar a frenar, por lo que se establece una velocidad de referencia de 5 km/h.

La Figura 27 muestra a Kénos una vez ha empezado a moverse dentro de Atlas.

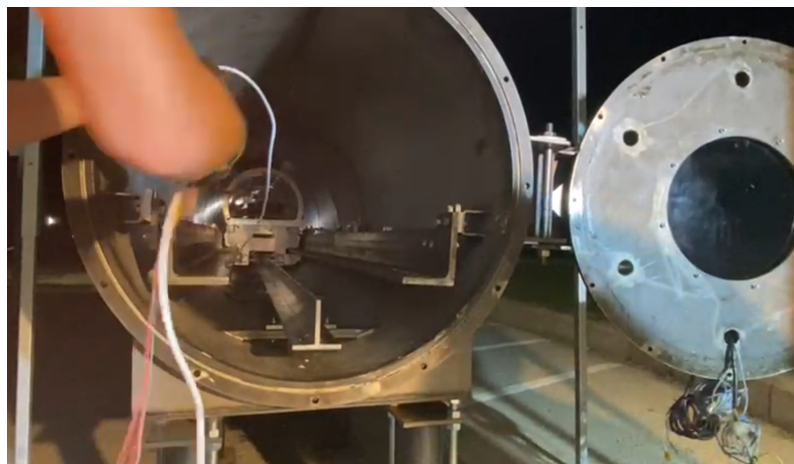


Figura 27: Dinámica de Kénos en Atlas

La gráfica de la Figura 28 permite observar la velocidad de referencia y la mecánica en función del tiempo transcurrido.

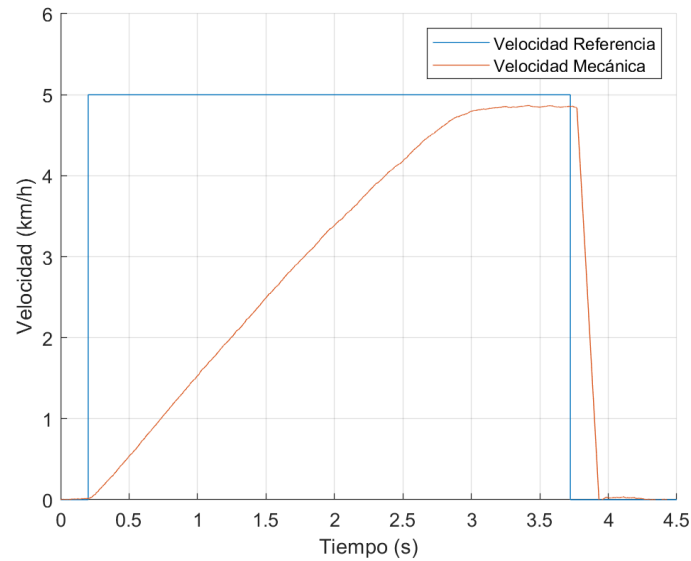


Figura 28: Velocidad en función del tiempo de la dinámica de Kénos en Atlas

Respecto a la posición, en la Figura 28 se puede observar que frena mucho más rápido de lo que acelera. Esto se debe a las fuerzas en contra de las unidades HEMS que se oponen al movimiento de aceleración, pero se suman cuando empieza a frenar.

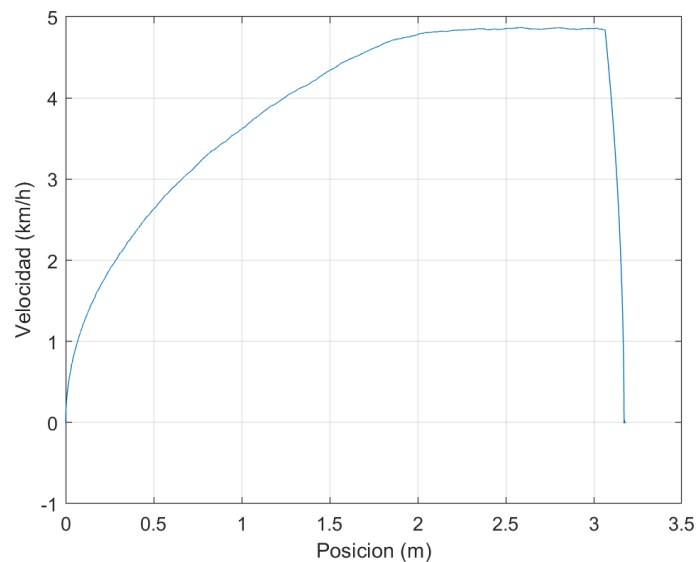


Figura 29: Velocidad en función de la posición de Kénos en Atlas

Las corrientes que atraviesan cada una de las fases del DLIM se pueden observar en la Figura 30. Se mantienen mucho más estables que en la prueba en la rueda. Esto es debido

a que la rueda tiene un grosor superior, implicando un cambio en la inductancia de las fases y por tanto modificando el comportamiento de la corriente.

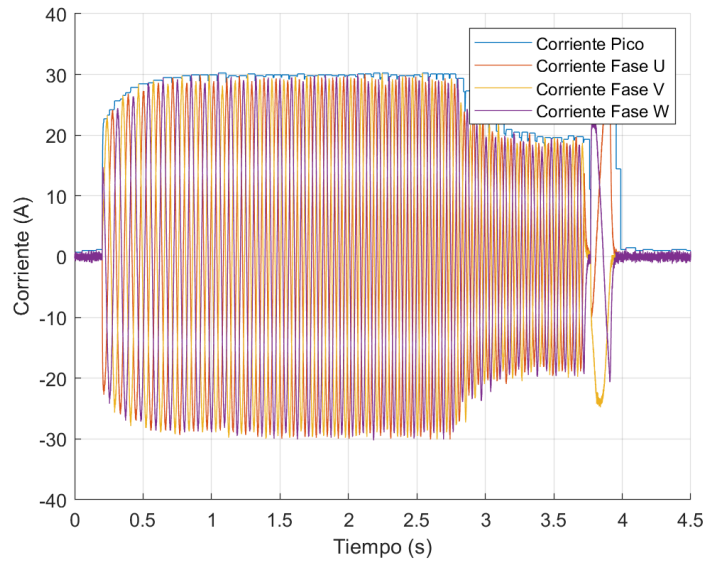


Figura 30: Corrientes de la dinámica de Kénos en Atlas

Con todas estas pruebas, se da por validado el sistema de control según las condiciones establecidas en el apartado 3.3.4 Pruebas y ajustes de servicio del Pliego de Condiciones.

VALENCIA, JULIO de 2023

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Anexo B: ODS

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

1.	¿Que són los ODS?	50
2.	¿Por qué se crearon los ODS?	50
3.	¿Cuáles son los ODS tenidos en cuenta en este proyecto?	50
3.1.	ODS 7: Energía asequible y no contaminante	50
3.2.	ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	51
3.3.	ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	51

TABLA DE FIGURAS

1. Objetivos de desarrollo sostenibles	50
--	----

1. ¿Que són los ODS?

Los ODS son los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus 169 metas expuestas por la organización de las naciones unidas, para cumplir con los objetivos de la agenda de desarrollo sostenible. El objetivo de los países es alcanzar las metas en 15 años. Estos objetivos son de carácter integrado e indivisible, buscan un alcance mundial y que sean de aplicación universal. Para conseguirlos es necesario la colaboración de todos, tanto de gobiernos, como de empresas privadas.



Figura 1: Objetivos de desarrollo sostenibles

2. ¿Por qué se crearon los ODS?

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo.

3. ¿Cuáles son los ODS tenidos en cuenta en este proyecto?

3.1. ODS 7: Energía asequible y no contaminante

Uno de los aspectos más importantes para conseguir este objetivo de desarrollo sostenible es reducir el consumo de energía, tal como se expone en la meta 7.3 que expresa la intención de duplicar la tasa de eficiencia energética. Este proyecto busca obtener la máxima eficiencia para el movimiento de Kénos, relacionándolo así con este ODS.



3.2. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

La innovación y el progreso tecnológico son claves para hacer frente a los desafíos económicos y medioambientales actuales. El desarrollo de la tecnología Hyperloop reúne los requisitos para estar incluido dentro de este ODS, buscando un nuevo medio de transporte de alta velocidad con bajo consumo y por tanto bajo coste medioambiental, además de la posibilidad de ser alimentado completamente por energías renovables. En concreto, la meta 9.1, que busca desarrollar infraestructuras fiables y sostenibles, guarda una gran relación con Hyperloop, y por tanto con este proyecto.

3.3. ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

Hyperloop cobra gran importancia para conseguir cumplir este ODS. Las ciudades son el centro neurálgico del crecimiento económico, pero también representan alrededor del 70 % de las emisiones de carbono mundiales y más del 60 % del uso de los recursos. Gran parte de las emisiones provienen por los medios de transporte, por eso la meta 11.2 busca proporcionar acceso a sistemas de transportes seguros, asequibles y sostenibles para todos. Este sistema de control ha sido diseñado y validado buscando la máxima eficiencia, fiabilidad y robustez, relacionándose así con esta meta y por tanto con este ODS.

VALENCIA, JULIO de 2023

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Anexo C: Planificación Temporal

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

1. Planificación temporal	52
-------------------------------------	----

TABLA DE FIGURAS

1.	Diagrama de Gantt del proyecto	52
----	--	----

TABLA DE TABLAS

1. Tabla de tareas	53
------------------------------	----

1. Planificación temporal

Para la realización de este proyecto se analizaron los distintos hitos a alcanzar, la fecha límite y sus implicaciones en las tareas a realizar, como se puede observar en la Figura 1.

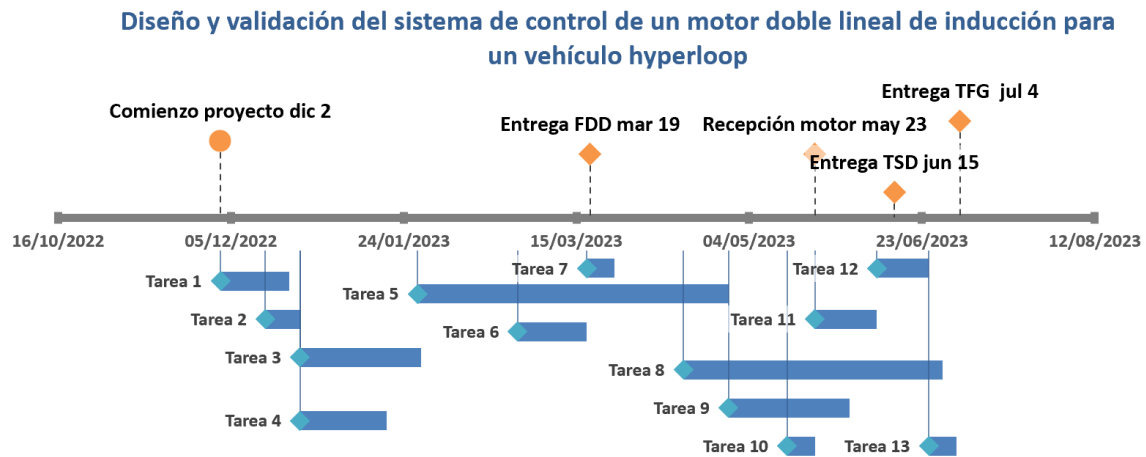


Figura 1: Diagrama de Gantt del proyecto

Los distintos hitos se analizaran en detalle en la siguiente lista:

- **Comienzo del proyecto 2/12/2022:** El inicio del proyecto coincide con mi entrada al equipo de Hyperloop UPV. Las tareas se centrarán en analizar el comportamiento de los motores lineales de inducción para poder obtener un modelo equivalente y de los distintos sistemas de control.
- **Entrega del Final Demonstration Document (FDD) 19/03/2023:** El FDD es el documento que Hyperloop UPV debe entregar a la EHW donde se explica en detalle todos los sistemas del vehículo a presentar y constituye una parte importante de la calificación final del equipo en la competición. Por este motivo, antes del cumplimiento de esta fecha se debe haber diseñado todo el sistema de control y validación.
- **Recepción del motor 23/05/2023:** Se recibirá el motor permitiendo empezar la etapa de pruebas en pista. Se deberá realizar y finalizar el TIL antes de esta fecha con el fin de poder empezar directamente las pruebas en la rueda con todos los sistemas de control validados.
- **Entrega Testing & Safety Document (TSD) 15/06/2023:** El TSD es el documento que Hyperloop UPV debe entregar a la EHW donde se explican todos los procedimientos de seguridad que se seguirán y se adjuntarán datos y vídeos de los sistemas funcionando con el fin de poder participar en la competición. Antes de esta fecha debe estar completamente validado el sistema de control tanto en la rueda como en pista.
- **Entrega trabajo final de grado (TFG) 4/07/2023:** Finalmente la entrega de este pro-

yecto se deberá realizar no más tarde del día 4 de julio incluyendo la presentación para su defensa.

Con todos los hitos, se dividió el trabajo en 13 tareas a realizar en función del espacio temporal y de los hitos a alcanzar. La lista completa de tareas se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1: Tabla de tareas

Tarea 1	Estudio de DLIM y sistemas de control
Tarea 2	Calculo obtención modelo equivalente
Tarea 3	Barrido para obtención modelo
Tarea 4	Diseño sistema control sobre modelo de motor rotativo
Tarea 5	Diseño sistema control sobre modelo obtenido
Tarea 6	Redacción del FDD
Tarea 7	Test de sensor de corriente y IMU
Tarea 8	Redacción del TFG
Tarea 9	TIL
Tarea 10	Modelado del inversor y obtención del SVPWM
Tarea 11	Pruebas en la rueda
Tarea 12	Pruebas en la pista
Tarea 13	Preparación presentación TFG

VALENCIA, JULIO de 2023

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Documento N°2: Planos

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

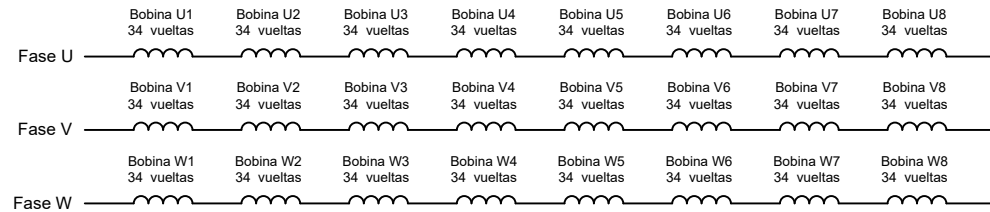
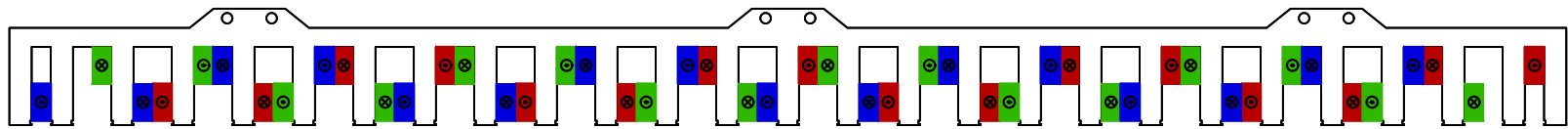
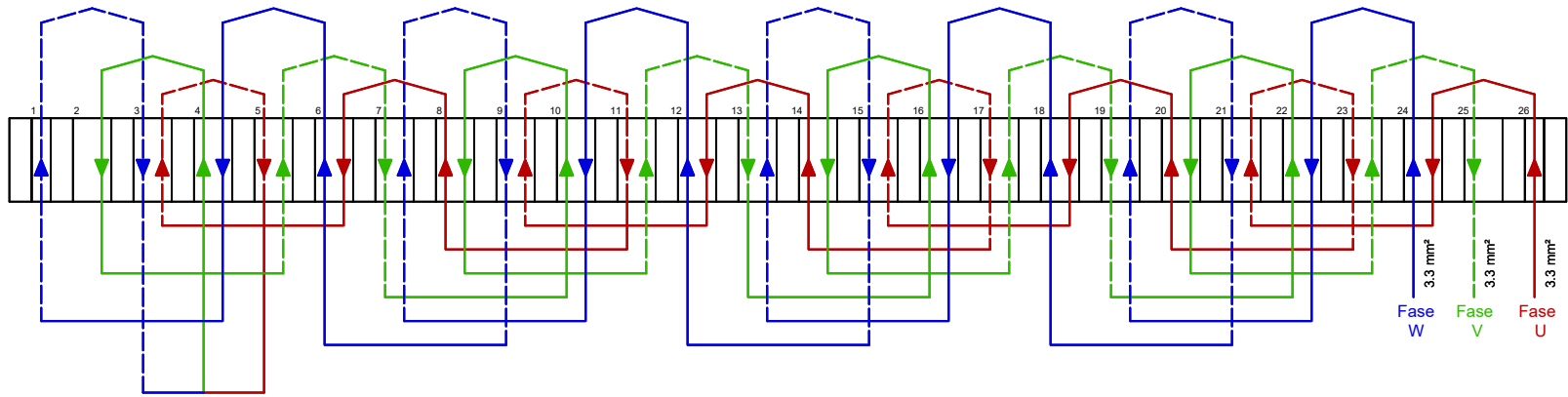
AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

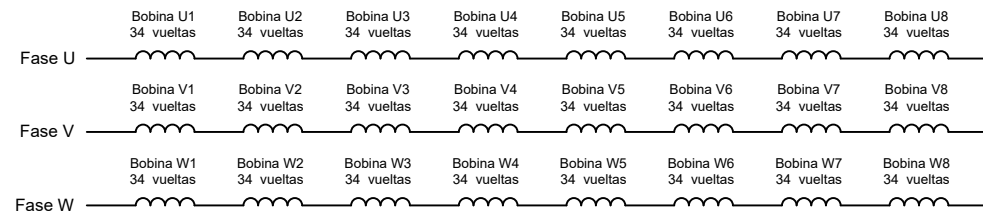
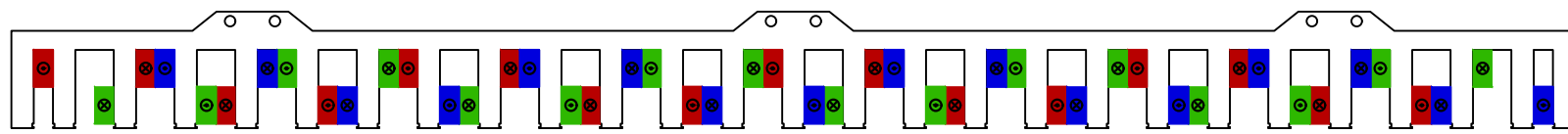
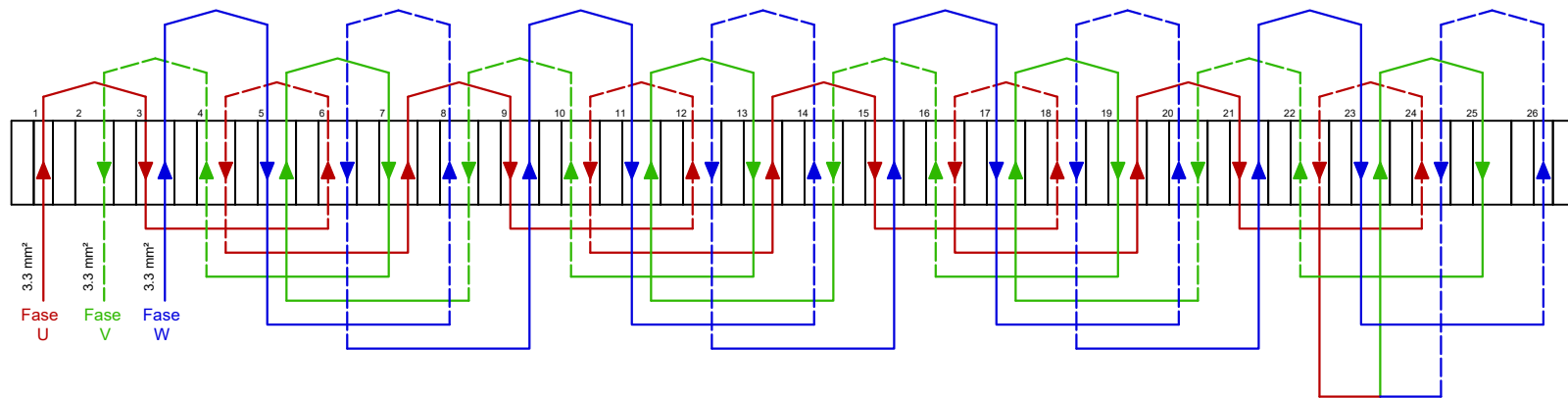
2.1.	Esquema del bobinado del LIM derecho	54
2.2.	Esquema del bobinado del LIM izquierdo	55
2.3.	Esquema del control	56
2.4.	Esquema del modelo del motor	57



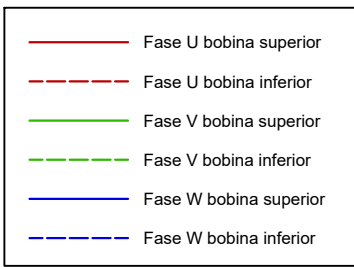
Leyenda

	Fase U bobina superior
	Fase U bobina inferior
	Fase V bobina superior
	Fase V bobina inferior
	Fase W bobina superior
	Fase W bobina inferior

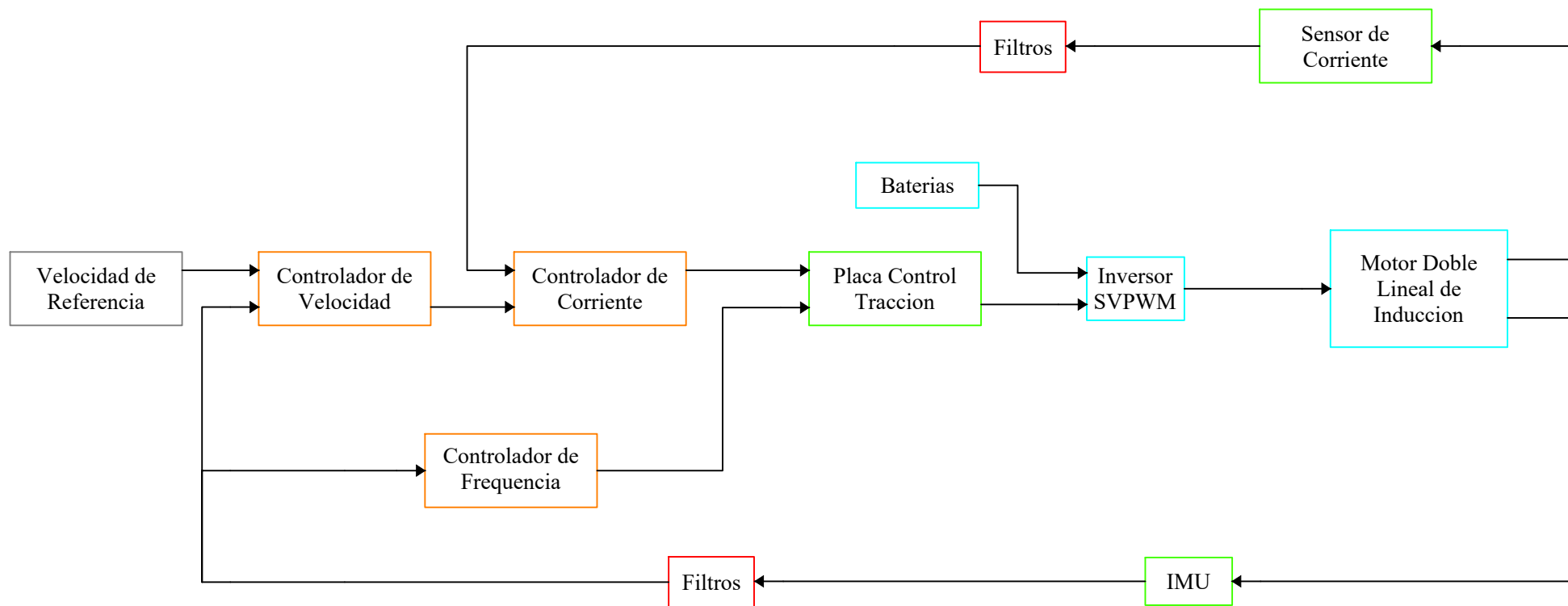
<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>	<p>Proyecto</p> <p>Diseño y validación del sistema de control de un motor doble lineal de inducción para un vehículo hyperloop</p>	<p>Autor:</p> <p>Miquel Sitges Nicolau</p>
	<p>Denominación del plano:</p> <p>Esquema del bobinado del LIM derecho</p>	<p>Nº de Plano:</p> <p>2.1</p>
<p>Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño</p>		<p>Escala:</p> <p>S/E</p>



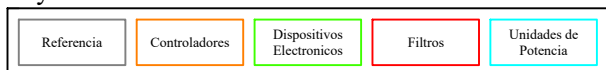
Leyenda





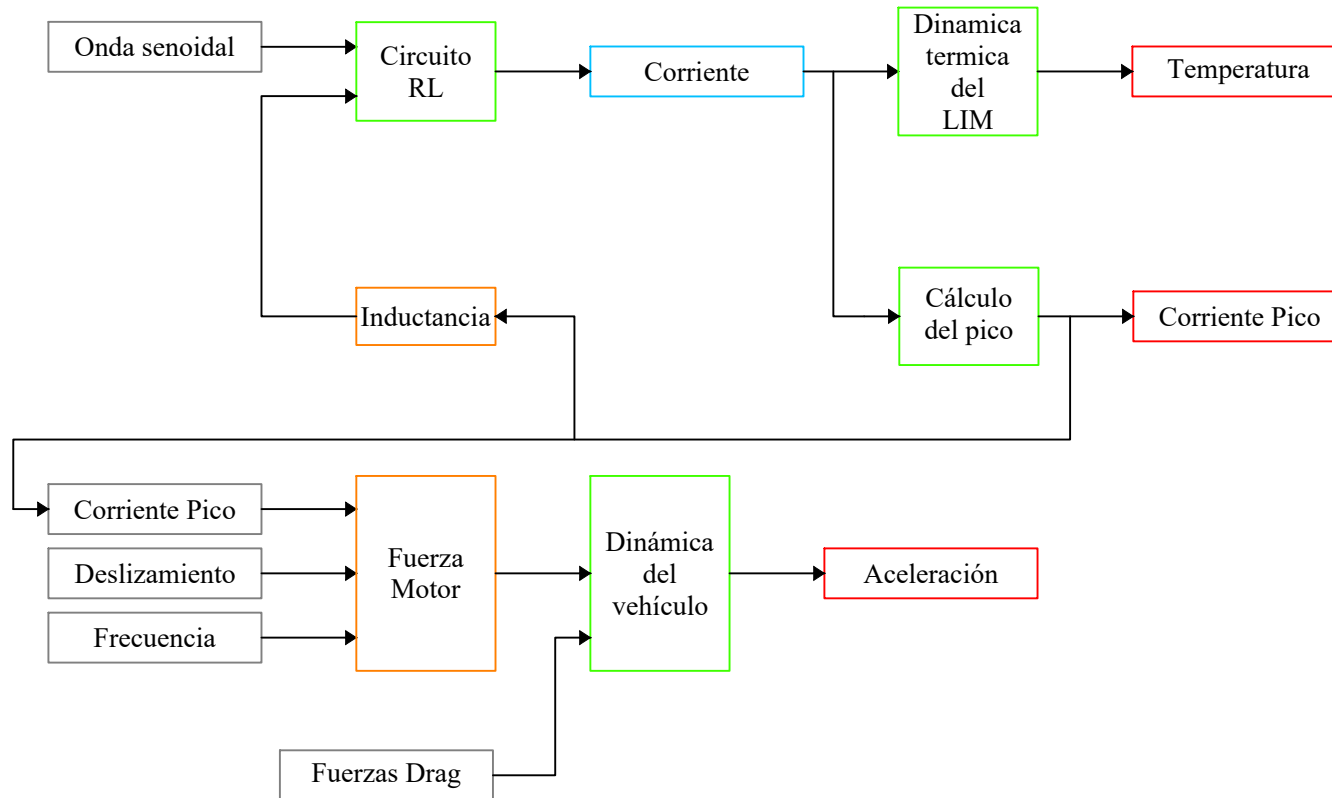
<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>	<p>Proyecto</p> <p>Diseño y validación del sistema de control de un motor doble lineal de inducción para un vehículo hyperloop</p>	<p>Autor:</p> <p>Miquel Sitges Nicolau</p>
	<p>Denominación del plano:</p> <p>Esquema del bobinado del LIM izquierdo</p>	<p>Nº de Plano:</p> <p>2.2</p>
<p>Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño</p>		<p>Escala:</p> <p>S/E</p>



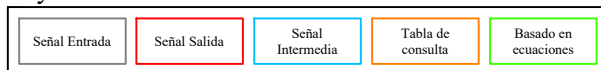
Leyenda





 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	Proyecto Diseño y validacion del sistema de control de un motor doble lineal de induccion para un vehiculo hyperloop	Autor: Miquel Sitges Nicolau
	Denominación del plano: Esquema del control	Nº de Plano: 2.3
 Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño		Escala: S/E



Leyenda



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	Proyecto Diseño y validacion del sistema de control de un motor doble lineal de induccion para un vehiculo hyperloop	Autor: Miquel Sitges Nicolau
	Denominación del plano: Esquema del modelo del motor	Nº de Plano: 2.4
 Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño		Escala: S/E

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Documento N°3: Pliego de Condiciones

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

3.1.	Condiciones generales	58
3.1.1.	Vigencia	58
3.1.2.	Descripción	58
3.1.3.	Modificaciones	58
3.2.	Condiciones facultativas	58
3.2.1.	Promotor	58
3.2.2.	Proyectista	58
3.2.3.	Plazos de entrega	58
3.3.	Condiciones técnicas	59
3.3.1.	Objeto	59
3.3.2.	Condiciones de los materiales	59
3.3.2.1.	Sensor de corriente	59
3.3.2.2.	Sensor de aceleración (IMU)	59
3.3.2.3.	PCU	59
3.3.2.4.	PPU	59
3.3.2.5.	Software Simulación Electromagnética	60
3.3.2.6.	Software Simulación Sistemas	60
3.3.2.7.	Equipo de trabajo de Alto Rendimiento	60
3.3.3.	Condiciones de ejecución	60
3.3.3.1.	Sensor de corriente	60
3.3.3.2.	Sensor de aceleración (IMU)	60
3.3.4.	Pruebas y ajustes de servicio	60

3.1. Condiciones generales

Este proyecto, una vez sellado y legalizado, tiene carácter de obligado cumplimiento. Cualquier modificación que se desee realizar debe ser objeto de aprobación previa.

3.1.1. Vigencia

Este Pliego de Condiciones estará en vigor durante toda la etapa de diseño y de validación. Ante posibles discrepancias en los documentos del proyecto, el orden de prioridad seguirá las recomendaciones de la norma 157001, siendo el orden de mayor a menor prioridad:

1. Planos
2. Pliego de condiciones
3. Presupuesto
4. Memoria

3.1.2. Descripción

Este proyecto regula el diseño y validación del sistema de control para un DLIM realizado para el prototipo Kénos para Hyperloop UPV.

3.1.3. Modificaciones

Durante la ejecución del proyecto se podrán realizar cuantas modificaciones se estimen oportunas siempre que las mismas estén aprobadas tanto por el promotor como por el proyectista.

3.2. Condiciones facultativas

Las condiciones facultativas de este pliego definen los distintos agentes que participan y las obligaciones y responsabilidades de cada uno.

3.2.1. Promotor

El promotor de este proyecto es el equipo directivo de Hyperloop UPV, que encarga el presente proyecto al proyectista estableciendo los plazos de entrega y los hitos a conseguir. El promotor proveerá de todos los componentes necesarios al proyectistas para poder realizar el proyecto.

3.2.2. Proyectista

El autor de este proyecto es Miquel Sitges Nicolau. Sobre él recae la responsabilidad de diseñar y validar el sistema de control según las condiciones establecidas por el promotor.

3.2.3. Plazos de entrega

El promotor establecerá los distintos plazos de entrega, definiendo la necesidad de cumplir con los hitos marcados en el Anexo C: Planificación Temporal.

3.3. Condiciones técnicas

En este apartado se expondrán todas las condiciones técnicas necesarias para los materiales usados para realizar el control y la validación.

3.3.1. Objeto

Esta especificación se refiere a todos los componentes utilizados para el control, incluyendo los sensores de corriente, la IMU y la PCU. Queda excluido el sensor de temperatura presente en cada una de las fases del motor debido a su no utilización en el ámbito del control.

3.3.2. Condiciones de los materiales

Todos los materiales usados para el sistema de control deberán ser proporcionados por el promotor del proyecto.

3.3.2.1 Sensor de corriente

El sensor de corriente deberá ser capaz de procesar corrientes de al menos 100 A en ambos sentidos. Además, deberá tener un rango de salida entre 0 V y 5 V. El sensor deberá ser capaz de ejecutar lecturas de la corriente al menos a 5 kHz. Por último el sensor deberá tener el Marcado CE que asegure que reúne todos los requisitos para que se pueda vender, comercializar y utilizar en el mercado europeo.

3.3.2.2 Sensor de aceleración (IMU)

La IMU deberá ser capaz de leer al menos aceleraciones y desaceleraciones de 2 g a una frecuencia de 1 kHz. Además, deberá ser de montaje superficial, menor de 1cm y con posibilidad de conectarse a la PCU mediante SPI. También deberá tener el Marcado CE, que asegure que reúne todos los requisitos para que se pueda vender, comercializar y utilizar en el mercado europeo.

3.3.2.3 PCU

La PCU debe ser capaz de ejecutar los dos bucles de control a la frecuencia necesaria, siendo esta 5kHz para el bucle interno de corriente y 1 kHz para el bucle externo de velocidad. Además, debe poder realizar los cálculos de los ciclos de trabajo de cada una de las ramas de transistores MOSFET para conseguir la frecuencia y el voltaje para cada una de las fases a una frecuencia.

3.3.2.4 PPU

La PPU debe ser capaz de interpretar los ciclos de trabajos recibidos desde la PCU y conmutar los transistores para conseguir la onda de voltaje deseada. Además, debe ser capaz de soportar los 220 V de las baterías y los 100 A que consumirá el motor.

3.3.2.5 Software Simulación Electromagnética

Será necesario una licencia de un programa de simulaciones electromagnéticas que permita realizar el barrido necesario para caracterizar los LIM. El software deberá obtener la relación entre voltajes, corrientes y frecuencia, los valores de inductancia y resistencia de cada una de las fases y la relación entre fuerza y corriente. Por ese motivo será necesario disponer de una licencia de JMAG Designer o equivalente.

3.3.2.6 Software Simulación Sistemas

Para el diseño y la validación del sistema de control será necesario licencias de simulación de sistemas y software para el procesado de datos. Además, deberá poder ejecutar simulaciones en tiempo real. Para cumplir estos requisitos serán necesarias las licencias de Matlab, Simulink, Simscape y Simulink Real-Time o equivalente.

3.3.2.7 Equipo de trabajo de Alto Rendimiento

Será necesario un equipo de trabajo de alto rendimiento capaz de mantenerse encendida las 24 horas del día con un rendimiento superior al equivalente al de un procesador AMD Ryzen 9 7950X, 32 GB de memoria RAM y 1 TB de disco de estado solido.

3.3.3. Condiciones de ejecución

Se deberá llevar a cabo un análisis de todos los sensores involucrados en el sistema de control para modelar su comportamiento e introducirlos en las simulaciones.

3.3.3.1 Sensor de corriente

Se deberán probar cada uno de los sensores de corriente haciendo pasar 5 valores de corriente distintas. Se analizará el ruido y el error de offset de cada uno de los sensores y se introducirá la compensación por firmware a las placas.

3.3.3.2 Sensor de aceleración (IMU)

Se realizará una prueba en estático analizando la influencia de la gravedad y el ruido de la señal. También se deberá realizar una prueba colocando la IMU sobre una impresora 3D, moviéndola únicamente en un eje a una velocidad conocida para estimar errores de no linealidad.

3.3.4. Pruebas y ajustes de servicio

Se realizarán dos pruebas de servicio del sistema de control para validar su correcto funcionamiento.

La primera prueba consistirá en montar el DLIM en una rueda de 2 m de diámetro y activar el control. Debido a la imposibilidad de montar la IMU en la rueda, se utilizarán los datos derivados de un encoder que se transformaran en velocidad. Los valores máximos de corriente, voltaje de baterías y velocidad a alcanzar los definirá el promotor en el momento



de la ejecución de la prueba, debiendo ser inferiores a los máximos establecidos de 100 A, 220 V y 35 km/h. La primera prueba se dará por superada si es capaz de completarla sin sobre oscilaciones en la velocidad ni en la corriente, si no supera los valores límite establecidos de corriente y es capaz de frenar completamente la rueda.

La segunda prueba se realizará dentro de la infraestructura Atlas, en condiciones de levitación. El promotor volverá a definir los valores máximos de corriente, voltaje de baterías y velocidad, pudiendo ser diferentes a los de la primera prueba, aunque nunca superiores a los máximos establecidos. Si Kénos es capaz de moverse siguiendo la referencia sin superar los valores máximos definidos de corriente, se dará por validado la prueba de servicio y por tanto el sistema de control.

VALENCIA, JULIO de 2023

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO

DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE UN MOTOR DOBLE LINEAL DE INDUCCIÓN PARA UN VEHÍCULO HYPERLOOP

Documento N°4: Presupuesto

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Miquel Sitges Nicolau

TUTOR: Vicente Adán Roca

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

TABLA DE CONTENIDOS

4.1.	Precios Unitarios	62
4.2.	Precios Descompuestos	65
4.3.	Mediciones	68
4.4.	Precios de Ejecucion Material	70
4.5.	Resumen del presupuesto	73

Cuadro de mano de obra

Cuadro de mano de obra

Página 63

Num. Código	Denominación de la mano de obra	Precio	Horas	Total
1 mol	Ingeniero graduado en Ingeniería Electronica Industrial y Automatica	15,000	320,000 h	4.800,00
		Total mano de obra:		4.800,00

Cuadro de maquinaria

Num. Código	Denominación de la maquinaria	Precio	Cantidad	Total
1 m7	Alquiler por horas de la rueda de metal de 2 m de diametro	25,000	30,000 h	750,00
2 m6	Licencia Simscape con una utilización estimada anual de 200h y con un precio de licencia de 860€/año	4,300	30,000 h	129,00
3 m4	Licencia Simulink con una utilización estimada anual de 500h y con un precio de licencia de 1300€/año	2,600	159,000 h	413,40
4 m8	Licencia JMAG con una utilización estimada anual de 2000h y con un precio de licencia de 4000€/año	2,000	840,000 h	1.680,00
5 m3	Licencia Matlab con una utilización estimada anual de 800h y con un precio de licencia de 860€/año	1,075	45,000 h	48,38
6 m5	Licencia Simulink Desktop Real-Time 860€/año	1,000	36,000 h	36,00
7 m2	Equipo Informatico WorkStation de Alto Rendimineto con potencia para realizar simulaciones exhaustivas en JMAG y Simscape pudiendo funcionar 24h al día	0,400	870,000 h	348,00
8 m1	Equipo Informatico con potencia suficiente para ejecutar simulaciones cortas de simulink, redactar documentos y realizar analisis de datos en Matlab	0,200	265,000 h	53,00
			Total maquinaria:	3.457,78

Anejo de justificación de precios

Nº	Código	Ud	Descripción		Total
1 Diseño sistema control					
1.1	PD1	ud	Diseño del sistema de control		
	mo1	250,000 h	Ingeniero Electronico Industrial y Automatica	15,000	3.750,00
	m1	210,000 h	Equipo Informatico	0,200	42,00
	m2	870,000 h	Equipo Informatico WorkStation de Alto Rendimineto	0,400	348,00
	m3	30,000 h	Licencia Matlab	1,075	32,25
	m4	150,000 h	Licencia Simulink	2,600	390,00
	m6	30,000 h	Licencia Simscape	4,300	129,00
	m8	840,000 h	Licencia JMAG	2,000	1.680,00
	%	2,000 %	Costes directos	6.371,250	127,43
Precio total por ud					6.498,68

Anejo de justificación de precios

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
2 Validación del sistema de control				
2.1	PD2	ud	Pruebas Testing in the loop	
	mo1	25,000 h	Ingeniero Electronico Industrial y Automatica	375,00
	m1	40,000 h	Equipo Informatico	8,00
	m5	36,000 h	Licencia Simulink Desktop Real-Time	36,00
	m3	5,000 h	Licencia Matlab	5,38
	m4	4,000 h	Licencia Simulink	10,40
	%	2,000 %	Costes directos	8,70
Precio total por ud				443,48
2.2	PD3	ud	Pruebas en pista	
	mo1	45,000 h	Ingeniero Electronico Industrial y Automatica	675,00
	m1	15,000 h	Equipo Informatico	3,00
	m7	30,000 h	Alquiler por horas de la rueda de metal de 2 m de diametro	750,00
	m4	5,000 h	Licencia Simulink	13,00
	m3	10,000 h	Licencia Matlab	10,75
	%	2,000 %	Costes directos	29,04
Precio total por ud				1.480,79

Cuadro de precios nº 2

Advertencia: Los precios del presente cuadro se aplicarán única y exclusivamente en los casos que sea preciso abonar obras incompletas cuando por rescisión u otra causa no lleguen a terminarse las contratadas, sin que pueda pretenderse la valoración de cada unidad de obra fraccionada en otra forma que la establecida en dicho cuadro.

Nº	Designación	Importe	
		Parcial (Euros)	Total (Euros)
1.1	1 Diseño sistema control ud Diseño del sistema de control (Mano de obra) Ingeniero Electronico Industrial y Automa... 250,000 h 15,000 3.750,00 (Maquinaria) Equipo Informatico 210,000 h 0,200 42,00 Equipo Informatico WorkStation de Alto Re... 870,000 h 0,400 348,00 Licencia Matlab 30,000 h 1,075 32,25 Licencia Simulink 150,000 h 2,600 390,00 Licencia Simscape 30,000 h 4,300 129,00 Licencia JMAG 840,000 h 2,000 1.680,00 (Resto obra) 127,43		
2.1	2 Validación del sistema de control ud Pruebas Testing in the loop (Mano de obra) Ingeniero Electronico Industrial y Automa... 25,000 h 15,000 375,00 (Maquinaria) Equipo Informatico 40,000 h 0,200 8,00 Licencia Matlab 5,000 h 1,075 5,38 Licencia Simulink 4,000 h 2,600 10,40 Licencia Simulink Desktop Real-Time 36,000 h 1,000 36,00 (Resto obra) 8,70		6.498,68
2.2	ud Pruebas en pista (Mano de obra) Ingeniero Electronico Industrial y Automa... 45,000 h 15,000 675,00 (Maquinaria) Equipo Informatico 15,000 h 0,200 3,00 Licencia Matlab 10,000 h 1,075 10,75 Licencia Simulink 5,000 h 2,600 13,00 Alquiler por horas de la rueda de metal d... 30,000 h 25,000 750,00 (Resto obra) 29,04		443,48
	VALENCIA, JULIO de 2023 Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática Miquel Sitges Nicolau		1.480,79

Presupuesto parcial nº 1 Diseño sistema control

Nº	Ud	Descripción	Medición
1.1	Ud	Diseño del sistema de control	
			Total ud: 1,000

Presupuesto parcial nº 2 Validación del sistema de control

Nº	Ud	Descripción	Medición
2.1	Ud	Pruebas Testing in the loop	
			Total ud: 1,000
2.2	Ud	Pruebas en pista	
			Total ud: 1,000

Valencia, 30/05/2023
Ingeniería Electronica Industrial y Automatica

Miquel Sitges Nicolau

Presupuesto y medición

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
1.1 PD1	ud	Diseño del sistema de control			
		Total ud	1,000	6.498,68	6.498,68

Código	Ud	Denominación	Medición	Precio	Total
2.1 PD2	ud	Pruebas Testing in the loop			
		Total ud	1,000	443,48	443,48
2.2 PD3	ud	Pruebas en pista			
		Total ud	1,000	1.480,79	1.480,79

Presupuesto de ejecución material

1. Diseño sistema control	6.498,68
2. Validación del sistema de control	1.924,27
Total:	<hr/> 8.422,95

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de OCHO MIL CUATROCIENTOS VEINTIDOS EUROS CON NOVENTA Y CINCO CÉNTIMOS.

VALENCIA, JULIO de 2023
Grado en Ingeniería Electrónica
Industrial y Automática

Miquel Sitges Nicolau

Resumen de presupuesto

Proyecto: Diseño y validación del sistema de control de un motor doble lineal de inducción para un vehículo hyperloop

Capítulo	Importe	%
Capítulo 1 Diseño sistema control.....	6.498,68	77,15
Capítulo 2 Validación del sistema de control.....	1.924,27	22,85
Presupuesto de ejecución material	8.422,95	
13% de gastos generales.....	1.094,98	
6% de beneficio industrial.....	505,38	
Suma	10.023,31	
21%	2.104,90	
Presupuesto de ejecución por contrata	12.128,21	
 Honorarios de Ingeniero		
Proyecto	5,00% sobre PEM	421,15
	21% sobre honorarios de Proyecto	88,44
	Total honorarios de Proyecto	509,59
Dirección de obra	5,00% sobre PEM	421,15
	21% sobre honorarios de Dirección de obra	88,44
	Total honorarios de Dirección de obra	509,59
	Total honorarios de Ingeniero	1.019,18
	Total honorarios	1.019,18
	Total presupuesto general	13.147,39

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de TRECE MIL CIENTO CUARENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS.

VALENCIA, JULIO de 2023
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática

Miquel Sitges Nicolau