

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA  
DE PROPULSIÓN DE UN VEHÍCULO  
ELÉCTRICO LIGERO

**Curso:** 2021/2022

**Modalidad TFG:** Trabajo Técnico

**Alumno/a:**

Pablo Arias Moreno

**Director/es:**

José Luis Torres Moreno





---

**UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA**



**Grado en Ingeniería Mecánica**  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

---

**Caracterización del sistema de propulsión de un  
vehículo eléctrico ligero**

**Alumno**  
Pablo Arias Moreno

**Tutor**  
José Luis Torres Moreno

*Almería, octubre de 2021*



# **Agradecimientos**

A mis padres, Ángel y Reme



## Resumen

Los vehículos eléctricos tienen cada vez un mayor impacto en nuestra sociedad. La reducción de los gases de efecto invernadero se ha convertido en un objetivo prioritario para asegurar un desarrollo sostenible y mejorar la calidad del aire en las ciudades. Puesto que en estos entornos no se necesitan grandes autonomías ni potencias elevadas, los vehículos eléctricos ligeros tienen un gran potencial para sustituir al parque automovilístico actual.

Por todo ello, este trabajo se enfoca en el modelado y la caracterización de un motor eléctrico de corriente continua, así como en los principales parámetros que rigen su control. Para lograrlo, se realizarán una serie de ensayos en un banco de pruebas y se procesarán los datos generados con el objetivo final de obtener un modelo que permita desarrollar técnicas de control para la optimización energética.

La principal aportación de este proyecto consiste en ofrecer un modelado de caja negra capaz de predecir los consumos energéticos de un vehículo eléctrico, además de proporcionar una metodología para la obtención de las funciones de transferencia que definen el comportamiento de un sistema partiendo de unos datos de ensayo.

**Palabras clave:** Motor CC, Modelado de sistemas, Automatización

## Abstract

Electric vehicles are having an increasing impact on our society. The reduction of greenhouse gases has become a priority objective to ensure sustainable development and improve air quality in cities. Since these environments do not require long autonomies or high power, light electric vehicles have a great potential to replace the current vehicle fleet.

Therefore, this work focuses on the modeling and characterization of a DC electric motor, as well as on the main parameters that govern its control. To achieve this, a series of tests will be carried out on a test bench and the data generated will be processed with the final objective of obtaining a model that will allow the development of control techniques for energy optimization.

The main contribution of this project consists of offering a black box model capable of predicting the energy consumption of an electric vehicle, as well as providing a methodology for obtaining the transfer functions that define the behavior of a system based on test data.

**Keywords:** DC Motor, System modeling, Automation





# Índice General

	<b>Página</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Índice General</b> .....	<b>III</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>V</b>
<b>Glosario de Términos</b> .....	<b>VII</b>
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>3</b>
1.1 Motivación para el desarrollo del TFG .....	3
1.2 Objetivos del trabajo .....	4
1.3 Contexto y antecedentes .....	4
1.4 Resumen de resultados .....	6
1.5 Cronología .....	9
1.6 Estructura de la memoria.....	10
1.7 Competencias utilizadas en el TFG.....	11
<b>2. Revisión bibliográfica</b> .....	<b>13</b>
2.1 Banco de ensayos .....	13
2.2 Controlador .....	13
2.3 Simulink .....	13
<b>3. Puesta en marcha del banco de ensayos</b> .....	<b>15</b>
3.1 Interfaz de control.....	15
3.2 Banco de ensayos.....	19
<b>4. Realización de ensayos y caracterización del banco</b> .....	<b>29</b>
4.1 Configuración de los sensores en LabView .....	29
4.2 Diseño de la interfaz de adquisición de datos en LabView .....	30
4.3 Aplicación del método.....	32
4.4 Tratamiento de datos.....	33
4.5 Identification Toolbox de Matlab.....	39
4.6 Paso del sistema a Simscape Multibody .....	57
4.7 Modelado del motor eléctrico .....	60
<b>5. Resultados y conclusiones</b> .....	<b>67</b>
5.1 Resultados .....	67
5.2 Conclusiones.....	73
5.3 Trabajos futuros .....	74

<b>Bibliografía</b> .....	<b>75</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>77</b>
ANEXO I. PLANOS .....	79
ANEXO II. Scripts desarrollados.....	87

# Índice de figuras

Figura 1.1. Estado inicial del banco. ....	3
Figura 1.2. Vehículo eléctrico eCARM. ....	5
Figura 1.3. Flujo de recursos heterogéneos entre los diferentes elementos del distrito agroindustrial. ....	5
Figura 1.4. Resultados obtenidos en los ensayos.....	6
Figura 1.5. Panel del modelado SIMO del banco de ensayos. ....	7
Figura 1.6. Funciones de transferencia para el ensayo con todos los discos.....	7
Figura 1.7. Comparación de los valores de par e intensidad del motor simulados. ....	8
Figura 1.8. Cronograma de actividades.....	10
Figura 3.1. Tarjeta Phidget 1065. ....	15
Figura 3.2. Motor eléctrico Pololu.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 3.3. Sensor de voltaje Phidget.....	16
Figura 3.4. Conexiones NI USB-6210. ....	16
Figura 3.5. Montaje completo del motor Pololu.....	17
Figura 3.6. Panel de control de Phidget. ....	17
Figura 3.7. Diagrama de bloques para la adquisición de datos. ....	18
Figura 3.8. Panel de la interfaz de adquisición de datos.....	18
Figura 3.9. Evolución del voltaje del motor. ....	19
Figura 3.10. Encoder YUMO E6B2-CWZ3E. ....	20
Figura 3.11. Elementos diseñados inicialmente para el encoder. ....	20
Figura 3.12. Sistema de transmisión completo.....	21
Figura 3.13. Impresora WitBox 2.....	22
Figura 3.14. Primer ensamblaje de la polea.....	22
Figura 3.15. Poleas dentadas impresas. ....	23
Figura 3.16. Soporte del encoder.....	23
Figura 3.17. Grúa plegable. ....	24
Figura 3.18. Montaje del encoder. ....	24
Figura 3.19. Estado inicial de la tarjeta DAQ.....	25
Figura 3.20. Montaje de sensores de intensidad. ....	25
Figura 3.21. Cableado de la tarjeta DAQ. ....	26
Figura 3.22. Conexiones NI USB-6210.....	27
Figura 4.1. Configuración del bloque Read From Measurement File. ....	30

Figura 4.2. Diagrama de bloques de la interfaz de adquisición de datos en LabView. ....	31
Figura 4.3. Configuración del bloque Write to Measurement File. ....	32
Figura 4.4. Evolución de la inercia del banco. ....	33
Figura 4.5. Filtrado de la intensidad mediante loess. ....	34
Figura 4.6. Valores de aceleración empleados en los ensayos. ....	36
Figura 4.7. Ensayos realizados en el banco. ....	38
Figura 4.8. Panel principal de la System Identification Toolbox de Matlab. ....	39
Figura 4.9. Pestaña para la importación de datos en el dominio del tiempo. ....	40
Figura 4.10. Configuración de la primera pestaña de la función de transferencia. ....	40
Figura 4.11. Configuración de la segunda pestaña de la función de transferencia. ....	41
Figura 4.12. Estimaciones de los distintos parámetros del motor. ....	44
Figura 4.13. Configuración de la función de transferencia del par. ....	46
Figura 4.14. Funciones de transferencia para el ensayo sin discos. ....	46
Figura 4.15. Panel del modelado SIMO del banco de ensayos. ....	47
Figura 4.16. Configuración del generador de pulsos. ....	48
Figura 4.17. Valores de par para el ensayo sin discos proporcionados por el modelo. ....	49
Figura 4.18. Valores de intensidad del motor para el ensayo con todos los discos proporcionados por el modelo. ....	49
Figura 4.19. Comparación entre los valores obtenidos en Matlab y en Simulink. ....	50
Figura 4.20. Comparación entre ensayo y modelo para una aceleración del 20 por ciento. ....	53
Figura 4.21. Comparación entre ensayo y modelo para una aceleración del 10 por ciento. ....	56
Figura 4.22. Estructura de ampliación del banco de ensayos. ....	57
Figura 4.23. Reductora simplificada. ....	57
Figura 4.24. Programación en Simscape Multibody. ....	59
Figura 4.25. Simulación del programa en Simscape Multibody. ....	60
Figura 4.26. Circuito equivalente de un motor eléctrico DC. ....	61
Figura 4.27. Representación mediante ecuaciones diferenciales en Simulink. ....	63
Figura 4.28. Funciones de transferencia en Simulink. ....	64
Figura 4.29. Valores obtenidos por el modelo en Simulink. ....	65
Figura 5.1. Modelado del sistema con los discos de inercia instalados. ....	67
Figura 5.2. Instalación del encoder. ....	68
Figura 5.3. Valores de aceleración. ....	68
Figura 5.4. Resultados del modelo. ....	71

# Glosario de Términos

Símbolo	Descripción	Unidades (SI)
<b>B</b>	Coeficiente de fricción del motor y de la carga	Adimensional
<b>d</b>	Diámetro	[mm]
<b>E<sub>a</sub></b>	Fuerza electromotriz	[V]
<b>I</b>	Corriente	[A]
<b>J</b>	Inercia del motor y de la carga	[kg·m <sup>2</sup> ]
<b>L</b>	Inductancia	[H]
<b>m</b>	Módulo	[mm]
<b>p</b>	Paso	[mm]
<b>R</b>	Resistencia del motor	[Ω]
<b>T<sub>m</sub></b>	Torque	[N·m]
<b>V</b>	Tensión de la armadura	[V]
<b>Z</b>	Número de dientes de la polea dentada	Dientes
<b>ω</b>	Velocidad angular	[rad/s]



# Lista de Acrónimos

ARM	Grupo de Investigación TEP-197 <i>Automática, Robótica y Mecatrónica</i>
CAD	Diseño Asistido por Ordenador (del inglés <i>Computer Aided Design</i> )
CIESOL	Centro de Investigación de Energía Solar
DAQ	Adquisición de Datos (del inglés <i>Data Acquisition</i> )
DC	Corriente continua (del inglés <i>Direct Current</i> )
eCARM	Vehículo eléctrico de la Universidad de Almería
LVM	Mediciones de LabView (del inglés <i>LabView Measurement</i> )
NI	National Instruments
TFG	Trabajo Fin de Grado
UAL	Universidad de Almería
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIMO	Una entrada y multiples salidas (del inglés <i>Single Input, Multiple Output</i> )
STL	Archivo que define la geometría de objetos 3D (del inglés <i>STereoLithography</i> )
TXT	Archivo de texto sin formato





# **Caracterización del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico ligero**



# 1. Introducción

## 1.1 Motivación para el desarrollo del TFG

El sector del transporte ha experimentado en los últimos años un aumento en su demanda, convirtiéndose en uno de los sectores con mayor consumo de energía. Este hecho, sumado a las restricciones en las emisiones que cada vez se imponen en más países, ha provocado que la industria se centre en el desarrollo de vehículos más seguros y respetuosos con el medio ambiente, como los vehículos eléctricos.

En las ciudades, los vehículos no necesitan grandes potencias ni autonomías, por lo que los vehículos eléctricos ligeros tienen un gran potencial de desarrollo frente a los motores de combustión. Parte de esta eficiencia se debe al controlador que incorpora el vehículo. Pero, para que el controlador trabaje de forma adecuada, primero necesita conocer los parámetros característicos del motor eléctrico que se va a controlar. Gracias a esto, se puede conocer su dinámica y el consumo de energía ante una determinada situación.

Por ello, en este trabajo se pretende profundizar en el funcionamiento y modelado de este tipo de vehículos, así como en los principales parámetros que rigen su control. Para ello, se hará uso del banco de ensayos realizado por Francisco Acuña [1], junto con el volante de inercia diseñado por Martos Guzmán [2], gracias al cual se pueden simular las condiciones reales de desplazamiento de un vehículo eléctrico. El resultado de dichos trabajos previos puede verse en la Figura 1.1.

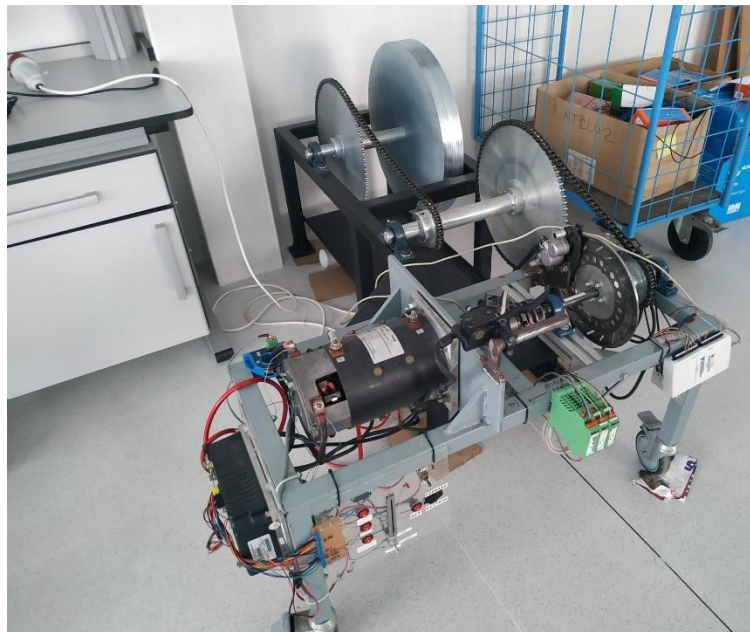


Figura 1.1. Estado inicial del banco.

## 1.2 Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este proyecto es realizar el modelado y simulación del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico para la caracterización de su motor. Para lograrlo, se hará uso del entorno de la herramienta Simscape Multibody, que proporciona un entorno de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos 3D, que, junto con las mediciones que se llevarán a cabo en el banco de ensayos, permitirá identificar los parámetros característicos de los modelos realizados para que puedan ser validados.

Para lograrlo, ha sido necesario completar los siguientes subobjetivos:

### Objetivos específicos

- Diseñar e imprimir un sistema de transmisión para colocar un nuevo encoder que mida la velocidad angular en el eje de salida.
- Realizar un reacondicionamiento del banco. Instalar los sensores faltantes, llevar a cabo el cableado de los equipos y comprobar el correcto funcionamiento de estos.
- Modificar el sistema de adquisición de datos actual para incluir un control automático y actualizarlo a las nuevas condiciones de trabajo.
- Llevar a cabo ensayos experimentales en el banco.
- Procesar los datos. Reducir el ruido, hacerlos legibles e interpretarlos.
- Obtener las funciones de transferencia que definen el comportamiento del sistema.

## 1.3 Contexto y antecedentes

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) supone para su autor la culminación de sus estudios en el Grado en Ingeniería Mecánica (Plan 2010) en la Universidad de Almería (UAL), siendo cursado en el período comprendido entre 2017 y 2021. Éste fue ofrecido por el Grupo de Investigación TEP-197 Automática, Robótica y Mecatrónica (ARM).

Este trabajo es la continuación lógica del TFG en Ingeniería Mecánica “Diseño y construcción de un banco de ensayo para la caracterización del motor de un vehículo eléctrico” [1] y del TFG en Ingeniería Eléctrica “Caracterización automática y control de motores de corriente continua. Implementación en banco de ensayos” [3].

La UAL dispone de un vehículo eléctrico urbano modelo LITA GLe2-2S (*Changzhou Greenland Vehicle Co. s.f.*) [4] (Figura 1.2). Este vehículo ha sido empleado en diversas investigaciones desarrolladas por el grupo ARM, siendo uno de los objetivos principales de las mismas la eficiencia energética frente a este tipo de motores.



Figura 1.2. Vehículo eléctrico eCARM.

Este trabajo se ha desarrollado bajo el marco del proyecto ‘Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables’ (CHROMAE, DPI2017-85007-R), coordinado por el grupo ARM. El objetivo de este proyecto es controlar y gestionar de forma óptima los recursos en sectores agroindustriales, integrando energías renovables. En la Figura 1.3 se observa el flujo de recursos considerado por CHROMAE.

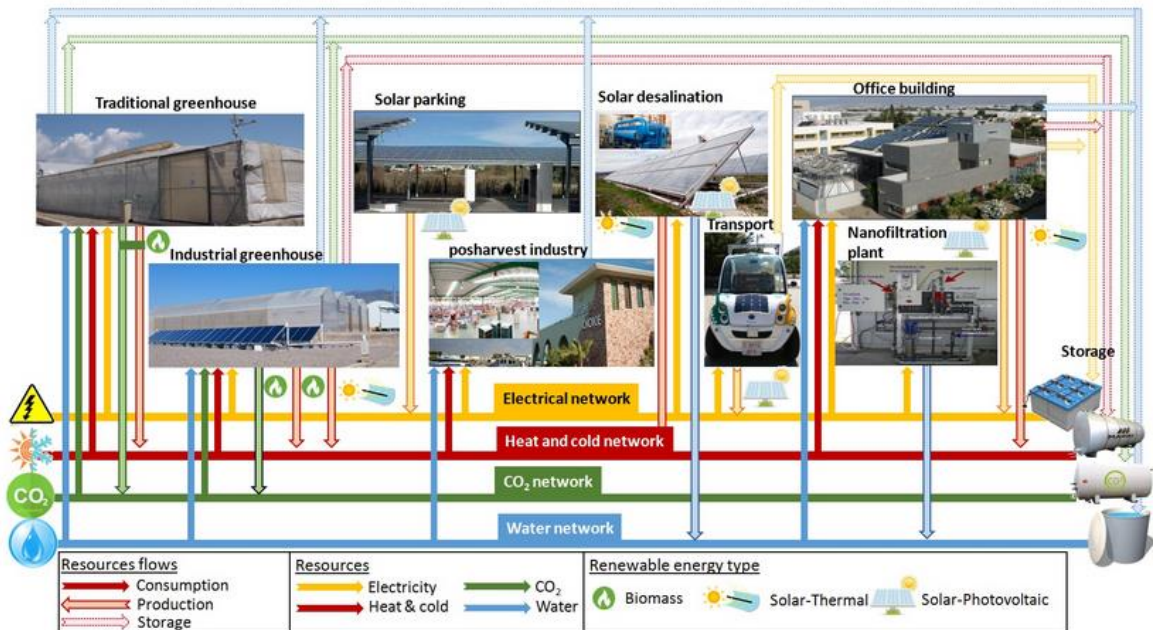


Figura 1.3. Flujo de recursos heterogéneos entre los diferentes elementos del distrito agroindustrial.

El vehículo se sitúa dentro del proyecto bajo el paradigma *Vehicle-to-grid* (V2G) y *Grid-to-vehicle* (G2V) como consumidor y almacenamiento de energía eléctrica. Sus funciones dentro del sistema son: consumir, almacenar y producir energía eléctrica.

## 1.4 Resumen de resultados

En este proyecto se ha desarrollado, para el banco de ensayos destinado a la caracterización del motor del vehículo eléctrico *eCARM*, un modelado mediante caja negra single input-multiple output (*SIMO*) tanto del motor como de la carga, el cual permite predecir consumos energéticos del sistema para diferentes entradas de datos acerca de un determinado recorrido. Para lograrlo, se han obtenido las funciones de transferencia de las distintas variables haciendo uso del entorno de Matlab, partiendo de datos obtenidos en ensayos frente a entradas en tren de pulsos. Dichos resultados aparecen en la Figura 1.4, y se corresponden con las diversas pruebas realizadas modificando la inercia del sistema.

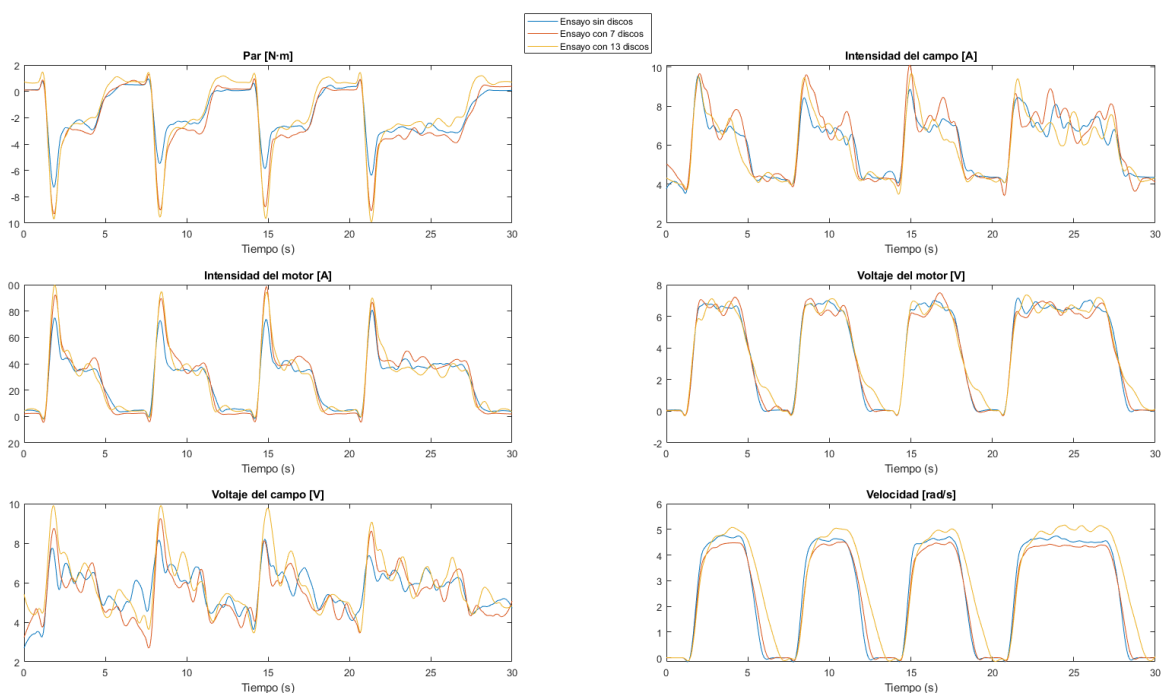


Figura 1.4. Resultados obtenidos en los ensayos.

A continuación, se han importado los datos a la *toolbox* de identificación de Matlab y se han obtenido las funciones de transferencia para cada una de las variables, en los tres ensayos. Dichos resultados se han trasladado al entorno de Simulink (Figura 1.5), por su facilidad para trabajar con los modelos y llevar a cabo simulaciones.

En la Figura 1.6 se puede observar un ejemplo de las funciones de transferencia que definen el comportamiento del motor cuando éste posee una mayor inercia.

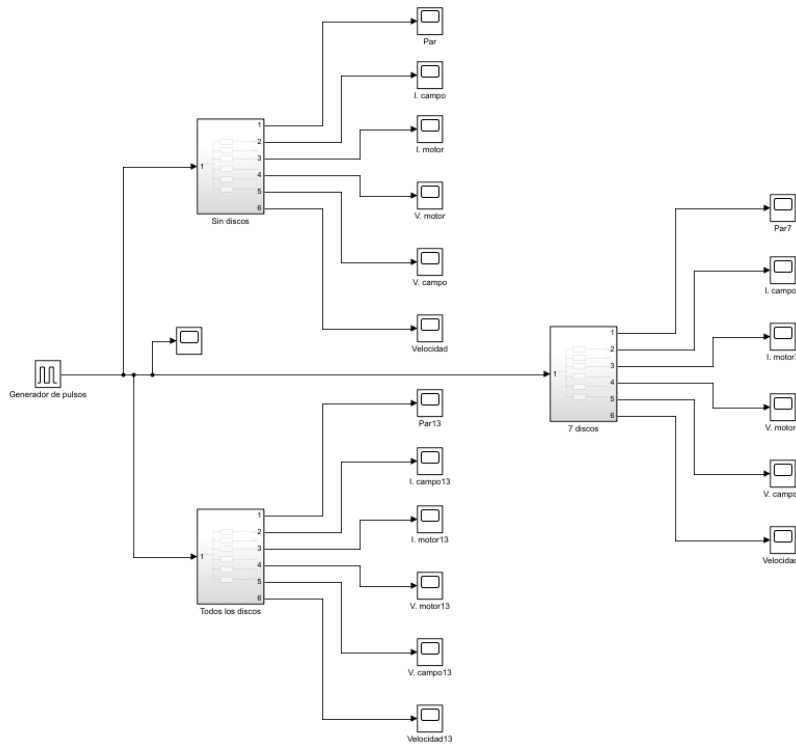


Figura 1.5. Panel del modelado SIMO del banco de ensayos.

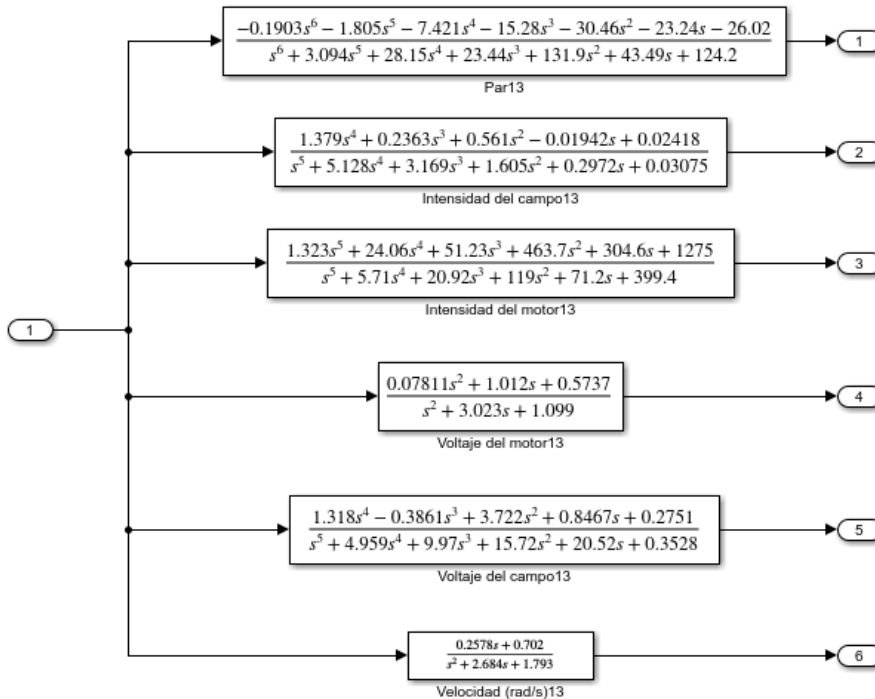


Figura 1.6. Funciones de transferencia para el ensayo con todos los discos.

En la Figura 1.7 se aprecia, a modo de ejemplo, una comparación entre los valores de par e intensidad del motor medidos por los sensores (en azul) y los obtenidos por el modelo en Simulink (en naranja).

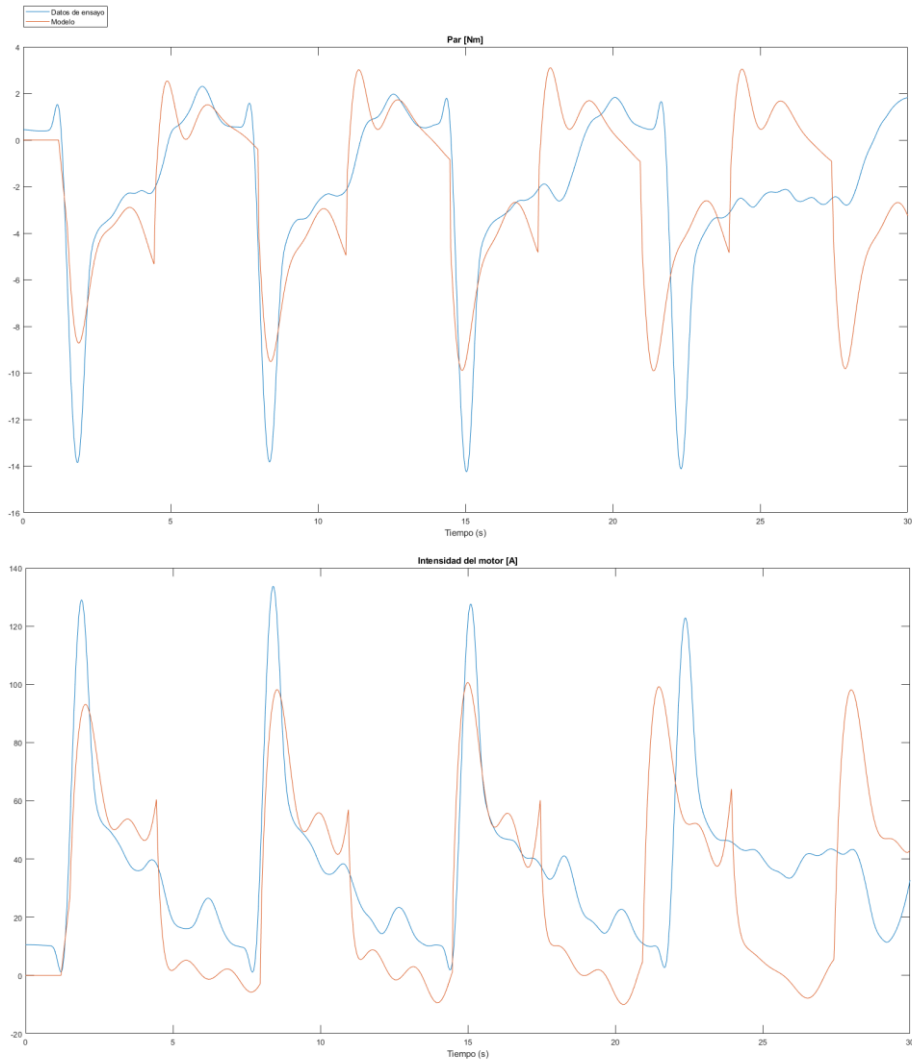


Figura 1.7. Comparación de los valores de par e intensidad del motor simulados.

Asimismo, se ha propuesto la incorporación del sistema al entorno de Simscape Multibody, que proporciona un entorno de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos 3D con un gran potencial para el estudio y la simulación de este tipo de sistemas.



## 1.5 Cronología

Para el desarrollo de este trabajo se ha determinado una secuencia de tareas a realizar, las cuales se definen a continuación:

- **Tarea 1: Investigación de antecedentes y búsqueda de información.** Se lleva a cabo una búsqueda de información de los proyectos antecedentes que han trabajado con el banco de ensayo, con el objetivo de conocer su funcionamiento y su estado actual. Además, se realiza una búsqueda bibliográfica sobre publicaciones relacionadas con el funcionamiento de los motores de corriente continua, las ecuaciones matemáticas que definen su comportamiento y las distintas formas de realizar un modelado.
- **Tarea 2: Acondicionamiento del banco.** Se analiza el estado actual del banco para conocer las modificaciones que es necesario realizarle. Se diseña e imprime un sistema de transmisión mediante poleas dentadas y se instala el nuevo encoder en el banco. Se aloja un nuevo sensor de intensidad y se rehace el cableado de todos los sensores de acuerdo a las nuevas necesidades de medida.
- **Tarea 3: Diseño de una interfaz de control y adquisición de datos.** Se actualiza el panel de control desarrollado en trabajos anteriores para incluir los nuevos sensores y se añade la posibilidad de importar valores de aceleración desde un archivo de texto, permitiendo la repetitividad de los experimentos. Se llevan a cabo ensayos en distintas condiciones y se recogen los datos medidos.
- **Tarea 4: Procesado de los datos.** Se filtran los datos y se procesan para una correcta interpretación. Se obtienen las funciones de transferencia que definen el comportamiento del sistema, se llevan a Simulink y se analiza la viabilidad del modelo obtenido.
- **Tarea 5: Redacción de la memoria.** Elaboración de la memoria que recopila todo el trabajo realizado desde el comienzo del proyecto hasta su finalización.

En la siguiente tabla se muestra la distribución temporal de cada tarea (Tabla 1) junto con un diagrama de Gantt o cronograma (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) [5] que permite visualizar de forma rápida los períodos de trabajo.

Tabla 1. Resumen de actividades.

Actividad	Precedencia	Inicio	Fin	Duración	Tiempo
Tarea 1	-	02/04/2021	18/08/2021	40 días	50 horas
Tarea 2	Tarea 1	13/04/2021	01/10/2021	50 días	70 horas
Tarea 3	Tarea 2	01/09/2021	18/10/2021	25 días	80 horas
Tarea 4	Tarea 3	13/09/2021	20/10/2021	30 días	90 horas
Tarea 5	Tarea 4	04/09/2021	27/10/2021	50 días	60 horas

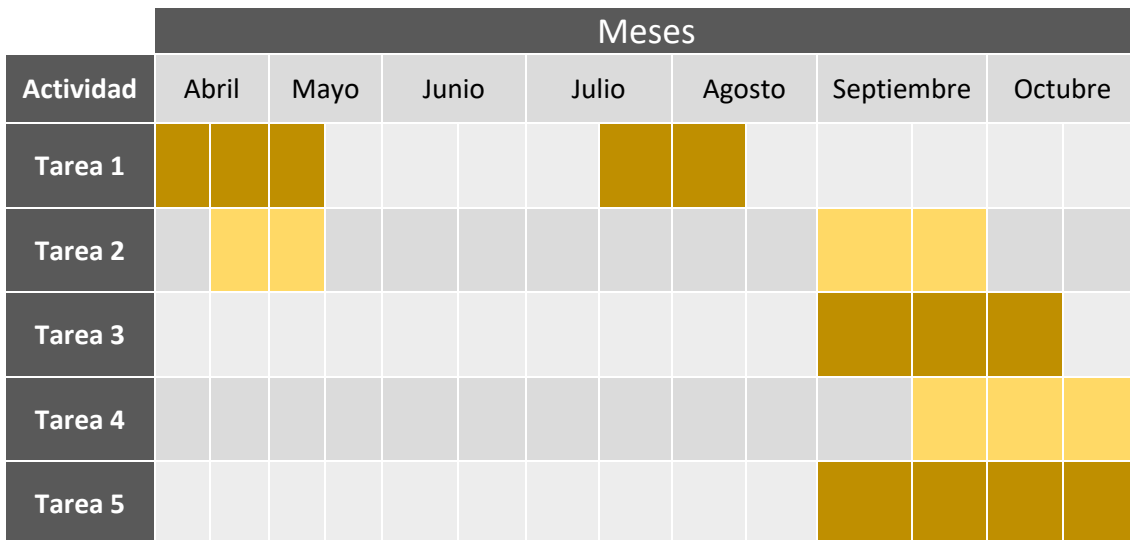


Figura 1.8. Cronograma de actividades.

Se han dividido los meses en quincenas, por lo que cada recuadro equivale aproximadamente a medio mes.

Se observa como durante los períodos ordinario y extraordinario de evaluación, correspondientes a los meses de mayo, junio y julio, no se ha llevado a cabo ninguna tarea relacionada con este proyecto, ya que el autor tenía asignaturas pendientes de las que evaluarse.

Muchas de las tareas se solapan entre sí ya que fue necesario trabajar en varios aspectos al mismo tiempo. Por ejemplo, al mismo tiempo que se terminaba una de las tareas, se iba incluyendo el trabajo realizado en el informe y se llevaba a cabo la búsqueda de referencias bibliográficas del objetivo siguiente, por lo que constantemente había que revisar el trabajo realizado y repetir algunos detalles en las distintas tareas.

## 1.6 Estructura de la memoria

La presente memoria se ha estructurado en cinco capítulos cuyo contenido se resume a continuación. El capítulo 1. *Introducción*, el presente, es una introducción al proyecto donde se justifica por qué se lleva a cabo el mismo, ya que hay una necesidad que se pretende cubrir; el capítulo 2. *Revisión bibliográfica* es una recopilación de conceptos importantes para la comprensión de este trabajo y de la metodología utilizada por otros autores en publicaciones del mismo ámbito; en el capítulo 3. *Trabajo experimental* se explica el proceso de diseño de las poleas dentadas, así como todo el trabajo de acondicionamiento realizado en el banco; en el capítulo 4. *Adquisición y procesado de datos* se especifica cómo se llevaron a cabo los ensayos y el posterior tratamiento de datos, así como el método utilizado para la obtención de las funciones de transferencia que definen su comportamiento; en el capítulo 5. *Conclusiones y Trabajos Futuros* se redactan las conclusiones que se extraen de los resultados obtenidos y se proponen posibles trabajos futuros para la continuación de esta línea de investigación.

## 1.7 Competencias utilizadas en el TFG

El Grado en Ingeniería Mecánica constituye unos estudios con un amplio contenido multidisciplinar, permitiendo a los titulados abordar problemas desde diversos ámbitos del conocimiento. Además, ha sido necesario ampliar algunos conocimientos sobre áreas relacionadas con la electrónica, la automatización y el modelado de sistemas, y se ha contado con la ayuda de personal que aportada ideas y soluciones a los problemas que iban surgiendo. Estas tareas comprenden las siguientes competencias básicas:

- CB1 – Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.
- CB2 – Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.
- CB5 – Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

Durante el desarrollo de este proyecto ha sido necesario trabajar una serie de competencias transversales sin las cuales no hubiera sido posible alcanzar los resultados obtenidos y que completan un perfil profesional en el área de la ingeniería. El empleo de distintas herramientas y habilidades, así como el compromiso por alcanzar los objetivos, se encuentra relacionado con las siguientes competencias transversales:

- UAL 1 – Conocimientos básicos de la profesión
- UAL 2 – Habilidad en el uso de las TIC
- UAL 3 – Capacidad para resolver problemas
- UAL 4 – Comunicación oral y escrita en la propia lengua
- UAL 5 – Capacidad de crítica y autocrítica
- UAL 6 – Trabajo en equipo
- UAL 9 – Capacidad para aprender a trabajar de forma autónoma

Además, durante la realización de este trabajo ha sido necesario llevar a cabo tareas auxiliares como el diseño mediante herramientas CAD de las poleas dentadas y el cableado de distintos equipos, con lo que se han trabajado todas aquellas competencias específicas relacionadas con la expresión gráfica, el diseño asistido por ordenador y la electrónica básica. De igual modo, para obtener las soluciones relacionadas con el procesado de datos y la automatización del sistema, ha sido necesario ampliar conocimientos en la rama de la electrónica analógica y la automatización, así como de la robótica para la implementación del sistema en el entorno de Simscape Multibody.

Pueden señalarse como principales competencias específicas trabajadas las siguientes:

- E-CT3 – Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

- E-CT4 – Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
- E-CB3 – Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.

## 2. Revisión bibliográfica

En este capítulo se exponen las principales fuentes y autores que se han consultado para conocer el funcionamiento y el control de los motores de corriente continua y distintos aspectos relacionados con ellos que son imprescindibles para el desarrollo de este trabajo fin de grado.

### 2.1 Banco de ensayos

Para conocer con mayor profundidad el banco de ensayos con el que se va a trabajar, se destaca:

- Trabajo fin de grado de Francisco Acuña Prieto [1], en el cual se desarrolla el proceso de fabricación del banco de ensayos, junto con el equipo empleado (sensores y controladores) y cómo se ha realizado su conexión con la tarjeta DAQ disponible para posteriormente desarrollar un controlador en el software de sistemas LabView. Para cumplir el objetivo de modelado del motor, este trabajo contó con dos limitaciones importantes: (i) el motor estaba alimentado con baterías de poca capacidad y potencia y (ii) no se contaba con una interfaz de control que permitiera replicar experimentos.
- Trabajo fin de grado de Fernando Martos Guzmán [2], donde explica el diseño y construcción del volante de inercia junto con la reductora que permite simular el comportamiento real de un vehículo eléctrico.

### 2.2 Controlador

- Referente a la programación en el entorno de LabView et al., en [6], explican el funcionamiento básico de un motor de corriente continua y la incorporación de los distintos sensores y equipos en el software de sistemas LabView.
- El trabajo fin de grado desarrollado por Galo José Heredia Vicente en [3] recoge aspectos como el tratamiento de datos obtenidos por sensores y la disminución de ruido mediante programación en Matlab. Además, estudia la obtención de los parámetros del motor a partir de dicha información, lo cual resulta útil para la labor desarrollada en este proyecto. No obstante, el software de adquisición desarrollado en este proyecto no es compatible con Labview, ni se obtienen modelos SIMO que representen la dinámica completa del motor más el banco.

### 2.3 Simulink

- I. Cerón Morales et al. exponen en [7] el modelo matemático de un motor de corriente continua. Estas ecuaciones fueron necesarias para modelar el motor en Simulink, así como para conocer los parámetros característicos de un motor de este tipo.

- En [8], Patinya Samanuhut y Atilla Dogan explican el proceso para modelar un par de engranajes mediante el método de Lagrange. Este aspecto fue empleado para continuar con la programación de la reductora en Simulink. Adicionalmente, se expone el análisis de sistemas de engranajes planetarios, que, aunque no fueron trabajados en este proyecto, sirvieron para profundizar en el conocimiento del modelado de engranajes.

## 3. Puesta en marcha del banco de ensayos

En el presente capítulo se desarrolla el reacondicionamiento llevado a cabo en el banco de ensayos, así como el proceso de aprendizaje para desarrollar una interfaz de control.

### 3.1 Interfaz de control

Como fase de aprendizaje en el control de motores de corriente continua bajo entorno Labview, y dada la escalabilidad de los resultados, se trabajó en primer lugar con un motor eléctrico de 12 V con una reductora 100:1 y un encoder incorporado, de marca Pololu, capaz de proporcionar un par aproximado de 7 kg·cm.

La tarjeta de control de motores empleada fue la Phidgets 1065 (Figura 3.1), que permite controlar la dirección, velocidad y la aceleración de un motor de corriente continua (*DC*). Posee un rango de alimentación de entre 9 y 28 V DC, por lo que se decide alimentarlo con una fuente de 12 V DC disponible en el laboratorio. Mediante una aplicación de Phidgets disponible en el ordenador (Figura 3.6), se puede controlar el porcentaje del voltaje efectivo que le llega al motor, variando así su velocidad. La placa permite conectar hasta 2 sensores analógicos y 2 digitales al mismo tiempo, aunque solo fue empleado un sensor para medir el voltaje.



Figura 3.1. Tarjeta Phidget 1065.



Figura 3.2. Motor eléctrico Pololu.

Este sensor (Figura 3.3) puede medir con precisión un voltaje diferencial máximo de  $\pm 30$  V y va conectado por un lado a la tarjeta DAQ (modelo 6210) y por el otro a la tarjeta Phidget, en paralelo con el motor.

La tarjeta DAQ alimenta al sensor con un voltaje de 5 V a través del puerto 10, mientras que con los puertos 11 y 15 le proporciona una toma de tierra y un canal para tomar los datos, respectivamente (Figura 3.4).



Figura 3.3. Sensor de voltaje Phidget.

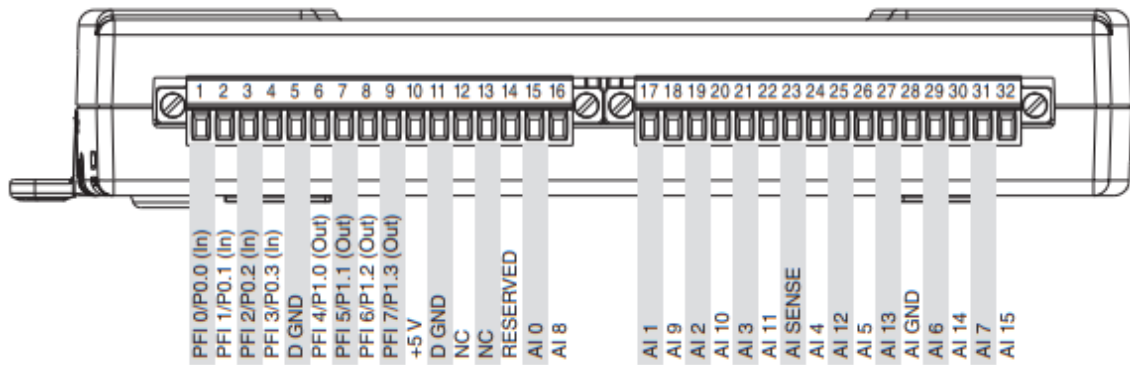


Figura 3.4. Conexiones NI USB-6210.

El resultado final de este montaje puede apreciarse en la Figura 3.5.



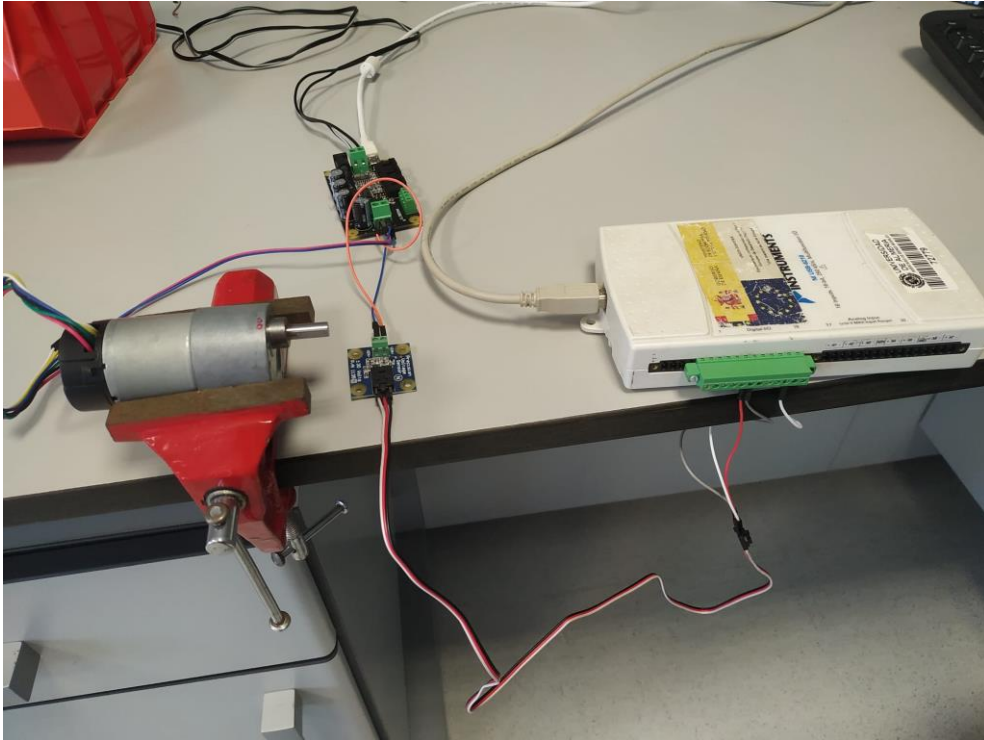


Figura 3.5. Montaje completo del motor Pololu.

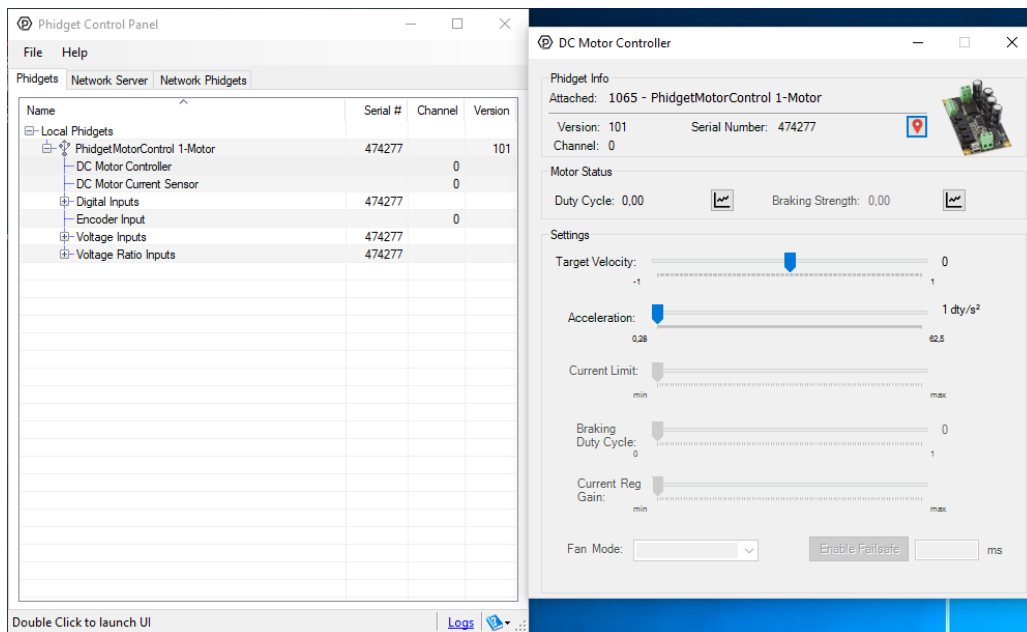


Figura 3.6. Panel de control de Phidget.

El siguiente paso fue crear un programa en Labview que permitiese tomar los datos recogidos por la DAQ y mostrarlos en pantalla, guardándolos en un archivo con formato LVM. Se ha empleado un bloque *Meter* para conocer valores puntuales y otro de gráfica para poder visualizar su evolución a lo largo del tiempo (Figura 3.7 y Figura 3.8).

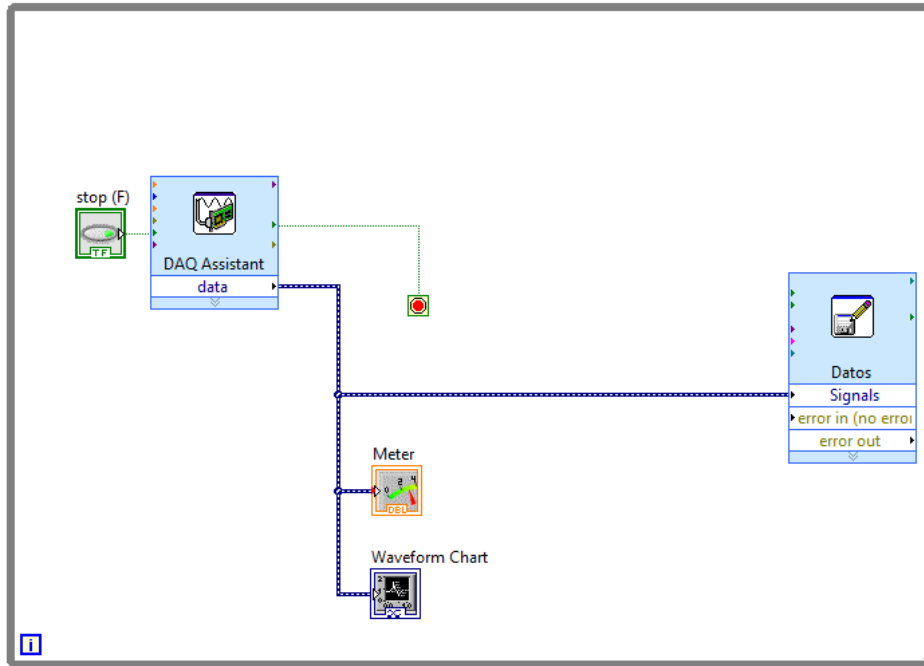


Figura 3.7. Diagrama de bloques para la adquisición de datos.

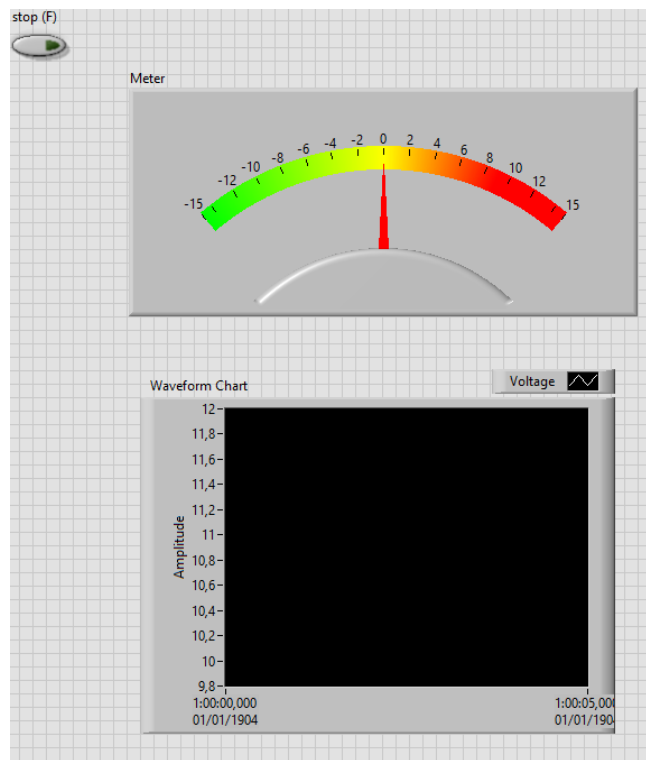


Figura 3.8. Panel de la interfaz de adquisición de datos

Una vez comprobado que los datos se leen correctamente, pasamos a analizar los mismos en Matlab mediante el siguiente código:

```
importdata('ensayo_motor_completo.lvm');  
x = ans(:,1);  
y = ans(:,2);  
plot(x,y);  
xlabel('Tiempo (s)');  
ylabel('Voltaje (V)');  
title('Evolución del voltaje del motor a lo largo del tiempo');
```

El resultado se muestra en la Figura 3.9. El tramo ascendente corresponde con un aumento del porcentaje del voltaje en el controlador Phidget, y el tramo en el que se estabiliza, con un descenso. Se puede apreciar la existencia de un ruido considerable que podría suavizarse usando comandos específicos de Matlab, pero, puesto que se trataba de una prueba, no se consideró necesario.

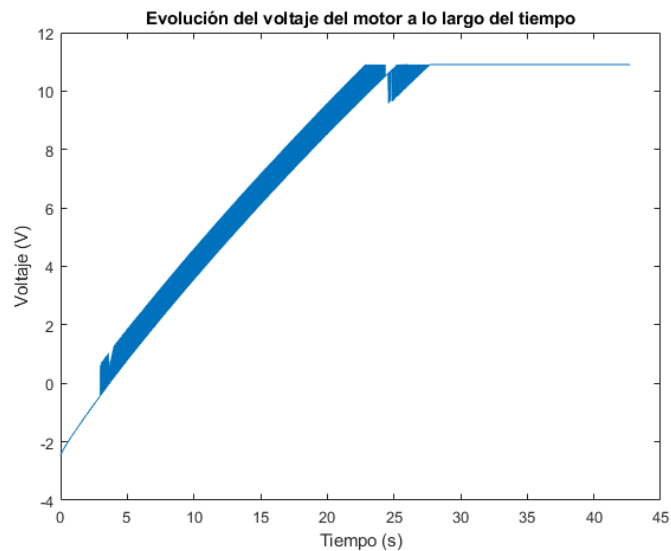


Figura 3.9. Evolución del voltaje del motor.

## 3.2 Banco de ensayos

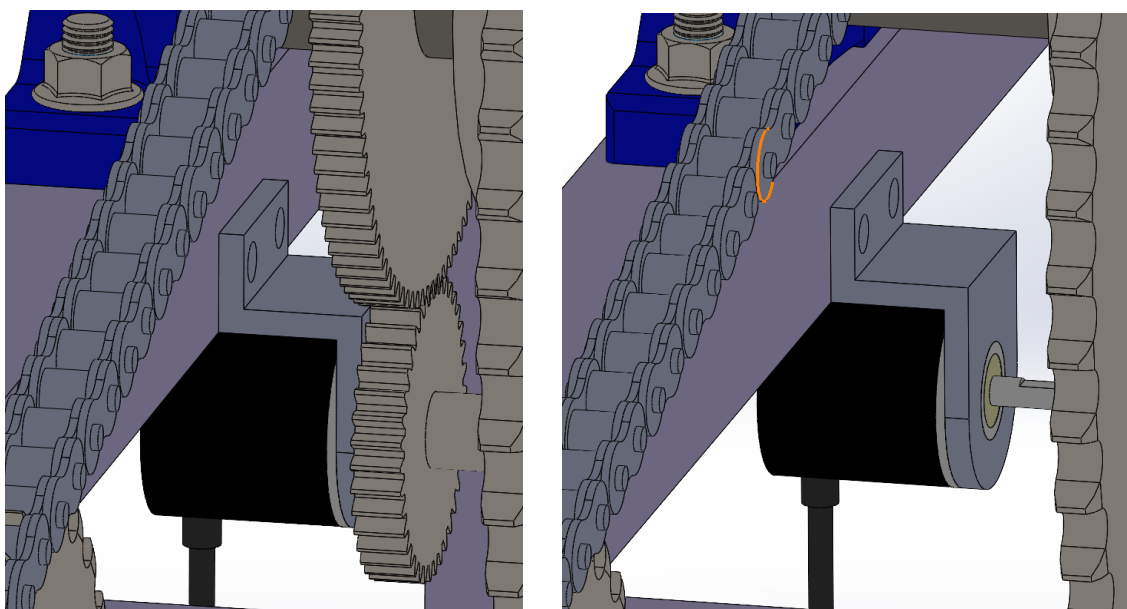
En este apartado se expone el trabajo realizado sobre el banco de ensayos y los ajustes que se llevaron a cabo.

En primer lugar, el encoder con el que se realizaron las medidas en trabajos previos estaba colocado en el eje del motor. Puesto que éste alcanzaba velocidades muy altas, teniendo en cuenta a su vez la multiplicación producida por la patea de transmisión, las medidas obtenidas tenían un margen de error muy grande, lo que impedía hacer un correcto análisis de los datos. Por tanto, el primer paso era subsanar este defecto.

El nuevo encoder escogido es el modelo E6B2-CWZ3E de la marca YUMO (Figura 3.10), el cual posee una resolución de 1024 pulsos por revolución. Se trata de un encoder incremental, cuyo rango de alimentación es de 5 – 24 V DC.



Figura 3.10. Encoder YUMO E6B2-CWZ3E.



a) Sistema de transmisión mediante engranajes rectos

b) Diseño inicial de la chapa del encoder

Figura 3.11. Elementos diseñados inicialmente para el encoder.

El nuevo encoder se situó en el eje donde se ubica el volante de inercia desarrollado en [2]. En un primer momento se pensó en transmitir la potencia al encoder mediante engranajes rectos, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.11, pero finalmente se optó por un sistema de transmisión mediante poleas dentadas, ya que ocupaba menos espacio y disponíamos de una correa T5 en el laboratorio que cumplía perfectamente con nuestro cometido.

Las dos poleas fueron diseñadas mediante SolidWorks, que es un software para el Diseño Asistido por Ordenador (CAD), para posteriormente fabricarlas usando la impresora 3D disponible en el laboratorio.

Para su diseño, se comenzó por definir el diámetro necesario de una polea sabiendo su paso y el número de dientes:

$$m = \frac{d}{Z} \quad (1.1)$$

$$m = \frac{p}{\pi} \quad (1.2)$$

Igualando ambas expresiones, nos queda:

$$\frac{p}{\pi} = \frac{d}{Z} \rightarrow d = \frac{p \cdot Z}{\pi} \quad (1.3)$$

De esta forma, sabiendo que el paso para las poleas T5 es de aproximadamente 4,933 mm, podemos fácilmente calcular el diámetro de la polea en función del número de dientes que nos interesen.

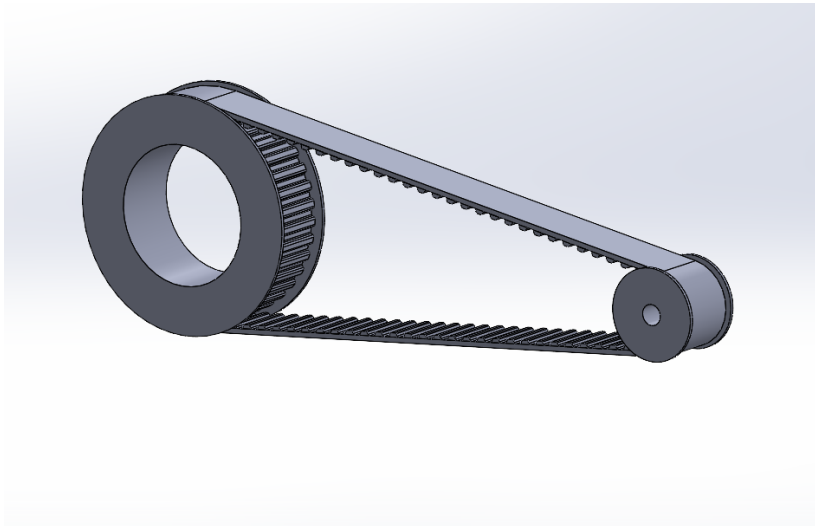


Figura 3.12. Sistema de transmisión completo.

En un primer momento, se decidió emplear una polea grande de 38 dientes y una menor de 12 dientes, las cuales se ilustran en la Figura 3.12.

Para fabricar las piezas se empleó la impresora 3D disponible en el laboratorio de la universidad (modelo WitBox 2 de la empresa BQ). Una característica importante de esta impresora es que es de cama fría, por lo que el material empleado para la fabricación de las piezas fue PLA de 1.75 mm, el cual requiere una temperatura de entre 190 y 220 °C.

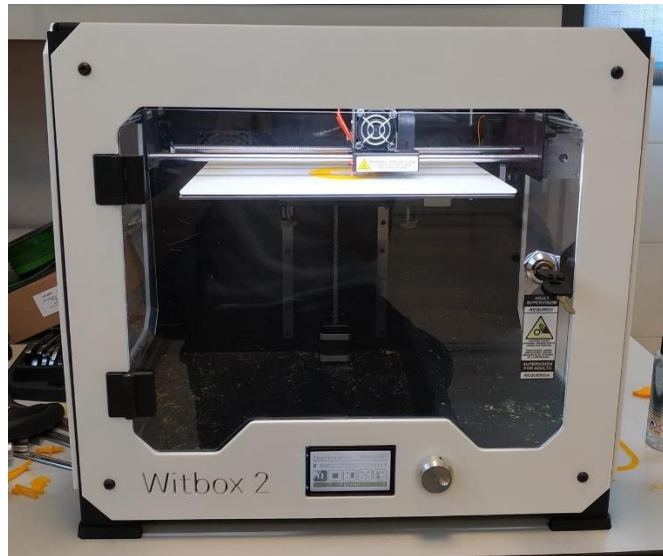


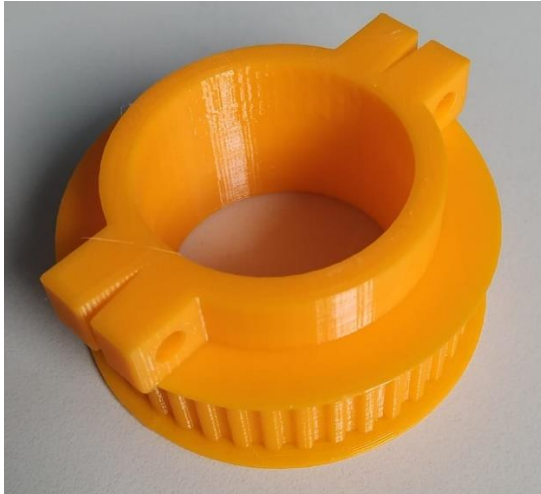
Figura 3.13. Impresora WitBox 2.

El proceso para imprimir las piezas implica el diseño y posprocesado. En primer lugar, se diseñan las piezas en SolidWorks y se guarda el archivo en formato STL. A continuación, lo cargamos en el programa Cura, seleccionamos la orientación en la que queremos que se imprima la pieza para que la superficie de apoyo sea lo mayor posible y guardamos el nuevo archivo en una tarjeta de memoria, la cual introducimos en la impresora.



Figura 3.14. Primer ensamblaje de la polea.

Con la intención de no tener que desmontar todo el eje, se decidió imprimir la polea grande en dos partes y unir las mediante dos tornillos (Figura 3.14), pero la correa no encajaba correctamente, por lo que se decidió hacer un rediseño e imprimir la polea en una única pieza, como podemos observar en la Figura 3.15.



a) Diseño final de la polea grande



b) Diseño final de la polea pequeña

*Figura 3.15. Poleas dentadas impresas.*

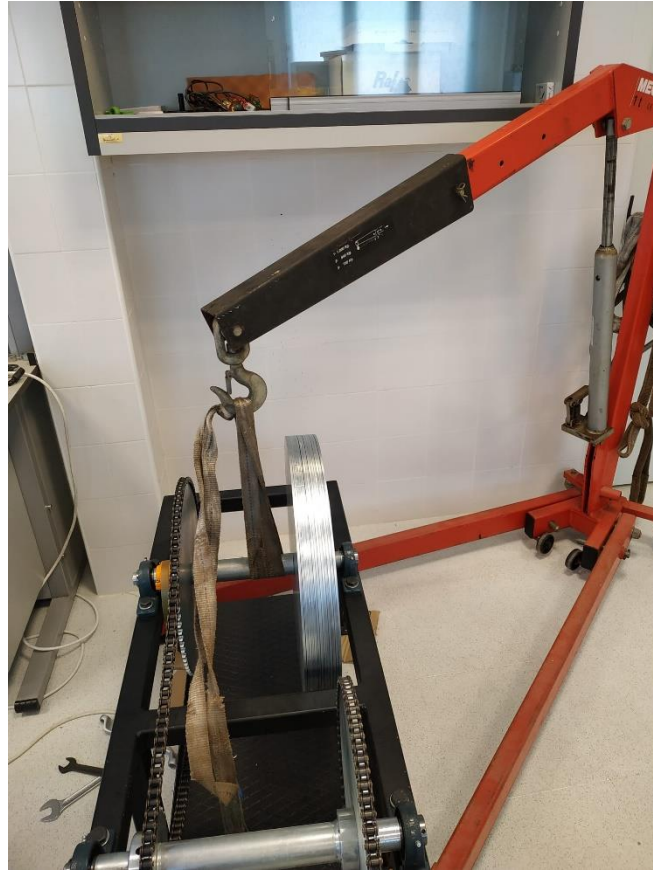
Posee una ranura en forma de V con un ángulo de  $12^\circ$ , cuya finalidad es la de ajustarlo al eje lo mejor posible, ya que la precisión de la impresora es limitada y es una forma sencilla de solventar este problema y que quede correctamente ajustado. El número de dientes de la polea grande y la pequeña se cambió a 40 y 18, respectivamente.



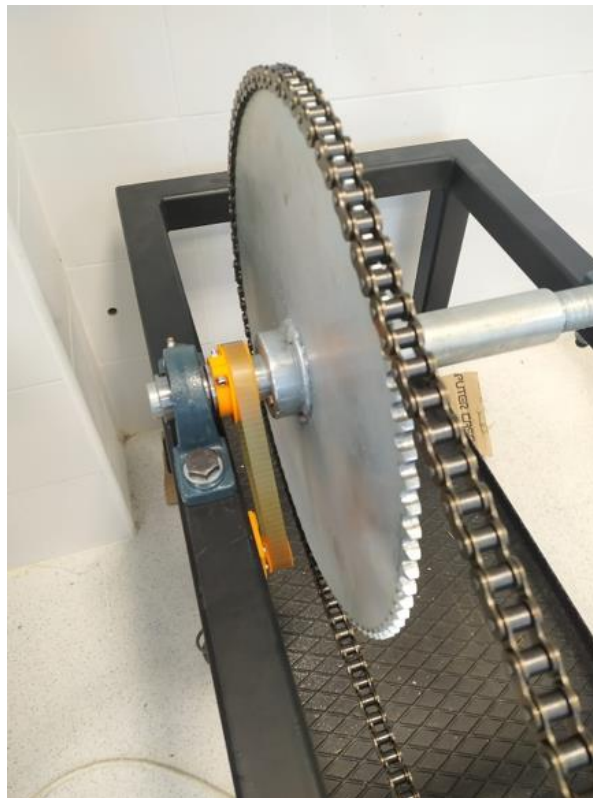
*Figura 3.16. Soporte del encoder.*

Para instalar la nueva polea, era necesario desmontar el eje y quitar el volante de inercia, el cual tenía un peso aproximado de 133 kg. El primer paso fue llevar al laboratorio una grúa plegable que sujetase el eje (Figura 3.17). A continuación, se desatornillaron los rodamientos y se retiró el piñón y el volante de inercia teniendo en cuenta todas las medidas de seguridad. Tras esto, se volvió a colocar el piñón y la polea dentada junto con los rodamientos, dejando fuera el volante de inercia, ya que no era necesario para las pruebas que iban a realizarse.

El resultado final de dicha instalación aparece en la Figura 3.18. En ella podemos ver el encoder ya instalado junto con las dos poleas y su correa.



*Figura 3.17. Grúa plegable.*



*Figura 3.18. Montaje del encoder.*



El siguiente paso fue conectar el nuevo encoder y revisar el resto de los sensores del banco (par, intensidad, voltaje, etc.)

El cableado de la tarjeta DAQ (Figura 3.19) había sido modificado respecto al desarrollado en [1], que es el que se tomará como referencia. Por ello, fue necesario volver a conectar todos los dispositivos correctamente.

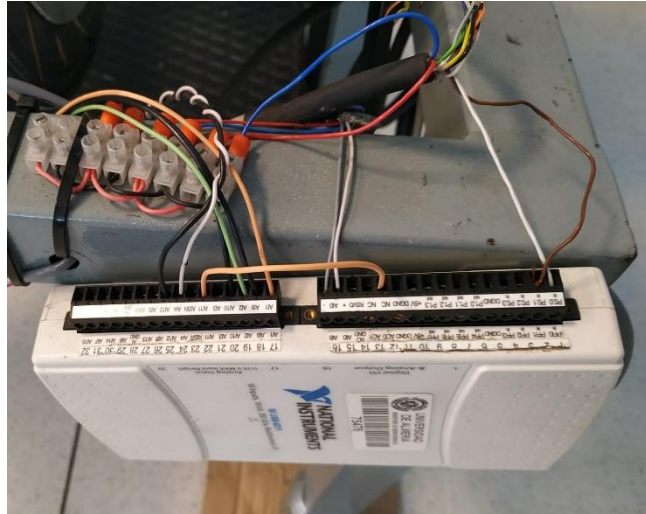


Figura 3.19. Estado inicial de la tarjeta DAQ.

Por otro lado, el sensor de intensidad de campo del motor había sido retirado para su uso en el Vehículo Eléctrico de la Universidad de Almería (*eCARM*). Se volvió a colocar éste en el banco de ensayos y se cableó, quedando el montaje como se aprecia en la Figura 3.20. Al igual que el resto de los sensores, éste también se alimentó con un valor de 24 V DC. En esta figura también se aprecia el sensor de voltaje de campo conectado a los terminales F1 y F2 del motor, y A1 y A2 para el voltaje en la armadura.

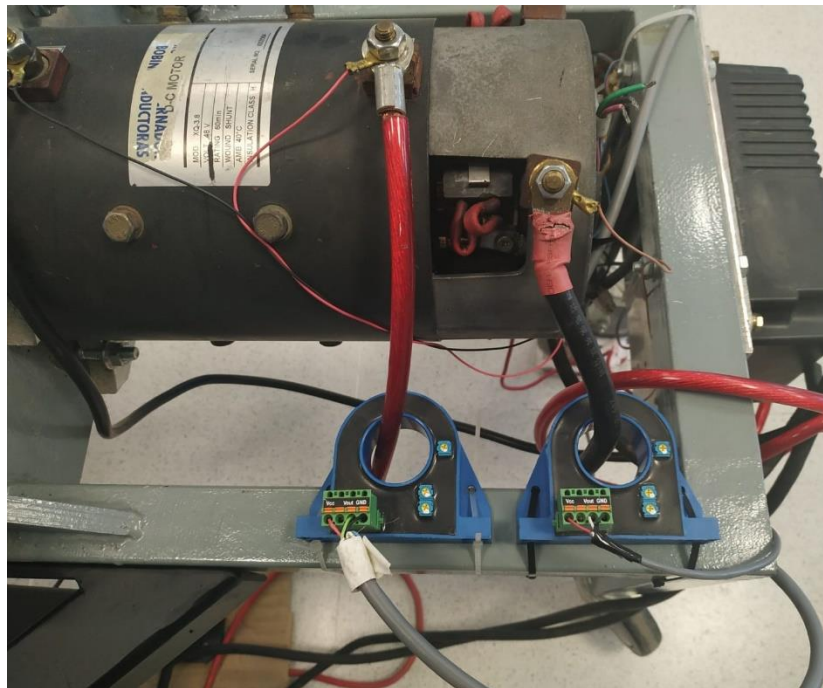


Figura 3.20. Montaje de sensores de intensidad.

Tabla 2. Conexiones de los sensores en la tarjeta DAQ.

Sensores	Conexión	Conectado a	Rango de la señal (V)
Par	Señal +	AI 1	[-5, +5]
	Señal -	AI 9	
	Derivación a tierra	No conectado	
Intensidad campo	Señal	AI 3	[0, +10]
Intensidad motor	Señal	AI 4	[0, +10]
Voltaje motor	Señal +	AI 5	[-10, +10]
	Señal -	AI 13	
Voltaje campo	Señal +	AI 6	[-10, +10]
	Señal -	AI 14	
Encoder	A	PFI 0	
	B	PFI 1	
	Índice	No conectado	
Acelerador	Señal	AO 0	[0, +4,6]
	GND	AO GND	

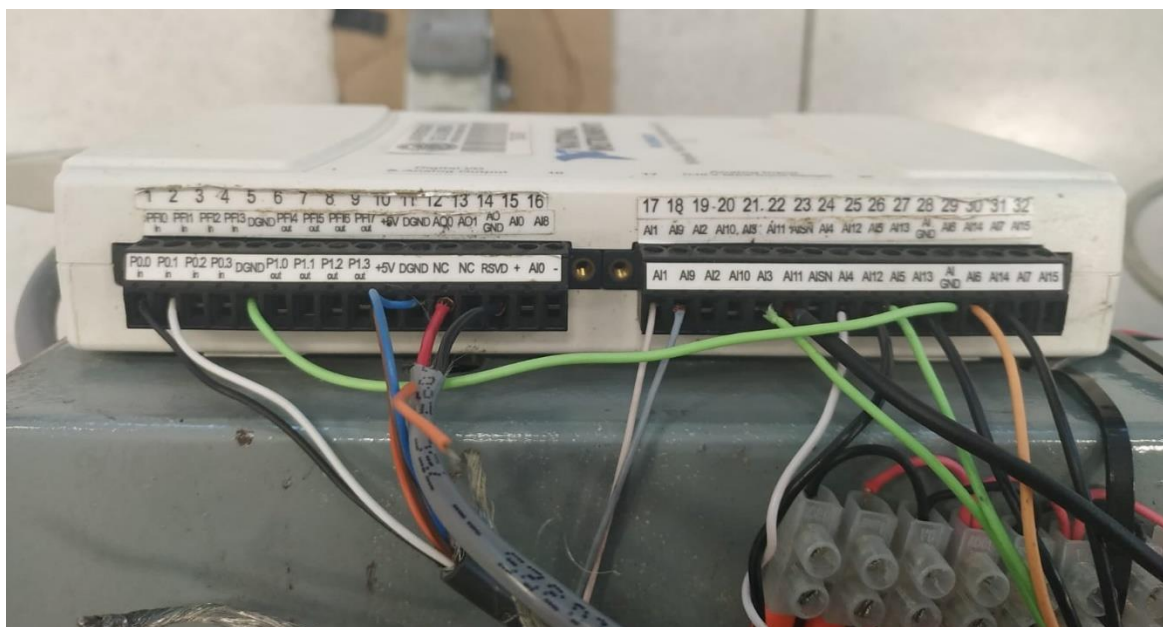


Figura 3.21. Cableado de la tarjeta DAQ.

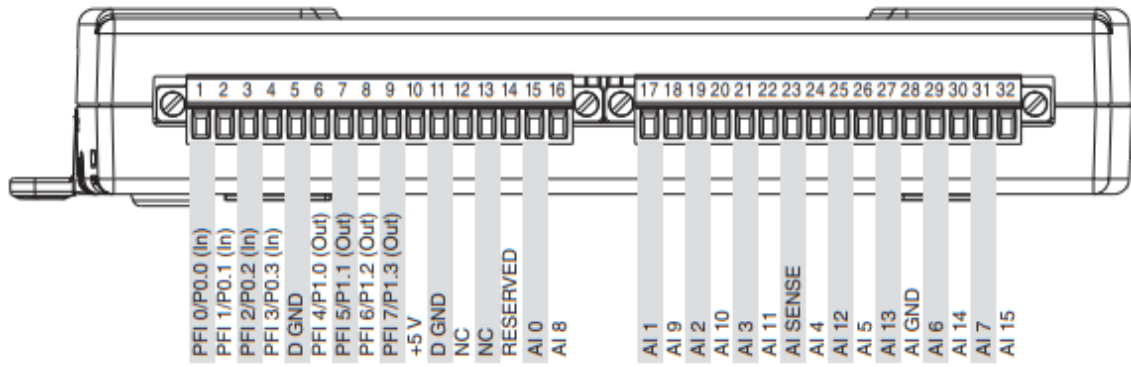


Figura 3.22. Conexiones NI USB-6210.



## 4. Realización de ensayos y caracterización del banco

En este capítulo se presenta el proceso de configuración de los sensores y de la interfaz de control que ha permitido replicar los ensayos, así como el método de obtención de los datos y su posterior análisis para obtener las funciones de transferencia que definen el comportamiento del sistema.

### 4.1 Configuración de los sensores en LabView

Los sensores analógicos miden un parámetro físico y emiten un voltaje. Conociendo el rango de la señal mediante el datasheet del instrumento y su valor nominal, podemos realizar un escalado y obtener los valores que deseamos medir. Este aspecto fue desarrollado con más profundidad por Francisco Acuña en [1].

A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los valores de escalado de los distintos sensores:

Tabla 3. Valores de escalado de los sensores.

Sensor	Valor nominal	Rango de la señal (V)	Multiplicador
Par	100 N·m	[-5,+5]	20
Intensidad campo	100 A	[0, +10]	10
Intensidad motor	500 A	[0, +10]	50
Voltaje motor	54 V	[-10, +10]	5,4
Voltaje campo	54 V	[-10, +10]	5,4

El tratamiento de la señal del encoder es diferente. Las lecturas de la posición angular se obtienen en grados y se pasan a revoluciones. Además, hay que tener en cuenta que el encoder mide el giro en un eje distinto del que nos interesa, por lo que habrá que multiplicarlo por un valor que dependerá de la reducción que se lleve a cabo.

Las poleas dentadas tienen 40 y 18 dientes, por lo que la reducción respecto al eje del volante será de 0,45. Por otro lado, los piñones desarrollados en [2] tienen 85 y 27 dientes en cada etapa, por lo que la reducción entre el eje del motor y el volante de inercia es de 9,9108 aproximadamente. Si tenemos en cuenta ambas reducciones, obtenemos que entre el giro del eje del encoder y del motor hay una reducción de 4,4599.

Para el cálculo de la velocidad es necesario dividir las revoluciones calculadas anteriormente entre el tiempo de muestreo del encoder, que en este caso es de 20 milisegundos. Por último, pasamos la velocidad a revoluciones por minuto y radianes por segundo.

Por otro lado, fue necesario cambiar la configuración del encoder, ya que el nuevo modelo instalado tenía una resolución de 1024 pulsos por revolución en modo X4.

## 4.2 Diseño de la interfaz de adquisición de datos en LabView.

Como se ha comentado anteriormente, para el desarrollo de este trabajo se ha tomado como referencia el trabajo desarrollado por Paco Acuña en [1] puesto que comparten bastantes objetivos entre sí. Por ello, se decidió usar la interfaz de LabView que él desarrolló, realizándole algunas modificaciones para ajustarlo a nuestras necesidades.

El panel frontal de la interfaz de adquisición de datos poseía un acelerador que podía ser controlado de forma manual. Esto resultaba útil para realizar pruebas rápidas y comprobar que todo funcionase correctamente, pero impedía hacer ensayos precisos, puesto que no permitía la repetitividad de los ensayos. Para solucionarlo, se implementó el bloque *Read From Measurement File* (Figura 4.1), mediante el cual se pueden importar valores desde un archivo de texto sin formato (*txt*). Es necesario configurar el tiempo que tarda en leer cada valor numérico, que en este caso es de 20 milisegundos, al igual que ocurría con el encoder. Teniendo esto en cuenta, 50 valores escritos en el archivo de texto equivalen a 1 segundo y, puesto que se quieren realizar ensayos de arranque y parada consecutivos que duren 3 segundos cada uno, es necesario emplear 150 valores para mantener cada pulso.

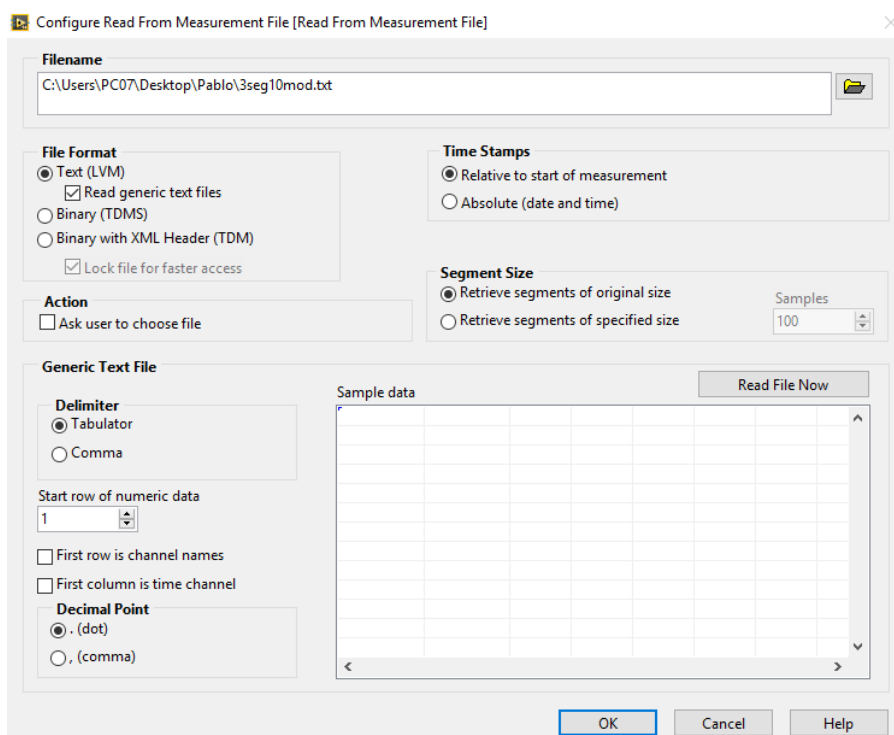


Figura 4.1. Configuración del bloque *Read From Measurement File*.

Además, para que funcione correctamente, es necesario incluir la función *Index Array*, la cual devuelve un elemento o submatriz de la matriz de  $n$  dimensiones en el índice, es decir, cambia la dimensión de la matriz de entrada para que pueda ser tratada correctamente.

Adicionalmente, hay que indicarle un valor index 0 que usa de referencia (en nuestro caso el parámetro 'i' que cuenta el número de veces que se ejecuta el bucle) y un valor index n-1, el cual hace referencia a una ubicación dentro de la matriz de entrada (en nuestro caso es el valor constante de 0). Los ensayos se realizaron con un porcentaje de aceleración del 15%

Por otro lado, el programa guarda los datos obtenidos por los sensores y las consignas del acelerador en un archivo de texto de formato lvm (*LabView Measurement*) desarrollado por National Instruments (NI). Con cada ensayo, el programa crea un nuevo archivo de datos.

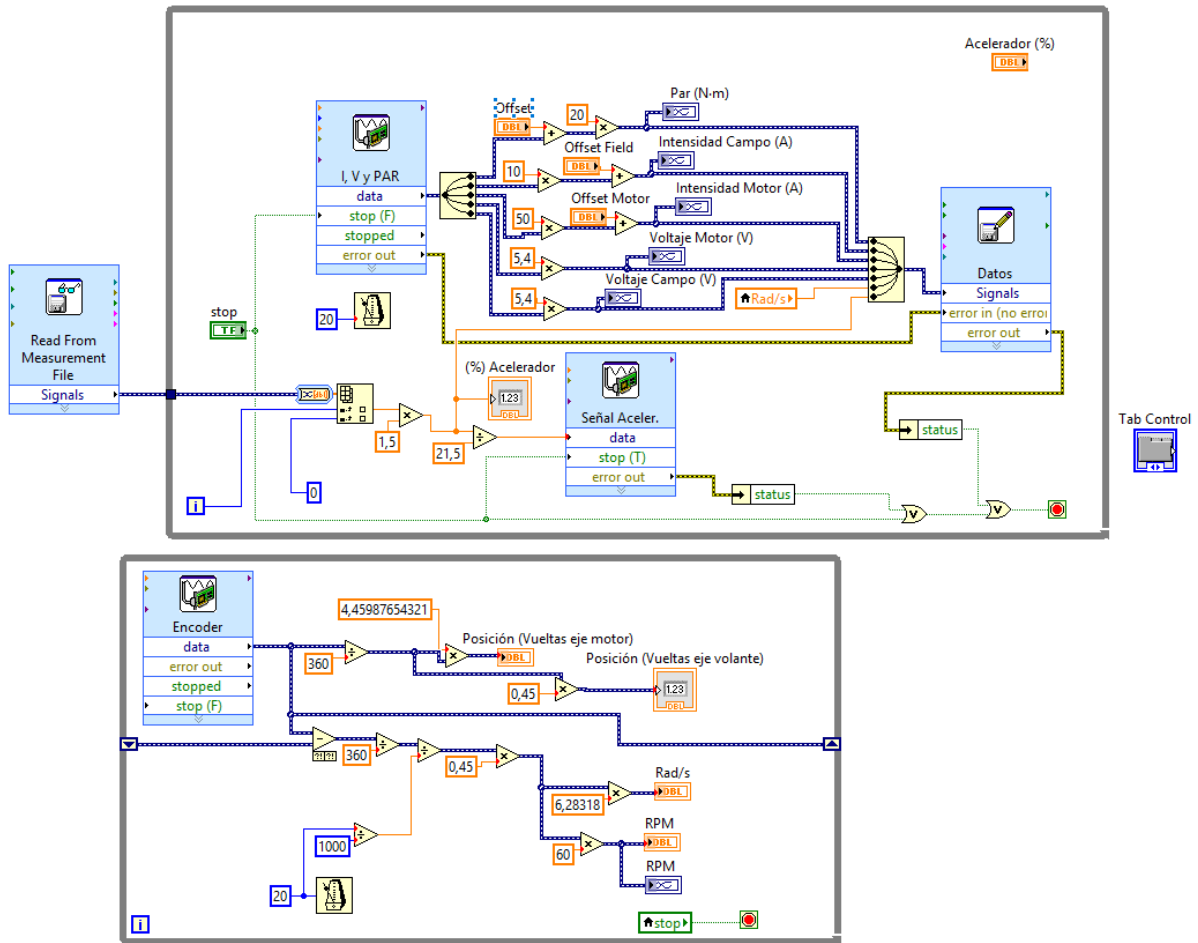


Figura 4.2. Diagrama de bloques de la interfaz de adquisición de datos en LabView.

Haciendo uso del bloque *Write to Measurement File* podemos configurar cómo queremos que el programa nos guarde los datos de los ensayos y en qué ruta (Figura 4.3). Es importante que el formato de texto sea LVM y que esté marcada la opción 'No headers' para evitar errores.

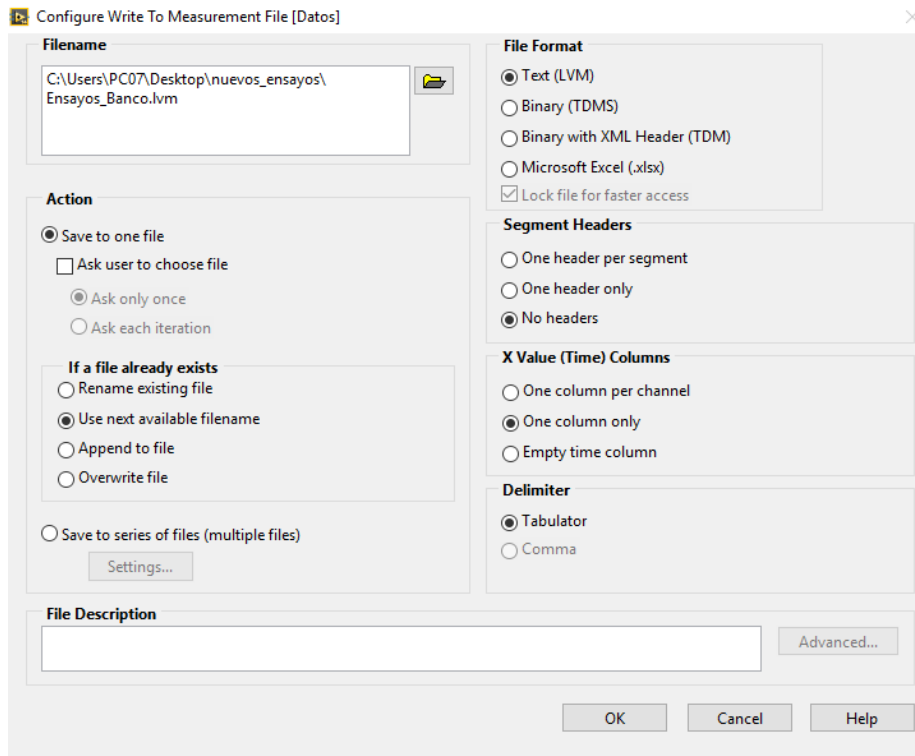


Figura 4.3. Configuración del bloque Write to Measurement File.

Una vez terminada la configuración de todos los sensores en LabView y comprobado el correcto funcionamiento de cada uno de ellos, pasamos a la realización de los ensayos.

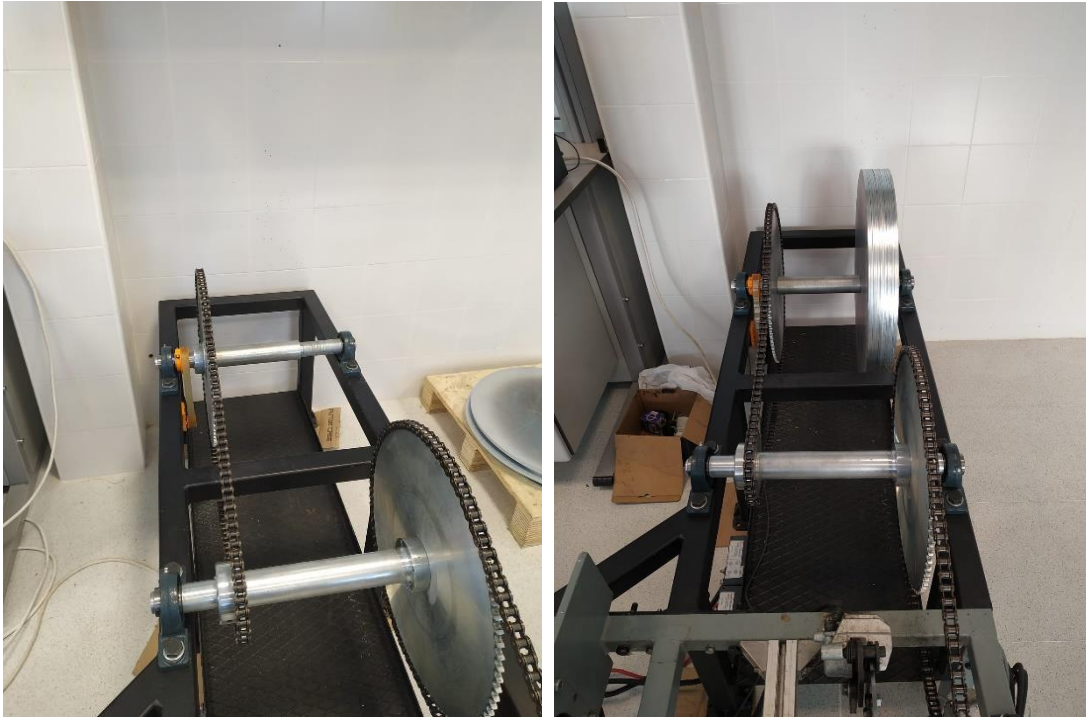
### 4.3 Aplicación del método

Una vez terminada la configuración de todos los sensores y controladores de LabView, se ha procedido a la realización de ensayos para la obtención de todos los parámetros que miden el comportamiento del motor. Se han realizado dos tipos de ensayos. En el primero de ellos se realizaban sucesivos arranques y paradas del motor, a modo de pulsos, mediante el acelerador, el cual está controlado por la tarjeta DAQ. En todos los ensayos se ha trabajado con un porcentaje del acelerador del 15%, lo cual corresponde con una señal de 0,69 V, puesto que la señal varía entre 0 V para el 0% de la posición del acelerador, y 4,6 V para el 100%.

El otro ensayo consiste en mantener un valor de aceleración constante del 15% y accionar de forma manual el freno mecánico del banco en sucesivas ocasiones, para comprobar cómo reaccionan el resto de los parámetros ante esta situación.

Adicionalmente, se ha cambiado la inercia del banco de ensayos mediante la adición de los discos de inercia desarrollados en [2], para comprobar cómo se modifican los parámetros del banco ante un aumento de la masa. El primer ensayo se llevó a cabo sin emplear ningún disco, mientras que en el segundo y tercer ensayo se usaron 7 y 13 discos, respectivamente.





a) Banco sin el volante de inercia

b) Banco con el volante de inercia

Figura 4.4. Evolución de la inercia del banco.

## 4.4 Tratamiento de datos

Una vez obtenidos los datos de los ensayos en archivos de texto LVM, pasamos a analizarlos en Matlab. Para ello, se ha desarrollado un *script* que recoge las distintas variables de la matriz de datos y las representa gráficamente.

Además, puesto que los datos obtenidos presentaban bastante ruido y algunos valores puntuales anómalos, fue necesario realizar un suavizado de los mismos. De los distintos comandos que existen en Matlab, se decidió emplear el denominado '*loess*', ya que fue el empleado por Galo Heredia en [3], además de ser sencillo de incorporar, flexible y cumplir con lo que buscábamos. A modo de ejemplo, en la Figura 4.5 se muestra la diferencia entre los valores de intensidad del campo brutos, y los valores tras aplicar el filtro.

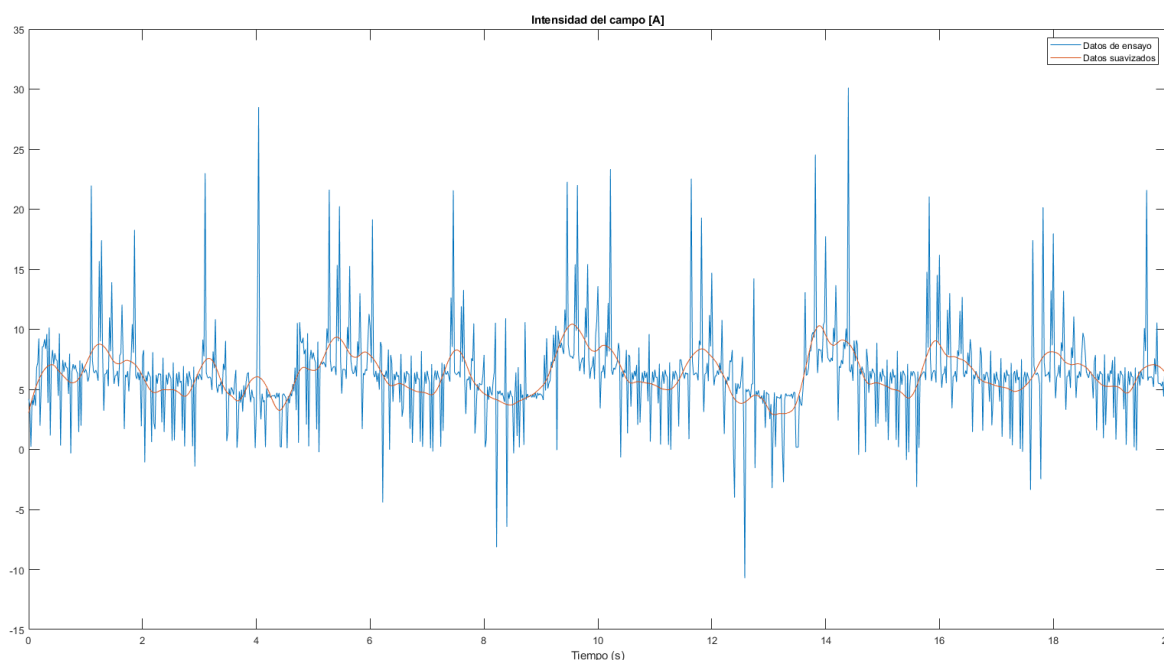


Figura 4.5. Filtrado de la intensidad mediante loess.

La simplificación del *script* desarrollado se muestra a continuación. Para ver el código original, ver ANEXO II. Scripts desarrollados. En primer lugar, en la ventana de comandos se cargan los datos del ensayo:

Cargar datos ('[Archivo.lvm](#)')

Lo siguiente es ejecutar el *script*:

graficas

**%Primero obtenemos las distintas variables de la matriz**

Valores de tiempo = Primera columna de datos

Valores de par = Segunda columna de datos

Valores de intensidad de campo = Tercera columna de datos

Valores de intensidad del motor = Cuarta columna de datos

Valores de voltaje del motor = Quinta columna de datos

Valores de voltaje del campo = Sexta columna de datos

Velocidad = Séptima columna de datos

Valores de aceleración = Octava columna de datos

**%Aplicamos el suavizado de la señal con un valor del 5%**

par = suavizado de los valores de par, tolerancia del 5%, filtro loess

ic = suavizado de los valores de intensidad del campo, tolerancia del 5%, filtro loess

im = suavizado de los valores de intensidad del motor, tolerancia del 5%, filtro loess

vm = suavizado de los valores de voltaje del motor, tolerancia del 5%, filtro loess

vc = suavizado de los valores de voltaje de campo, tolerancia del 5%, filtro loess

rads = suavizado de los valores de velocidad, tolerancia del 5%, filtro loess

**%Dibujamos las gráficas de las distintas variables en función del tiempo**

Dividimos el espacio en 3 filas y 2 columnas, y en el espacio 1: (2,3,1)

Dibujar(t,par)

```

Título('Par [N·m]')
Nombre de la variable x('Tiempo (s)')

En el espacio 2: subplot(2,3,2)
Dibujar(t,ic)
Título('Intensidad del campo [A]')
Nombre de la variable x ('Tiempo (s)')

En el espacio 3: subplot(2,3,3)
Dibujar (t,im)
Título ('Intensidad del motor [A]')
Nombre de la variable x ('Tiempo (s)')

En el espacio 4: subplot(2,3,4)
Dibujar (t,vm)
Título ('Voltaje del motor [V]')
Nombre de la variable x ('Tiempo (s)')

En el espacio 5: subplot(2,3,5)
Dibujar (t,vc)
Título ('Voltaje del campo [V]')
Nombre de la variable x ('Tiempo (s)')

En el espacio 6: subplot(2,3,6)
Dibujar (t,rads)
Título ('Velocidad [rad/s]')
Nombre de la variable x ('Tiempo (s)')
    
```

Una vez realizado el procesado de datos de los distintos ensayos, se han representado los resultados de cada variable en una misma gráfica, de forma que se puedan apreciar los efectos del aumento de inercia del sistema (Figura 4.7).

A continuación, se muestran los valores de aceleración empleados en los ensayos. Su amplitud tiene un valor de 15, con un período de 6,5 segundos (3 segundos con un valor del 15% y 3,5 segundos con un valor del 0%) y un ancho de pulso de 3 segundos, a excepción del último pulso, el cual tiene una duración de 6 segundos.

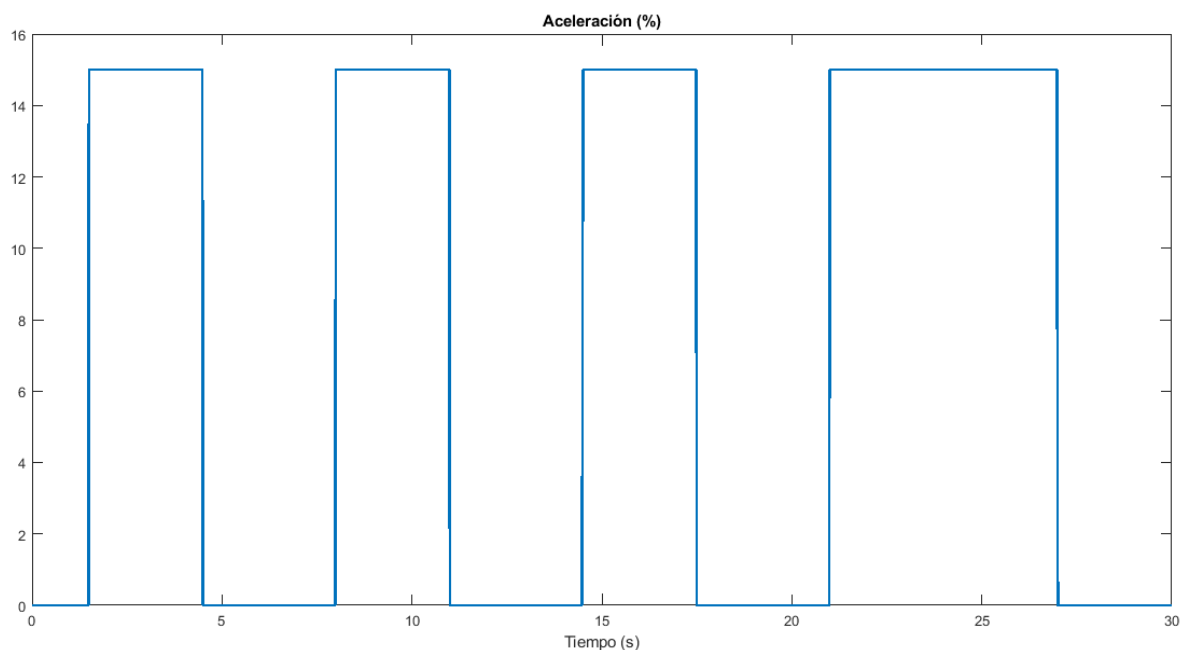
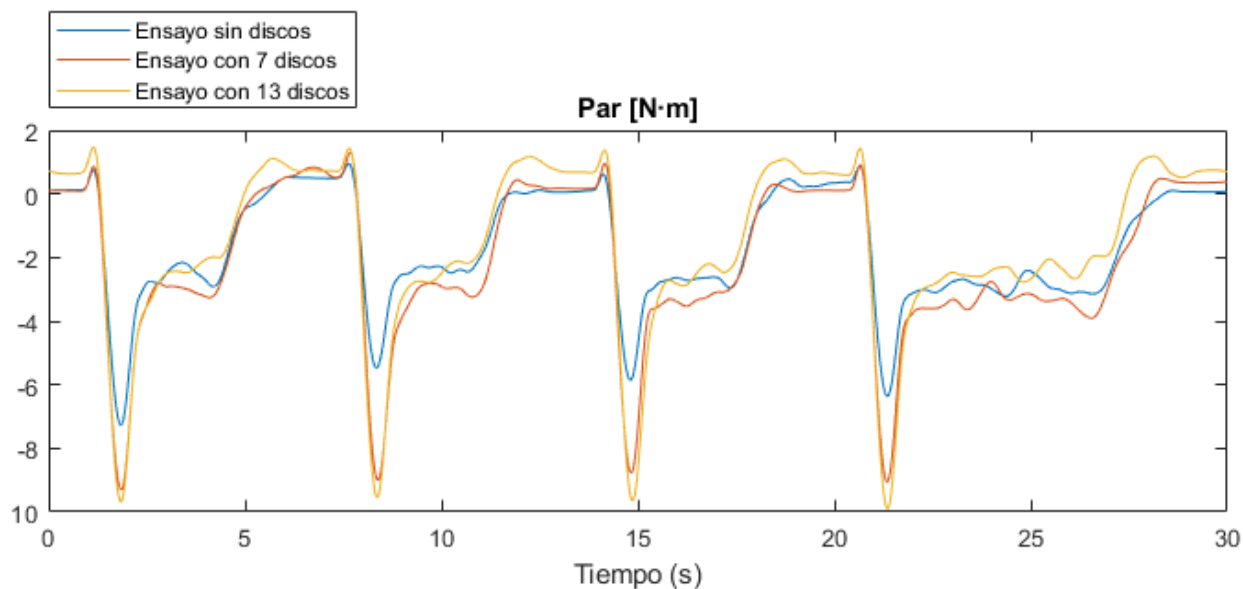
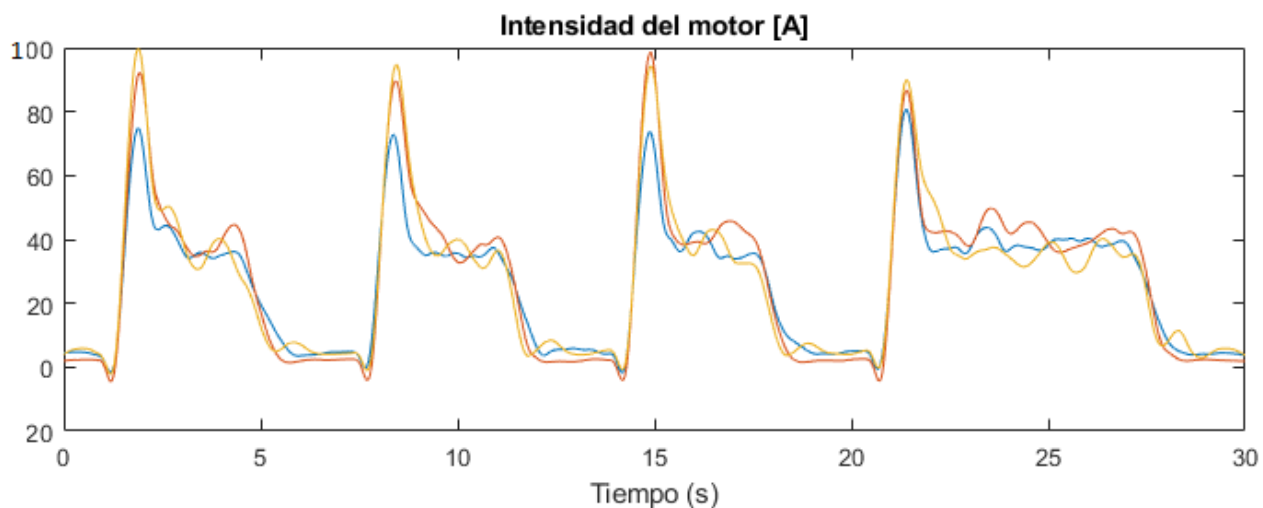


Figura 4.6. Valores de aceleración empleados en los ensayos.

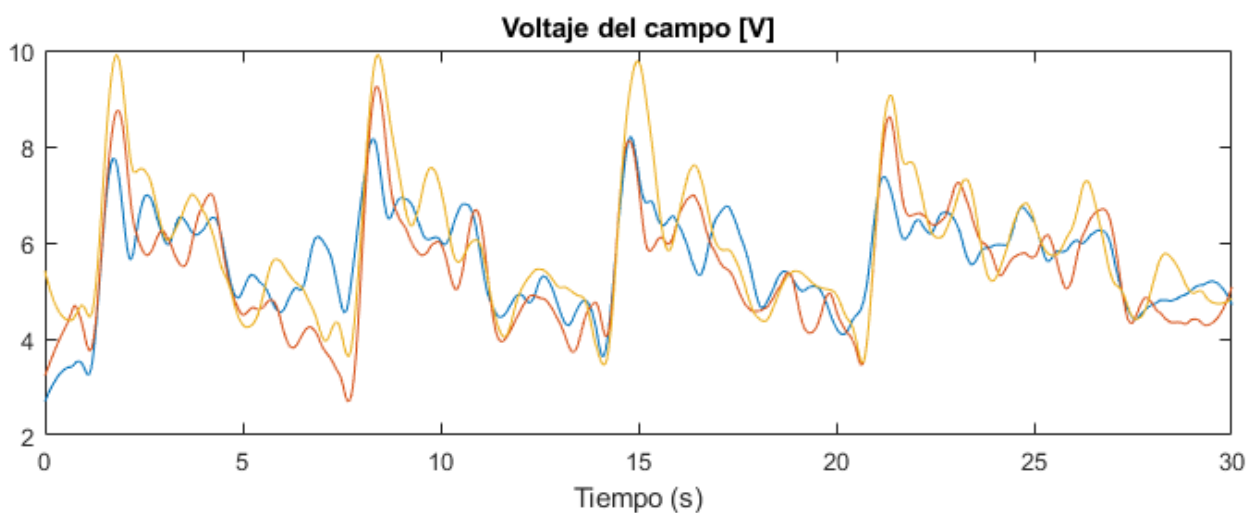
Para cada valor de inercia se han realizado diversos ensayos. Posteriormente, se ha analizado cada archivo de datos de manera individual y se ha seleccionado el que presentaba mejores resultados. Para mejorar aún más los datos obtenidos, se podría realizar un análisis estadístico que calculase los valores medios para cada punto de distintos análisis en las mismas condiciones. Así, se reducirían los errores puntuales existentes en cada ensayo y se obtendrían valores más cercanos a los reales.



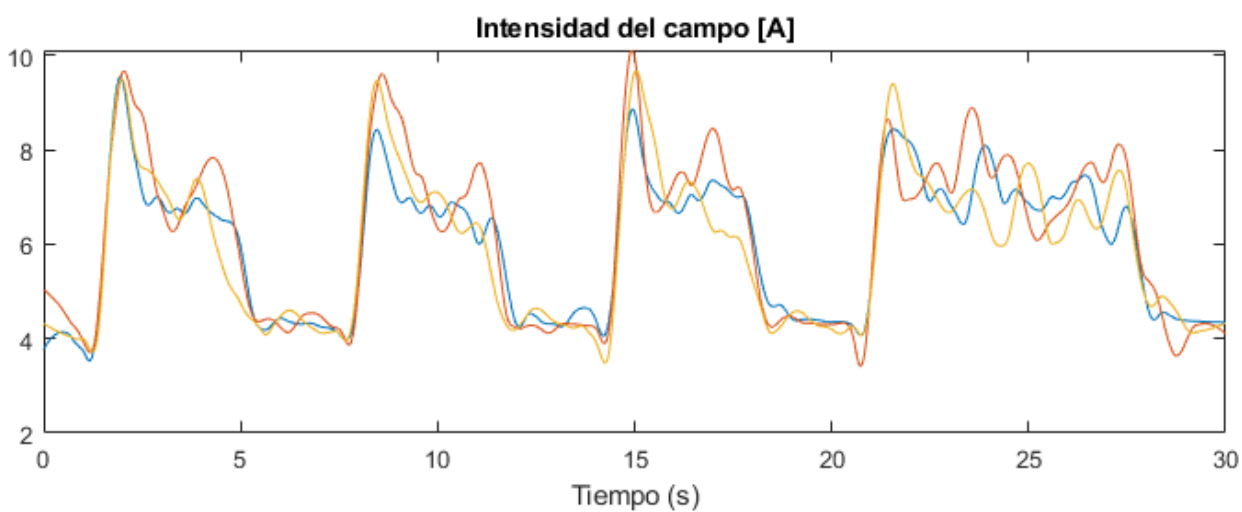
a) Valores de par



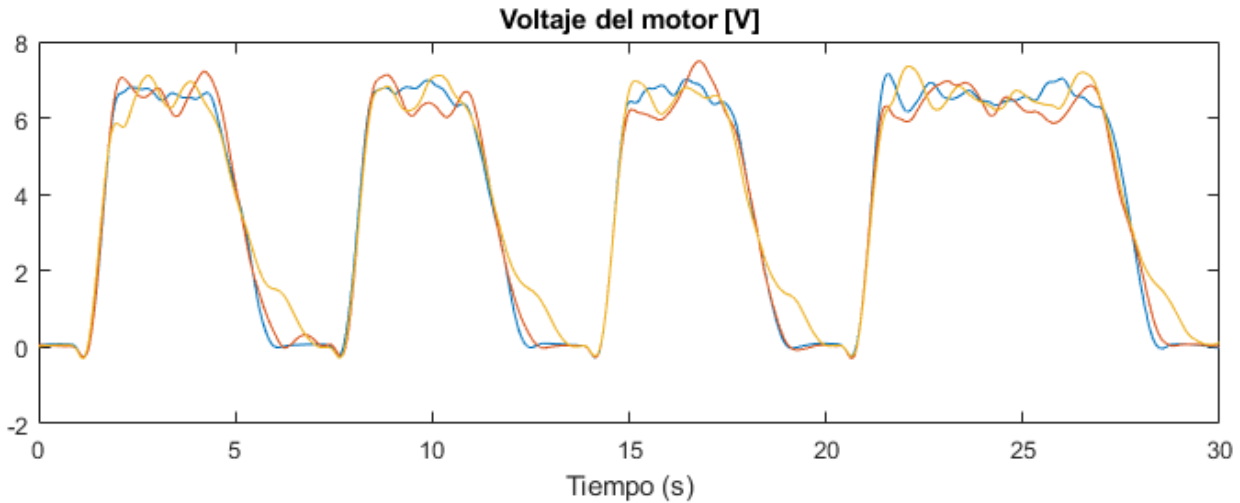
b) Valores de intensidad del motor



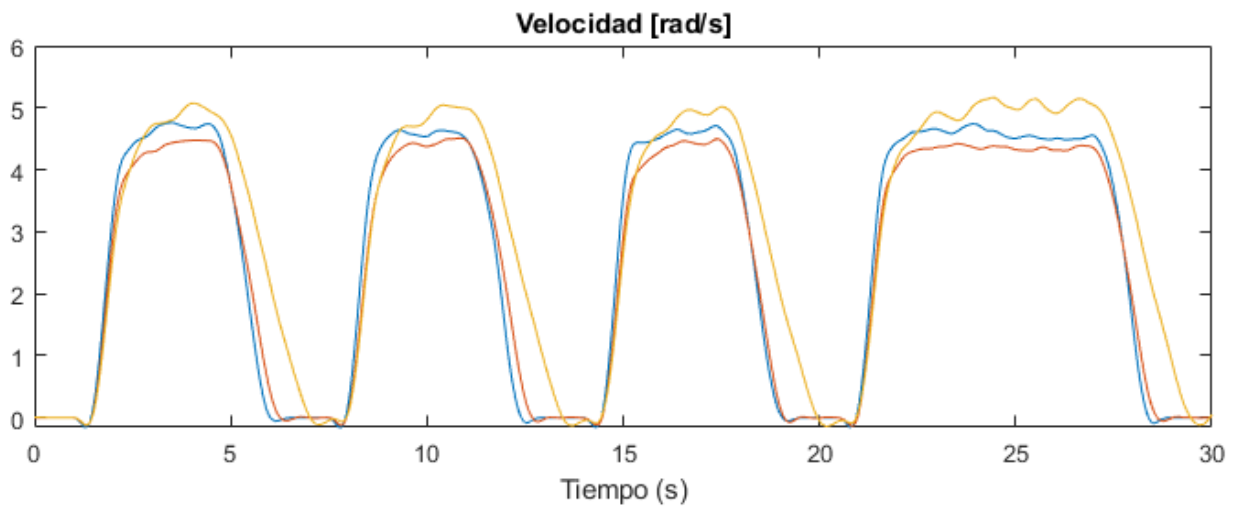
c) Valores de voltaje del campo



d) Valores de intensidad del campo



*e) Valores de voltaje del motor*



*f) Valores de velocidad*

*Figura 4.7. Ensayos realizados en el banco.*

Se puede apreciar cómo, ante un aumento de la carga, los valores de la mayoría de los parámetros aumentan, tal y como era de esperar (por ejemplo, con valores pico más altos en los arranques, y con la necesidad de una mayor cantidad de tiempo hasta que el sistema se detiene). Sin embargo, hay algunos valores que no se ajustan a lo que esperábamos, como ocurre con los valores de par, que al inicio del ensayo deberían de tener un valor constante de cero. Se atribuye la causa de este fenómeno a la presencia de ruido en la señal. Si bien no es determinante para la etapa de identificación, se propone el tratamiento de otros tipos de filtros para reducirlo.

Por lo demás, se considera que los resultados obtenidos se ajustan correctamente a los valores reales del sistema, síntoma de que todos los sensores funcionan de forma adecuada.

## 4.5 Identification Toolbox de Matlab

El siguiente paso era obtener las funciones de transferencia que definen el comportamiento de nuestro sistema. Para ello, se hizo uso de la *System Identification Toolbox* de Matlab, la cual permite obtener modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada-salida medidos. En nuestro caso, usaremos datos de entrada y salida del dominio del tiempo. La toolbox realiza la identificación de sistemas de caja gris para estimar los parámetros de un modelo definido por el usuario.

Para ejecutarlo, escribimos `systemIdentification` en la ventana de comandos de Matlab, y nos aparecerá la siguiente pestaña.

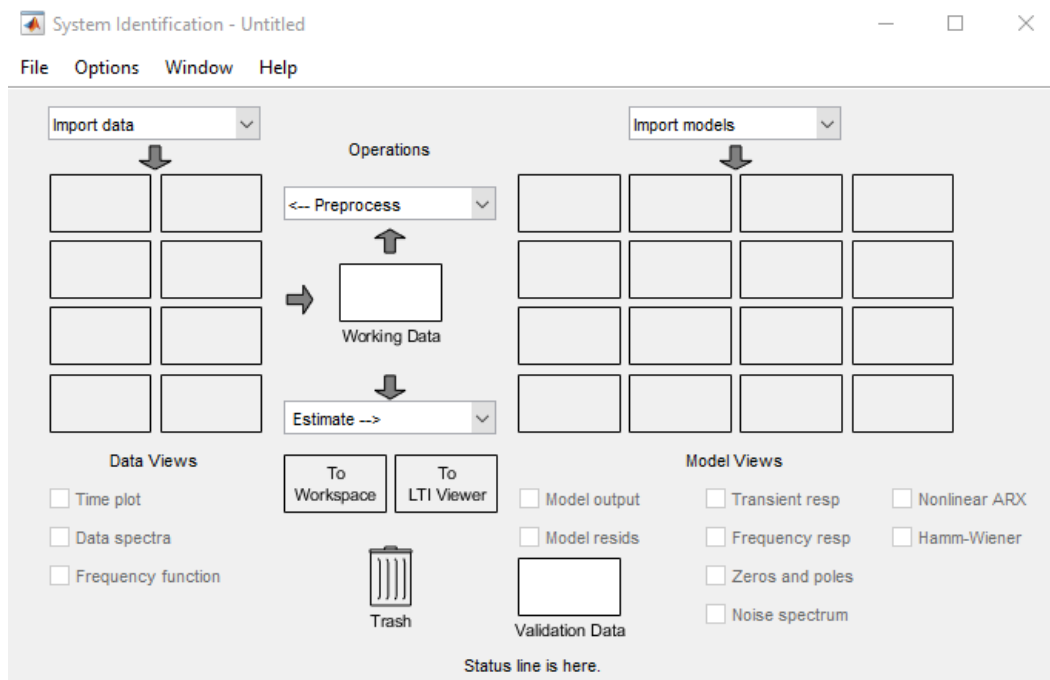


Figura 4.8. Panel principal de la *System Identification Toolbox* de Matlab.

En la parte superior izquierda hay una pestaña para importar datos. Hay que seleccionar una variable de entrada, otra de salida y, puesto que trabajamos con datos en el dominio del tiempo, es necesario indicar el tiempo de inicio (en nuestro caso será siempre 0) y el intervalo de muestreo (tendrá un valor de 0.02 segundos para nuestros ensayos, ya que para todos los sensores se ha establecido una frecuencia de muestreo de 50 Hz). Los datos del propio ensayo se emplearán como datos de validación.

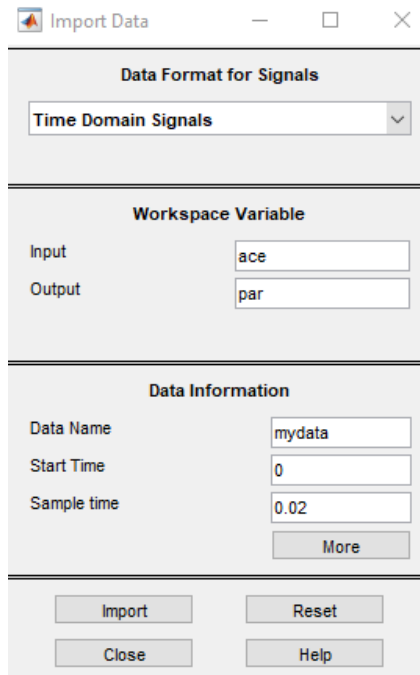


Figura 4.9. Pestaña para la importación de datos en el dominio del tiempo.

Puesto que se trata de un modelado de caja negra, introducimos unos datos de entrada (los valores de aceleración) y unos de salida (en este ejemplo, los valores de par). Repitiendo estos pasos con las distintas variables, se obtiene un modelado SIMO (Single input, multiple output), ya que ante un valor de aceleración podremos obtener todas las variables medidas en el banco de ensayos.

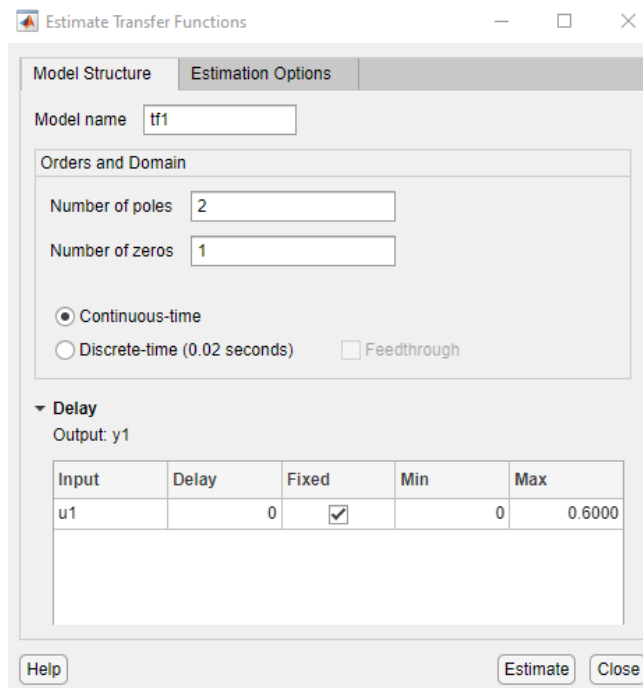


Figura 4.10. Configuración de la primera pestaña de la función de transferencia.



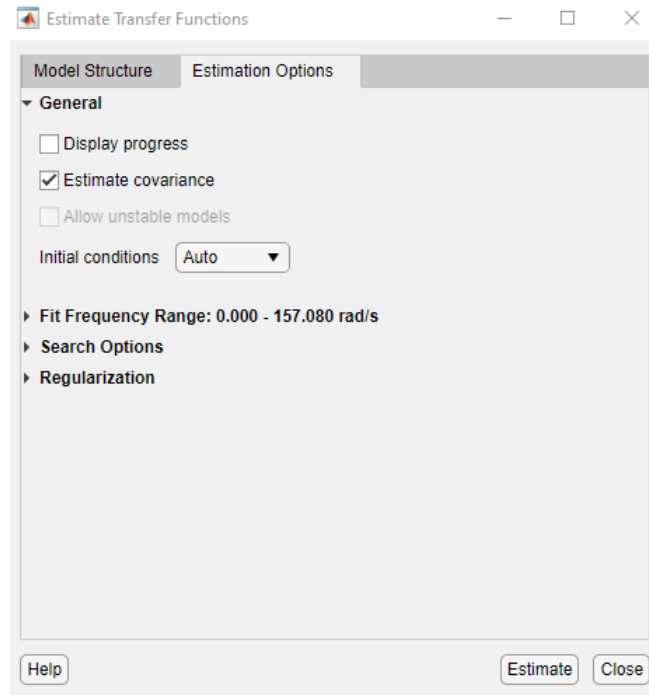


Figura 4.11. Configuración de la segunda pestaña de la función de transferencia.

A continuación, en la pestaña *Estimate* realizamos la configuración de la función de transferencia:

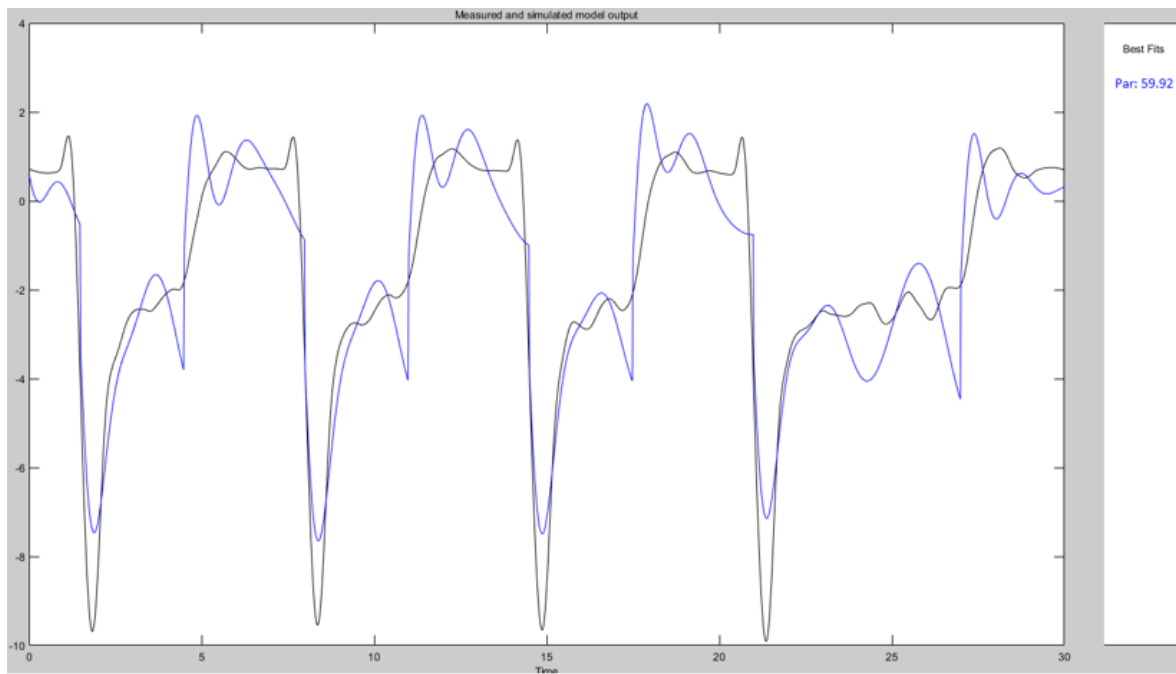
- Número de polos y ceros: El número de polos y ceros equivalen al orden del denominador y del numerador, respectivamente. Para modelos de tiempo continuo, el número de ceros debe ser menor o igual al número de polos.
- Tiempo continuo y tiempo discreto: Permite elegir entre estimar una función de transferencia de tiempo continuo o discreto. Si se elige la de tiempo discreto, se empleará un intervalo de muestra igual al de los datos. En nuestro caso, elegiremos siempre el tiempo continuo ya que nos ofrece mejores resultados.
- Retardo entrada-salida: Este valor está marcado como cero de forma predeterminada, y puesto que la respuesta de nuestro sistema se considera inmediata, será el valor empleado para las estimaciones. La casilla '*Fixed*' permanecerá activa para todos los ensayos, ya que de esta forma los resultados obtenidos son más suaves y se ajustan mejor a los datos de validación.

En la pestaña *Estimation Options*:

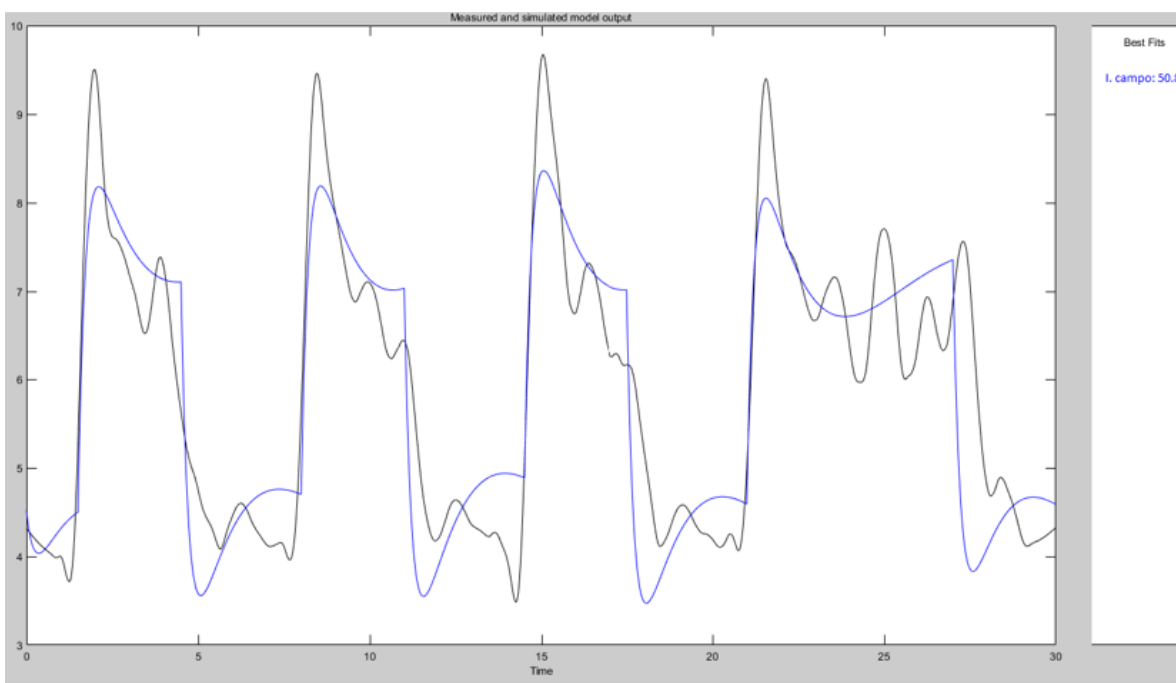
- Condiciones iniciales: Sirve para indicar cómo deben manejarse las condiciones iniciales durante la estimación. La opción predeterminada es '*Auto*' y se empleó en los ensayos en los que los valores iniciales de los datos eran distintos de cero. En caso contrario, se establece como condición inicial la opción '*Zero*', ya que con esta configuración se obtienen mejores resultados.

El resto de los parámetros que no se han mencionado, se dejaron de forma predeterminada, ya que se comprobó que no influían significativamente en el resultado de las estimaciones.

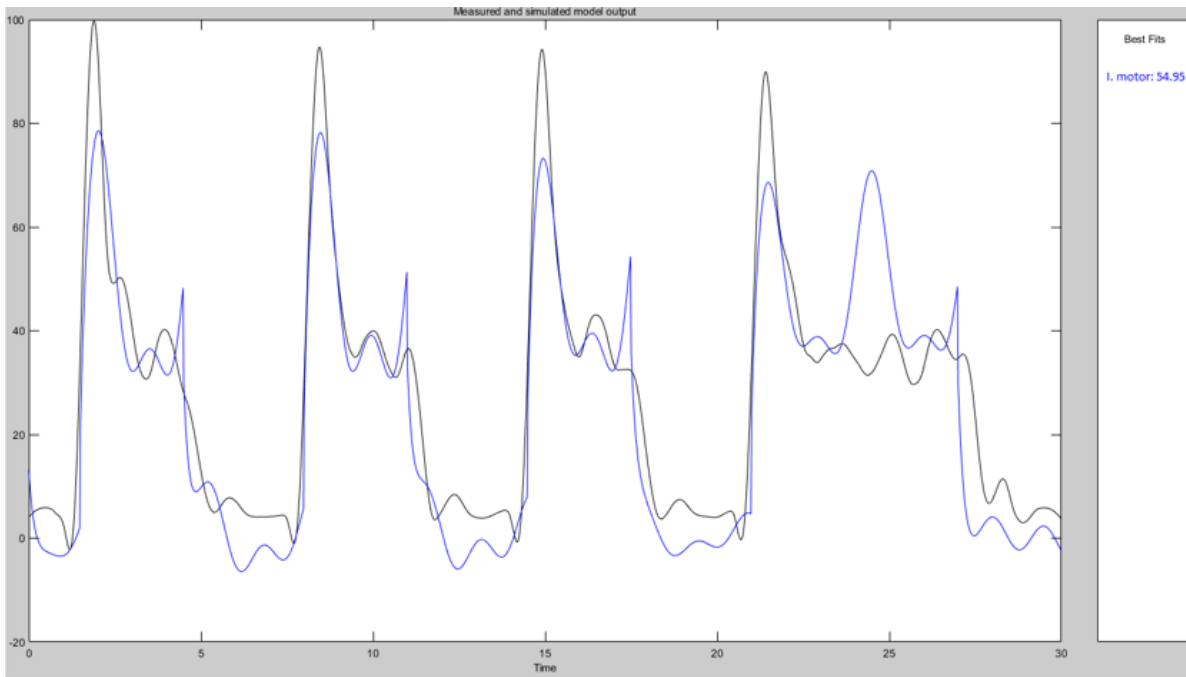
El siguiente paso fue realizar numerosas estimaciones hasta encontrar el modelo que mejor se ajustase a cada parámetro. A continuación, se muestra a modo de ejemplo las estimaciones finales obtenidas para cada parámetro en el ensayo con todos los discos de inercia instalados en el banco. En negro se muestran los datos medidos en los ensayos y en azul la estimación obtenida por la función de transferencia.



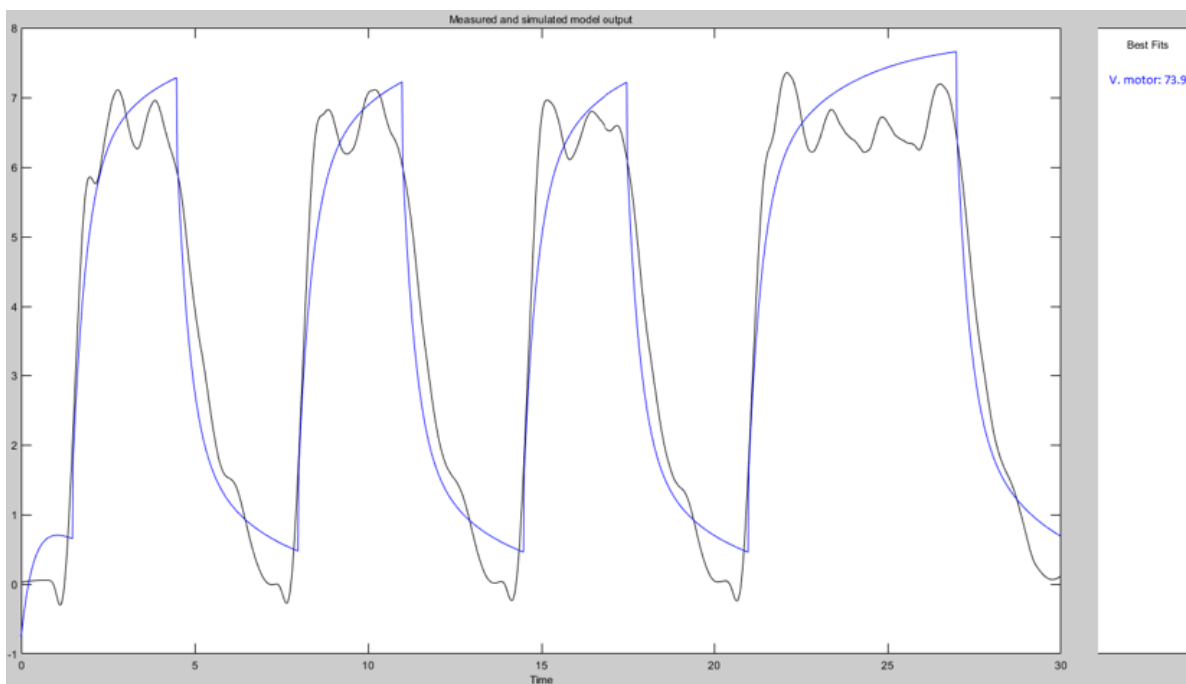
a) Estimación del par



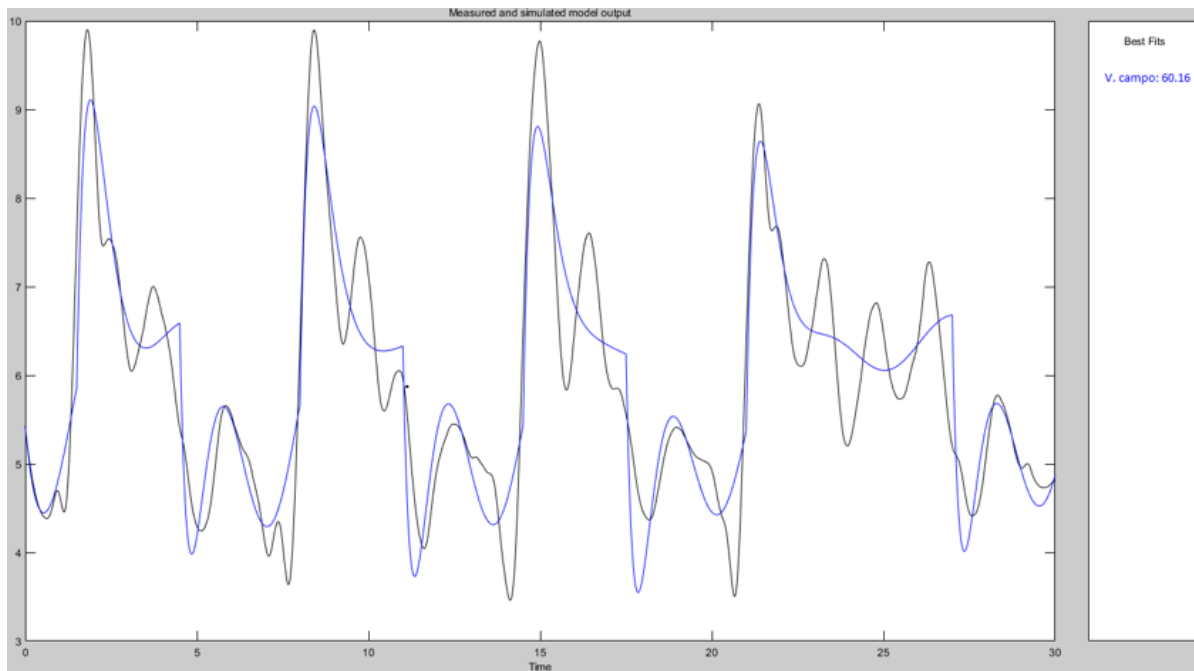
b) Estimación de la intensidad del campo



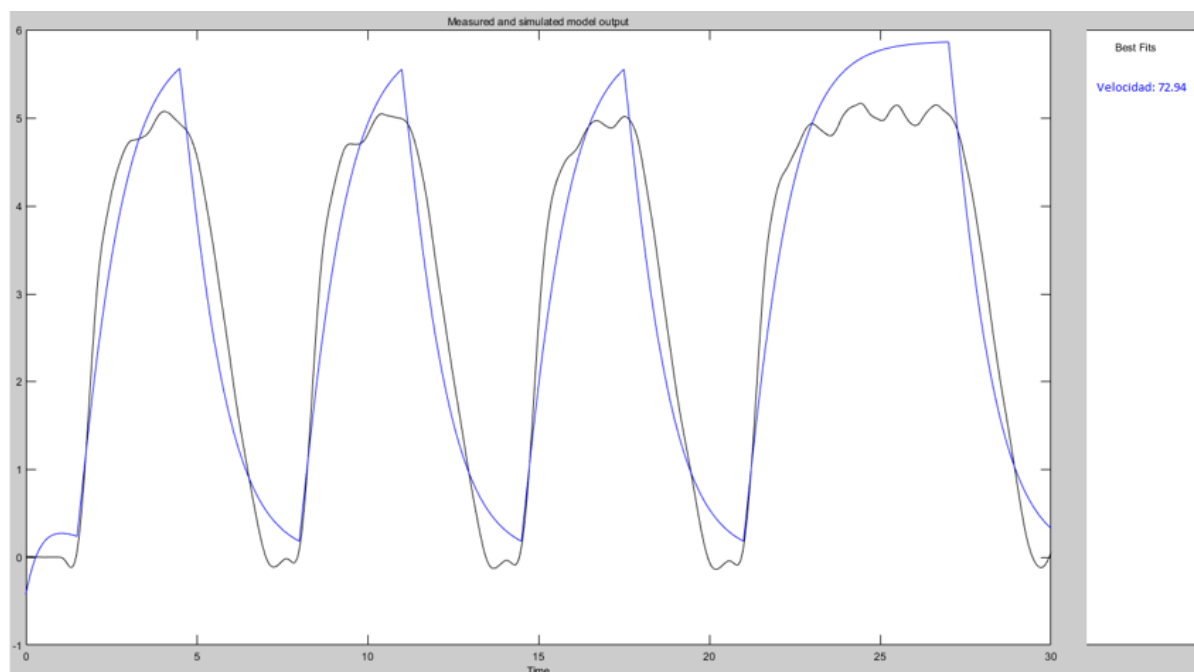
c) Estimación de la intensidad del motor



d) Estimación del voltaje del motor



*e) Estimación del voltaje del campo*



*f) Estimación de la velocidad*

*Figura 4.12. Estimaciones de los distintos parámetros del motor.*

A la derecha de cada gráfica aparece la variable representada junto con el porcentaje de aproximación respecto de los valores de referencia. Se observa claramente como en las variables que presentan pocas oscilaciones, tales como el voltaje del motor y la velocidad, el porcentaje de ajuste es relativamente alto (más de un 70%), pudiendo realizar el ajuste con una función de 2 polos y 1 cero. Sin embargo, en el resto de las variables aparecen en los arranques valores pico muy altos que dificultan el ajuste, con porcentajes que oscilan entre el 50 y el 60%, y la necesidad de emplear funciones de transferencia con unos 5 o 6 polos, y aproximadamente la misma cantidad de ceros. Por otro lado, hay que tener en cuenta que los datos de validación no son exactamente los valores reales del banco, ya que se les ha aplicado un filtro para reducir el ruido, hecho que puede influir ligeramente en el ajuste.

En caso de querer obtener con mayor precisión los valores pico que se producen en el arranque (por ejemplo, el consumo de corriente) se puede tener en cuenta que los valores de estimación son siempre ligeramente inferiores a los reales. Multiplicando el valor estimado por un coeficiente, se podría obtener un valor bastante más aproximado al real, de forma que pudiésemos equipar al banco con los equipos necesarios para trabajar en esas condiciones.

El siguiente paso es obtener los coeficientes de cada función de transferencia. Una vez realizada la estimación, Matlab nos proporciona la siguiente información:

```

From input "u1" to output "y1":
-0.1539 s^6 - 1.315 s^5 - 22.26 s^4 - 35.33 s^3 - 374 s^2 - 166.1 s - 1036
-----
      s^6 + 6.452 s^5 + 89.67 s^4 + 133.7 s^3 + 1495 s^2 + 451.3 s + 4807
Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 6   Number of zeros: 6

  Number of free coefficients: 13
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 62.82% (stability enforced)
FPE: 0.4441, MSE: 0.4364

% Details about Estimation Data
% Import  mydata

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.InitialCondition = 'zero';

tf1 = tfest(mydata, 6, 6, Options)

Par = tf1 % Rename
    
```

Conocida la función de transferencia que define el comportamiento del par, pasamos a incluirla en Simulink.

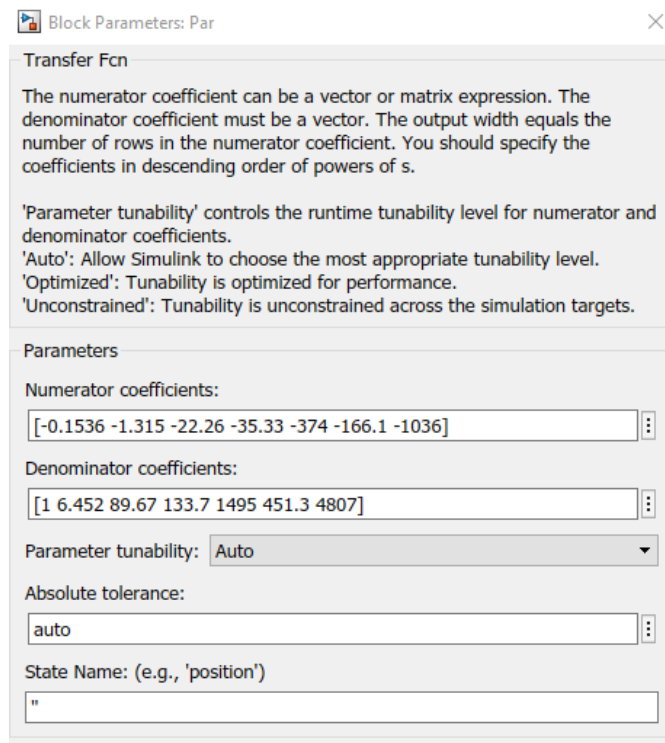


Figura 4.13. Configuración de la función de transferencia del par.

Repetimos este proceso para las seis variables de cada ensayo, con los tres ensayos distintos que se han llevado a cabo, y obtenemos el siguiente resultado:

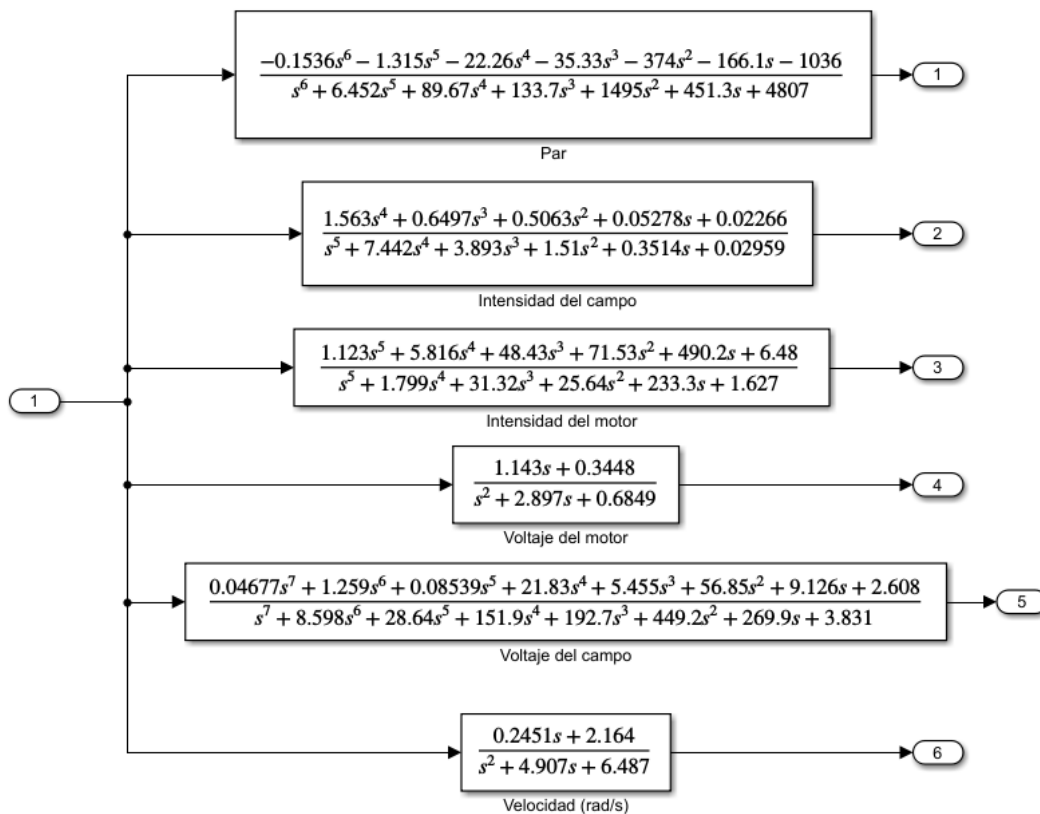


Figura 4.14. Funciones de transferencia para el ensayo sin discos.

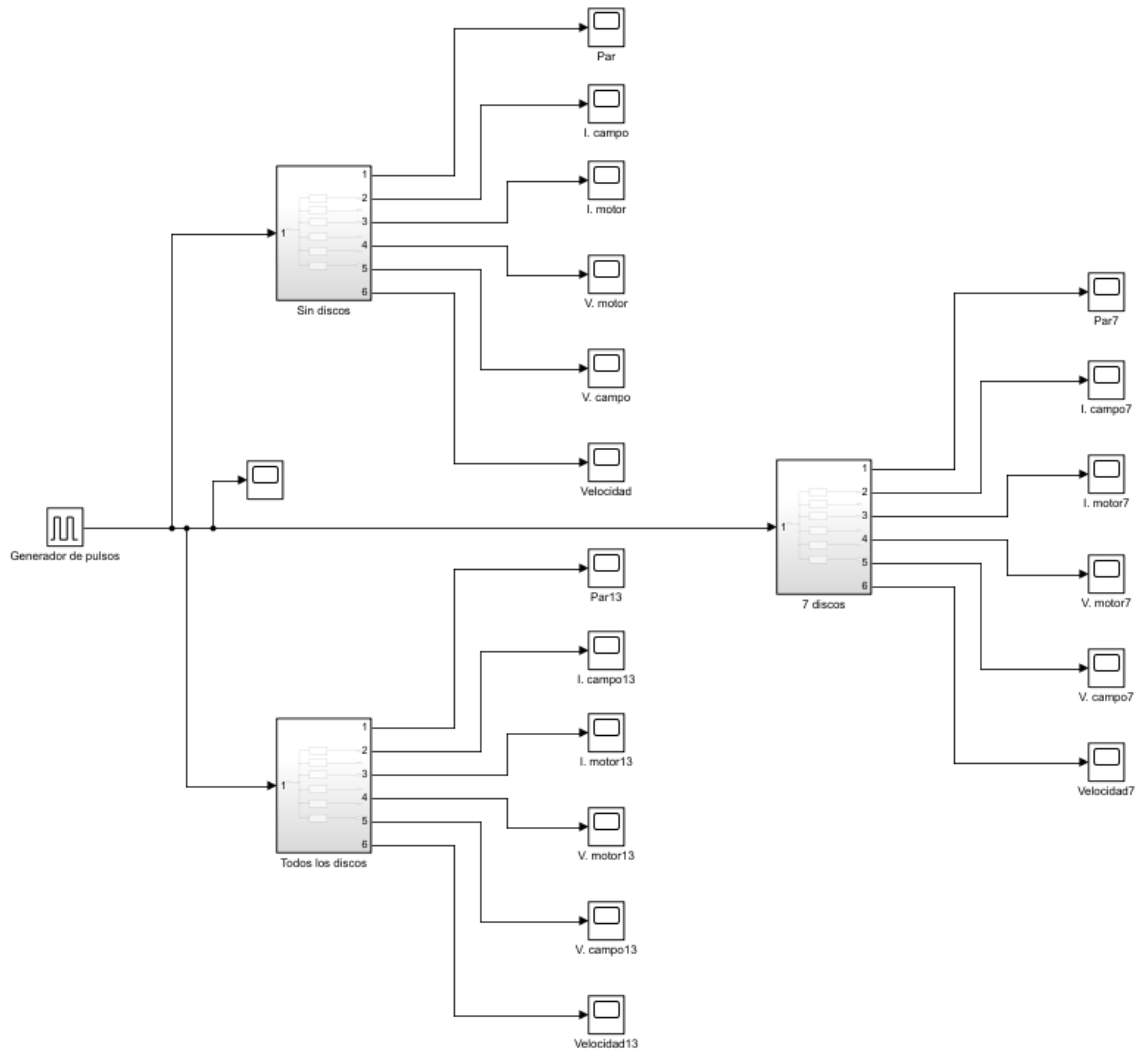


Figura 4.15. Panel del modelado SIMO del banco de ensayos.

Se aprecia claramente como hay una única entrada para todo el sistema, y múltiples parámetros de salida. Para recrear con la mayor fidelidad posible los ensayos realizados en el laboratorio de la universidad, se ha empleado como entrada un generador de pulsos que imite los arranques y paradas del motor. En la Figura 4.16 se muestra la ventana de configuración del bloque.

- **Amplitud:** Especifica la amplitud de la señal.
- **Período:** En nuestro caso, se especifica en segundos. Este valor indica el tiempo transcurrido entre cada pulso. Hay que sumar los 3 segundos en los que se mantiene una aceleración constante, y los 3,5 segundos en los que el motor se para.
- **Ancho de pulso (% del período):** Es el porcentaje del período de pulso en el que la señal se encuentra activa. En nuestro caso serían 3 segundos sobre el total del período, que es 6,5 segundos, por lo que tenemos un porcentaje del 46,15%.
- **Retardo de fase:** Retraso antes de que se genere el pulso, especificado en segundos. Para nuestros ensayos, tendrá un valor de 1,5 segundos.

En los ensayos realizados en el laboratorio, se realizaba un pulso final mantenido durante 6 segundos. Este aspecto no fue posible replicarlo en los ensayos de Simulink, pero los resultados son igualmente válidos.

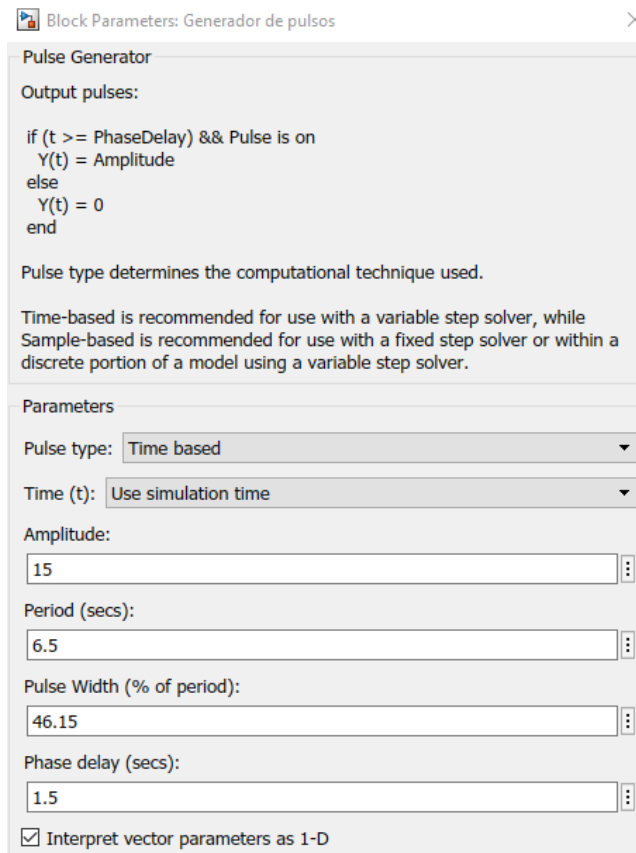


Figura 4.16. Configuración del generador de pulsos.

A continuación, se muestra a modo de ejemplo los valores obtenidos por el modelo para el consumo de intensidad del motor, Figura 4.18, y los datos del par en el ensayo sin discos, en la Figura 4.17. Vemos como estos valores se ajustan con bastante precisión a los medidos en el banco de ensayos, por lo que cumplen con el objetivo de modelado propuesto.



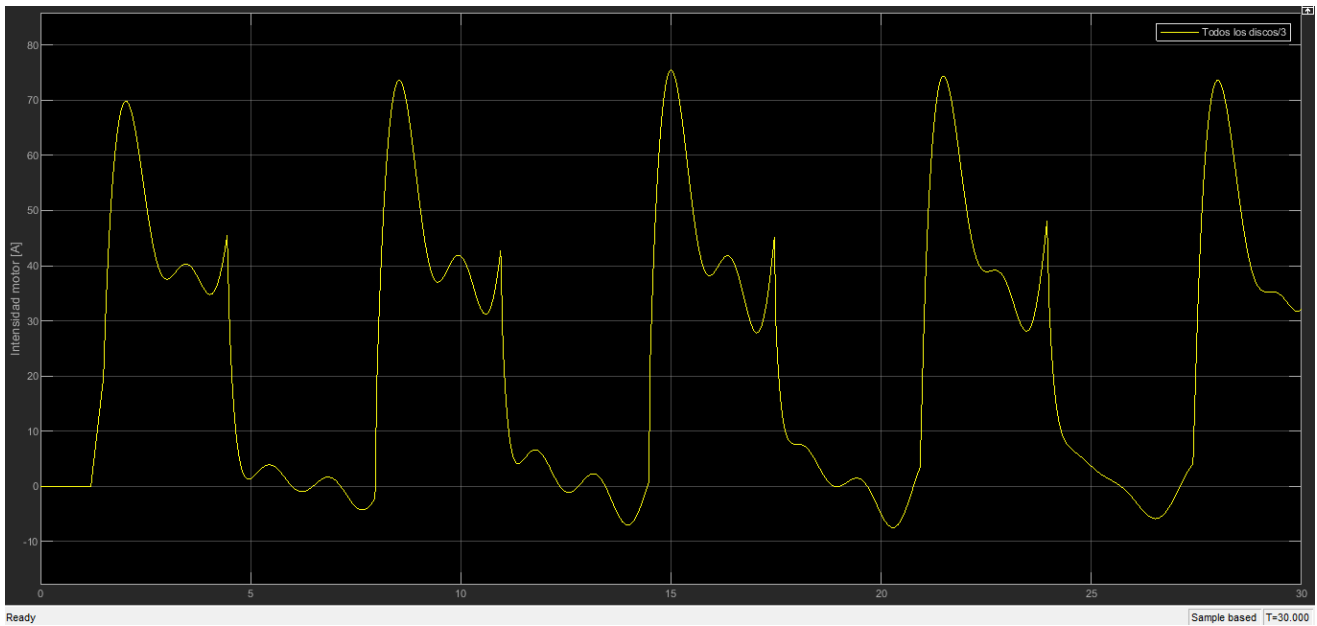


Figura 4.18. Valores de intensidad del motor para el ensayo con todos los discos proporcionados por el modelo.

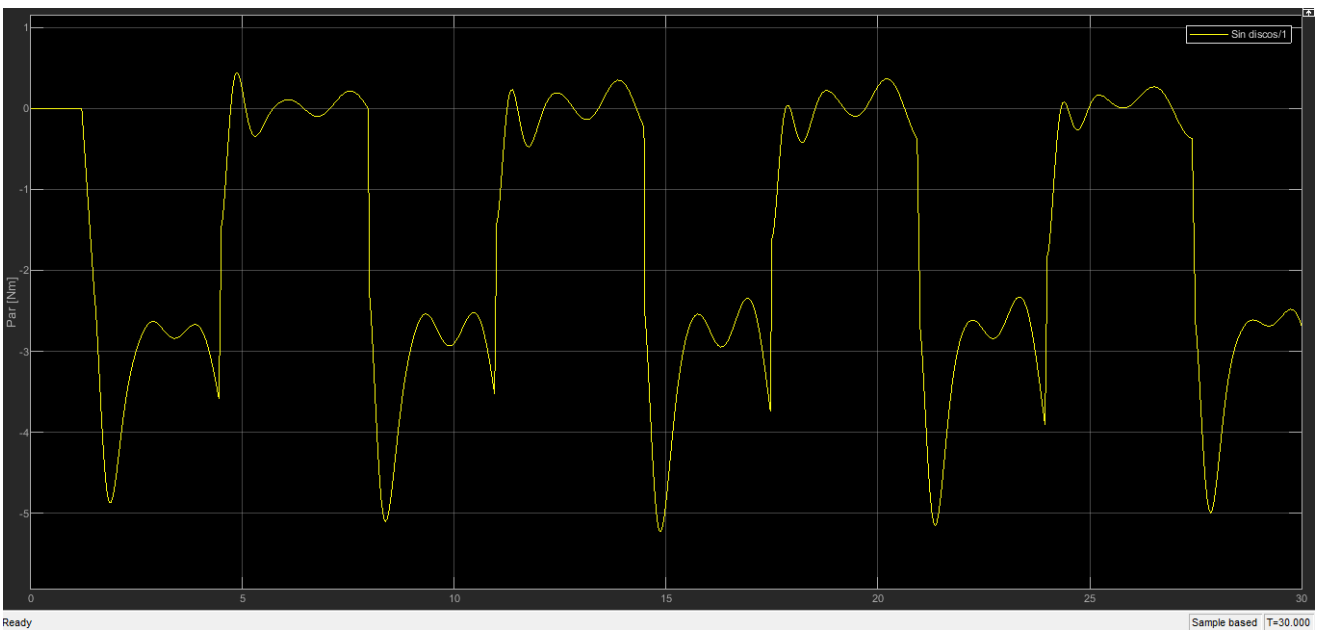
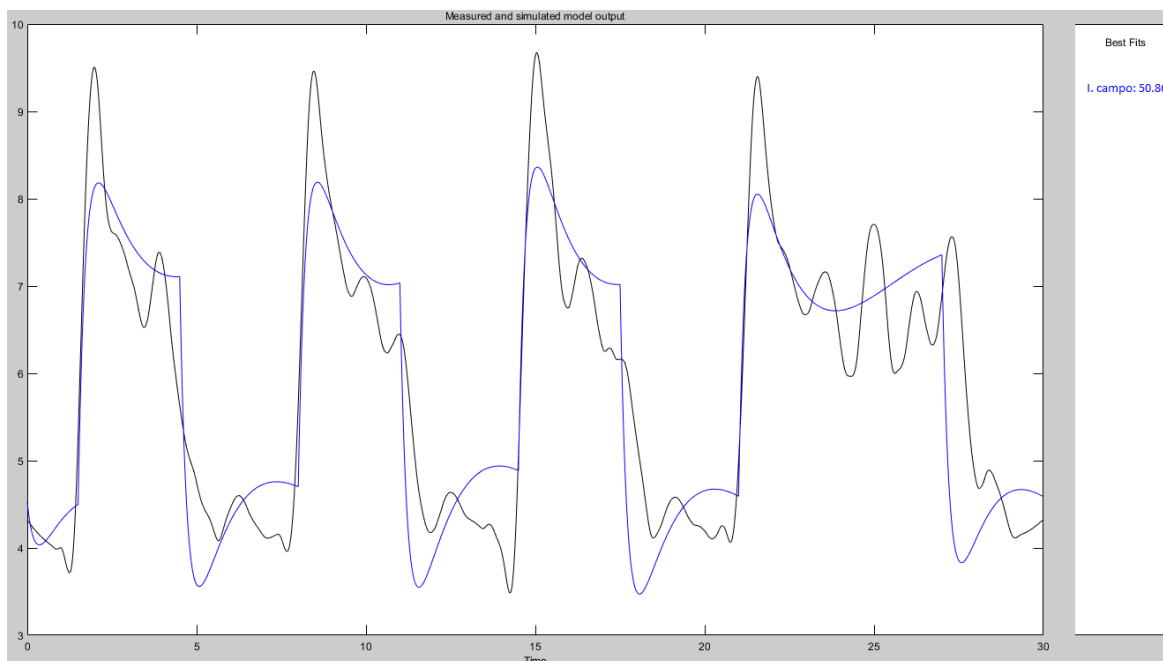
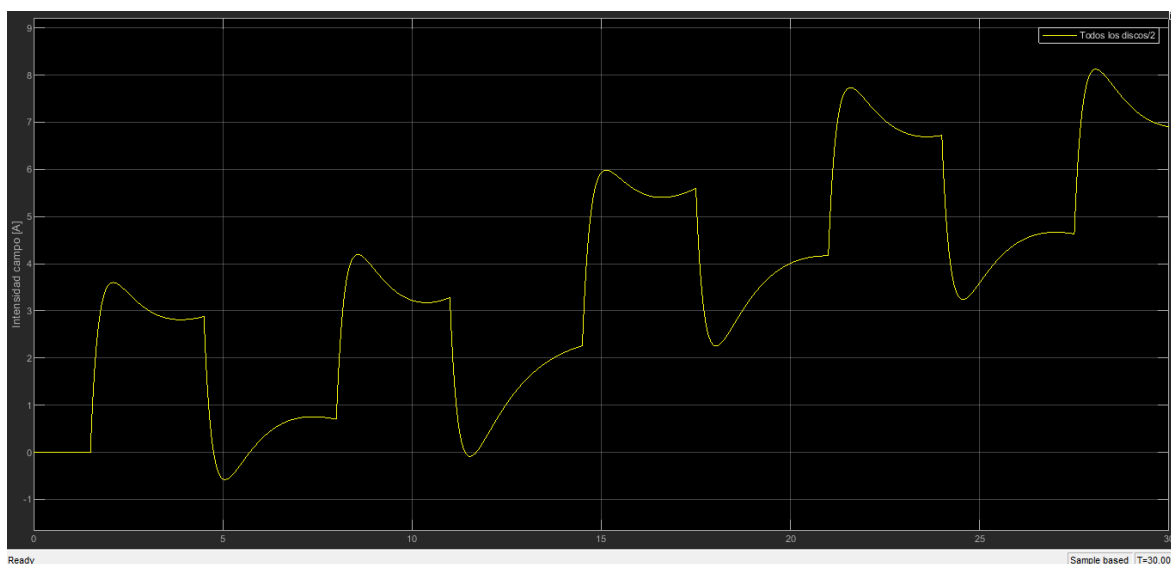


Figura 4.17. Valores de par para el ensayo sin discos proporcionados por el modelo.

Sin embargo, ha habido una variable, la intensidad de campo, que ha resultado difícil de modelar desde el primer momento, ya que las funciones de transferencia estimadas por Matlab se ajustaban peor que para el caso de otras variables, a lo que se sumaba el hecho de que una vez incluida la función de transferencia en Simulink, el comportamiento que presentaba era distinto al previsto. Es posible que se deba a que el valor real de intensidad comienza en 4 amperios, en lugar de en 0, y en Simulink no se da esta circunstancia.



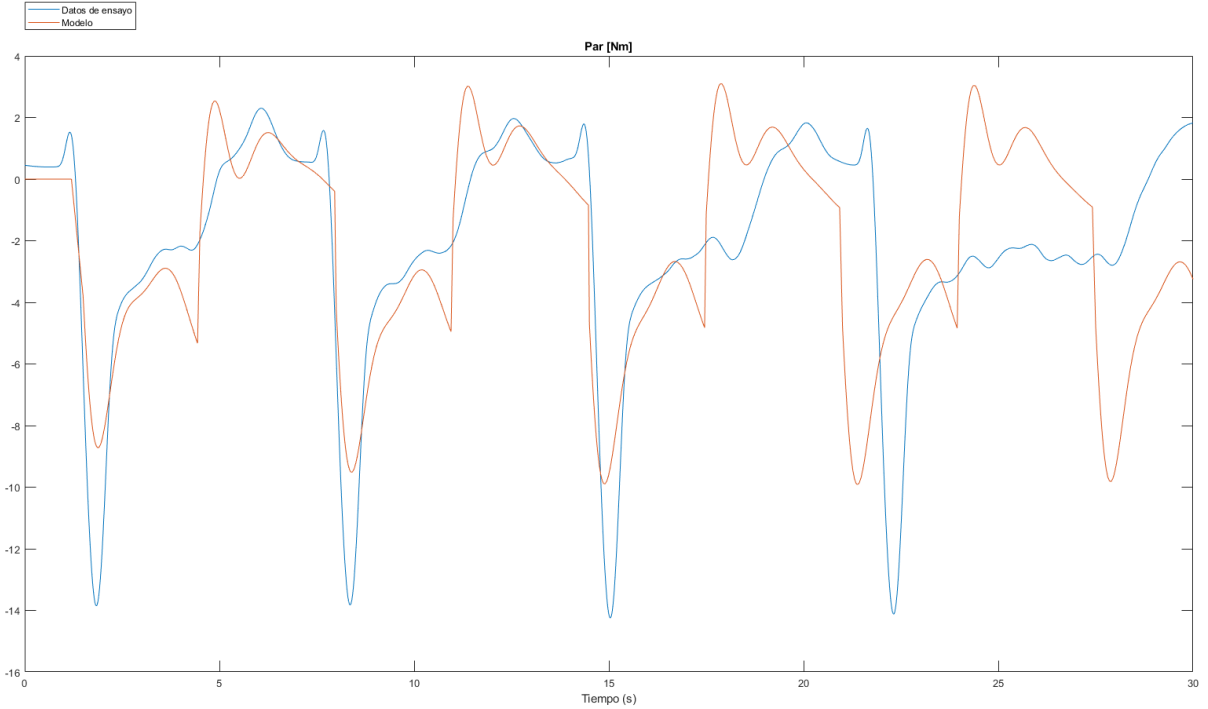
a) Estimación de la intensidad del campo para el ensayo con todos los discos



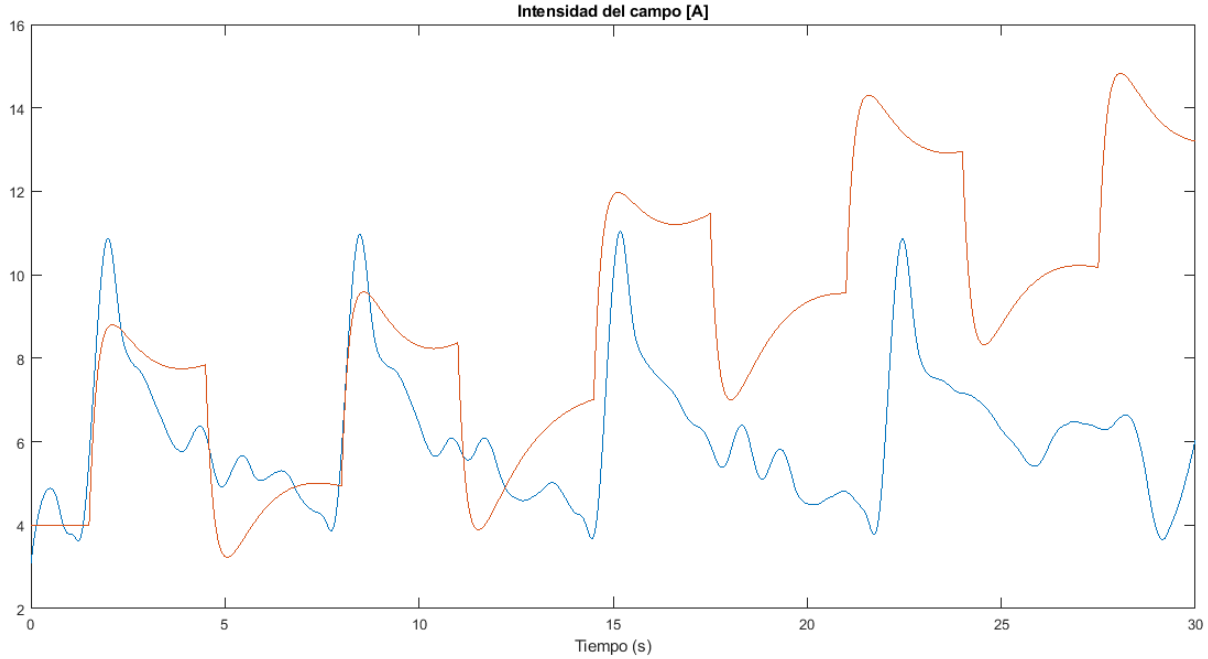
b) Valores de intensidad de campo proporcionados por el modelo

Figura 4.19. Comparación entre los valores obtenidos en Matlab y en Simulink.

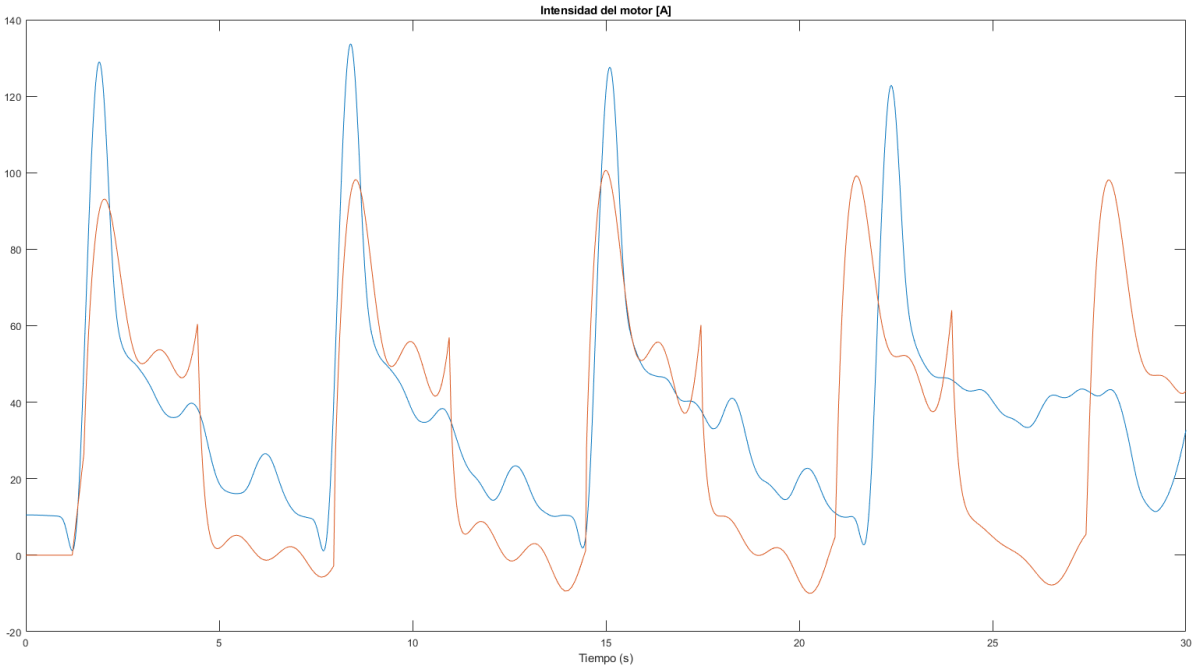
Para comprobar la validez del modelo, se han realizado más ensayos en el banco para comprobar cómo de bien se ajusta el modelo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de forma experimental y con el modelo para un ensayo con un porcentaje del acelerador del veinte por ciento.



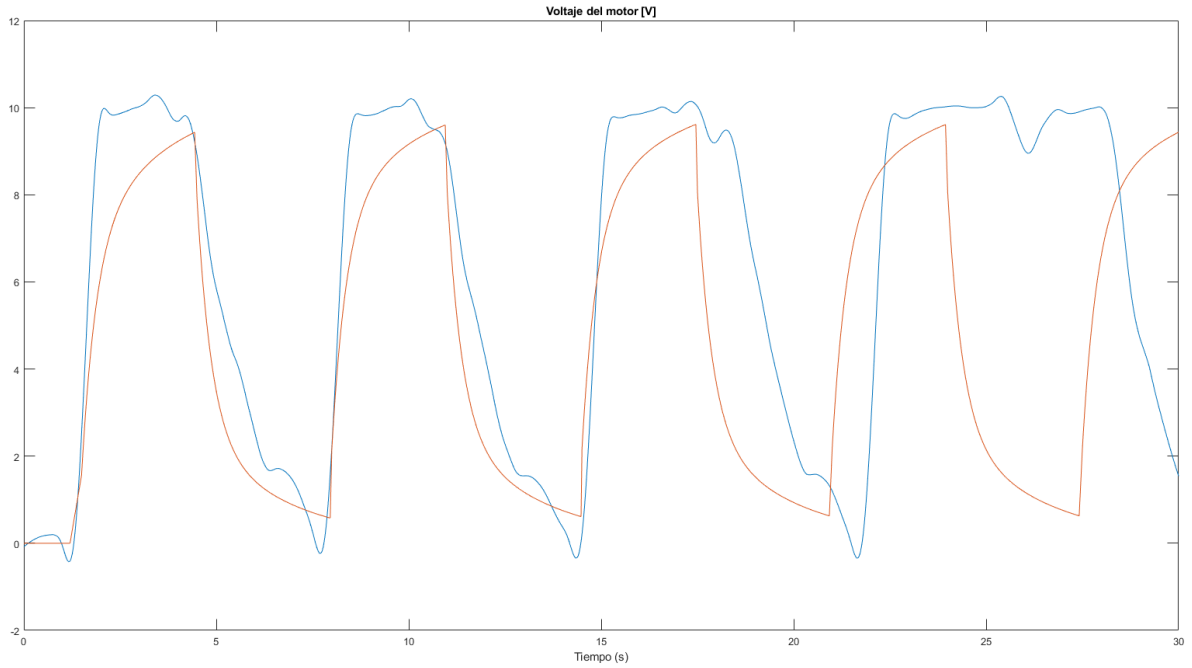
a) Valores de par



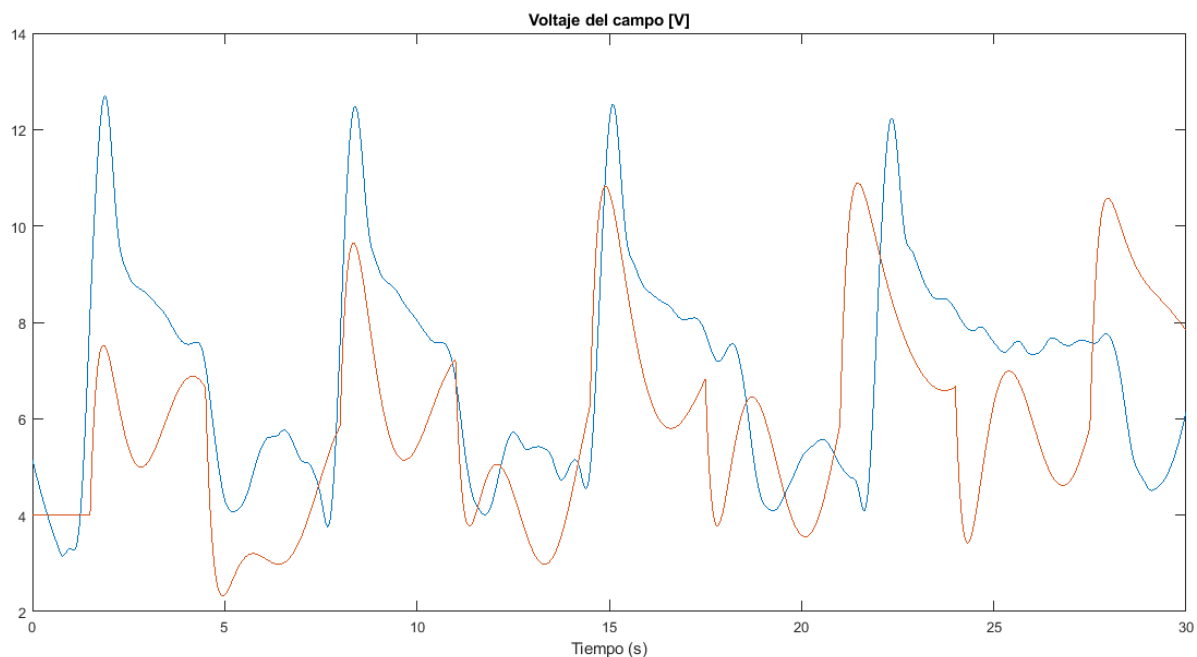
b) Valores de intensidad del campo



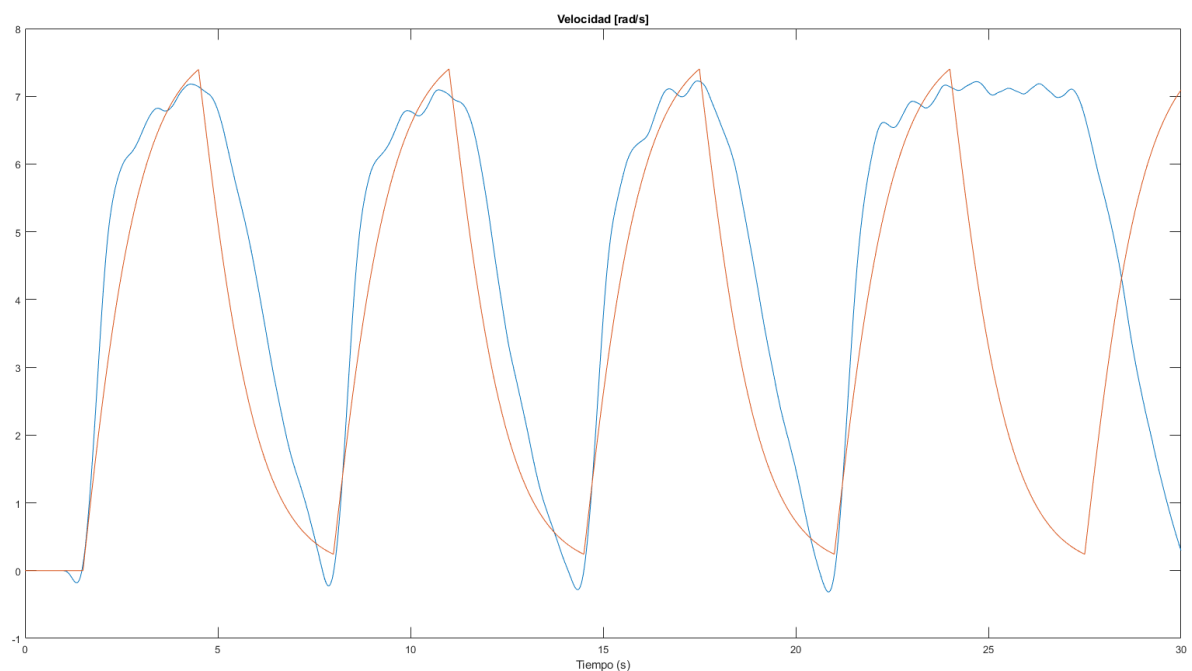
c) Valores de intensidad del motor



d) Valores de voltaje del motor



*e) Valores de voltaje del campo*



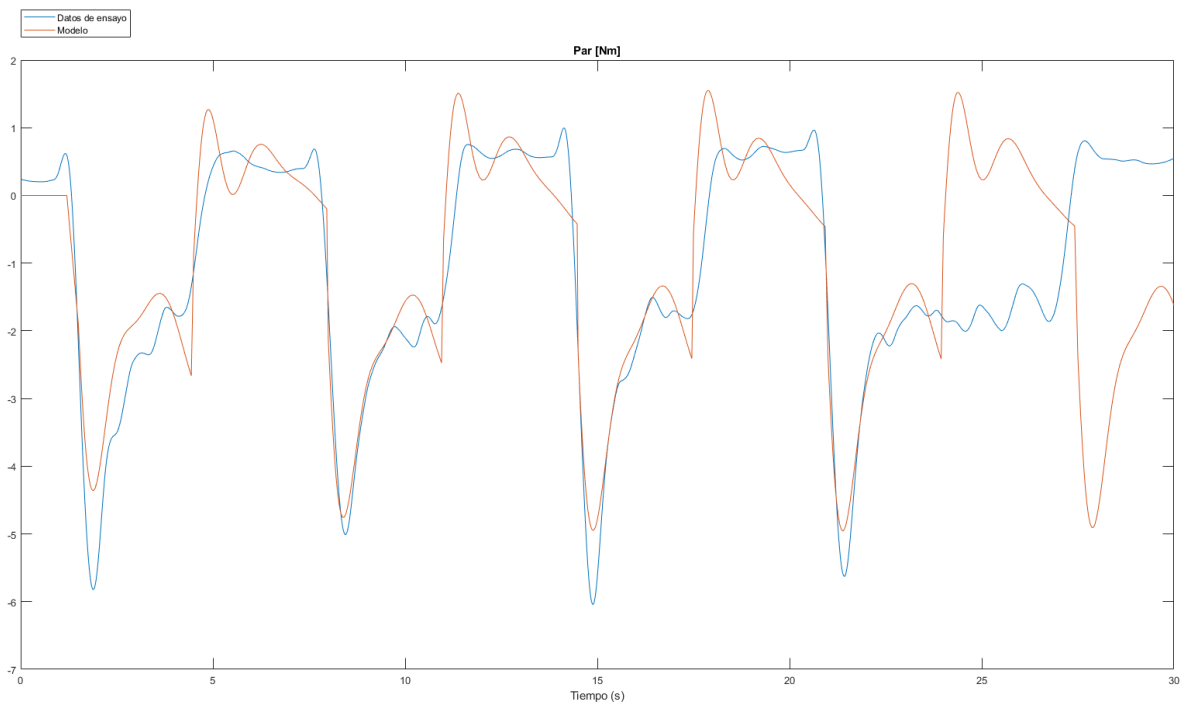
*f) Valores de velocidad*

*Figura 4.20. Comparación entre ensayo y modelo para una aceleración del 20 por ciento.*

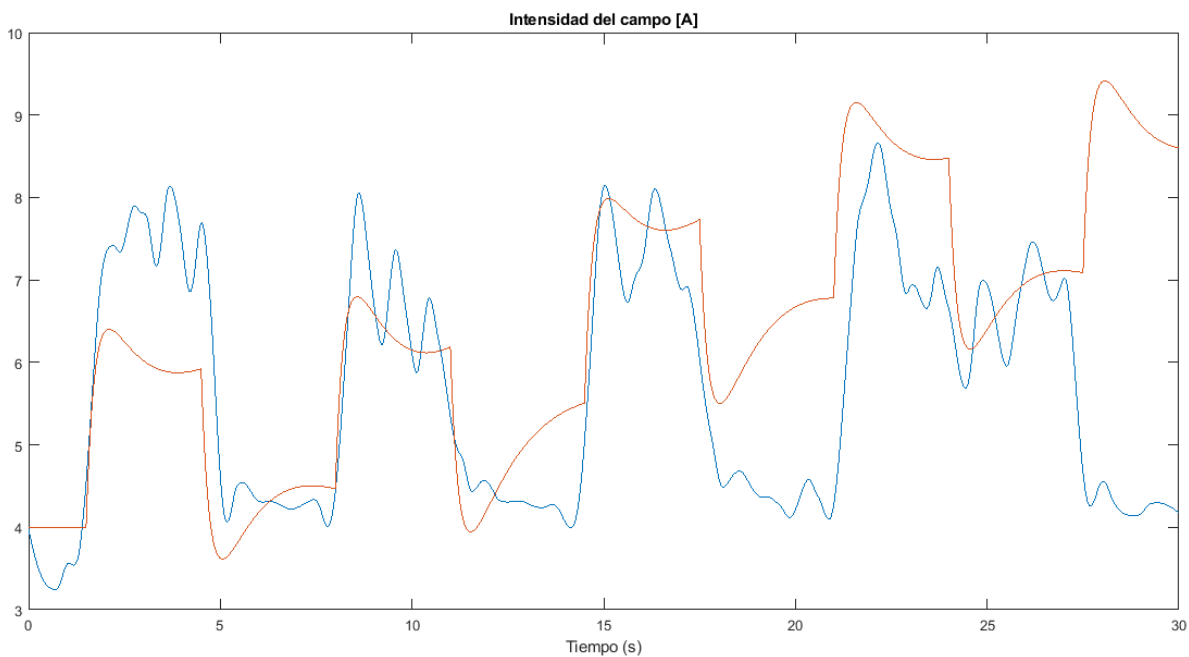
Vemos como en la mayoría de los casos el modelo se ajusta con bastante precisión a los datos de ensayo. Únicamente hay diferencias muy significativas en el caso de intensidad de campo y voltaje de campo, y se debe a que los valores iniciales reales son distintos de cero, que es el valor empleado inicialmente en la simulación. Para solucionarlo, se ha sumado esta diferencia a todos los valores del modelo, de forma que queda desplazada la curva en el eje y, adquiriendo así valores mucho más cercanos a los reales.

Por otro lado, se aprecia como en la parte final de la gráfica ambos modelos no encajan, esto es debido a que en el banco experimental se mantenía el último pulso durante más tiempo, y en Simulink no se ha podido recrear esta circunstancia.

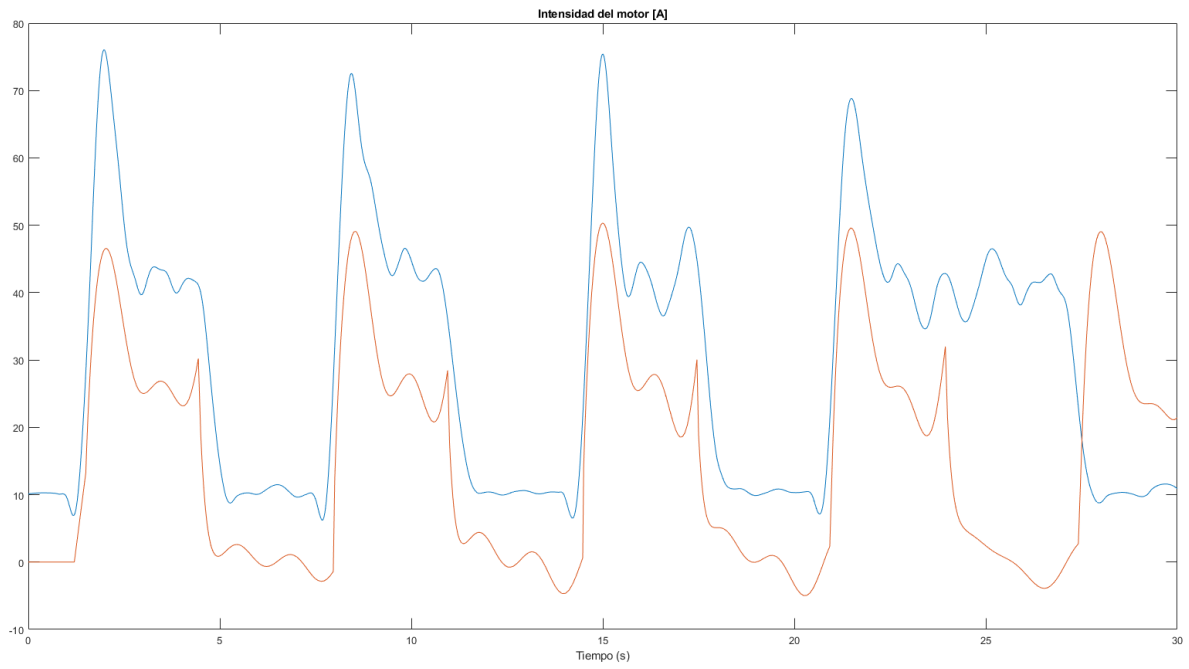
Hemos hecho una prueba para valores de aceleración superiores a los del modelo original (del quince por ciento). Ahora, probaremos el caso contrario, realizando un ensayo con valores del acelerador del diez por ciento. Los resultados se muestran a continuación:



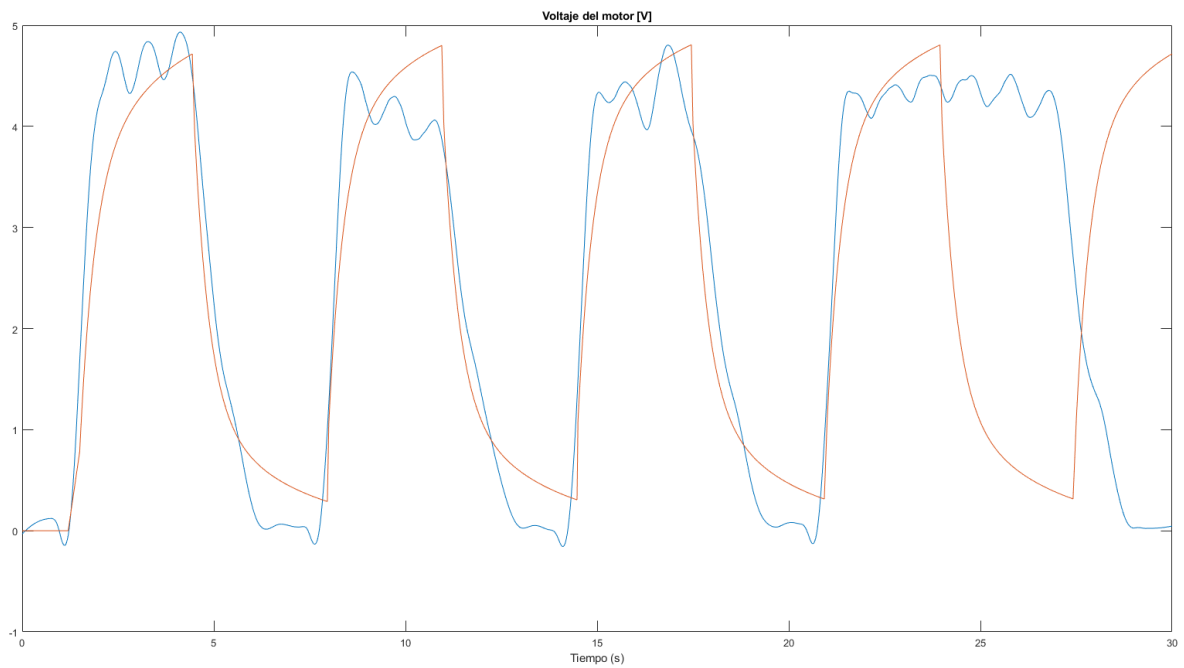
a) Valores de par



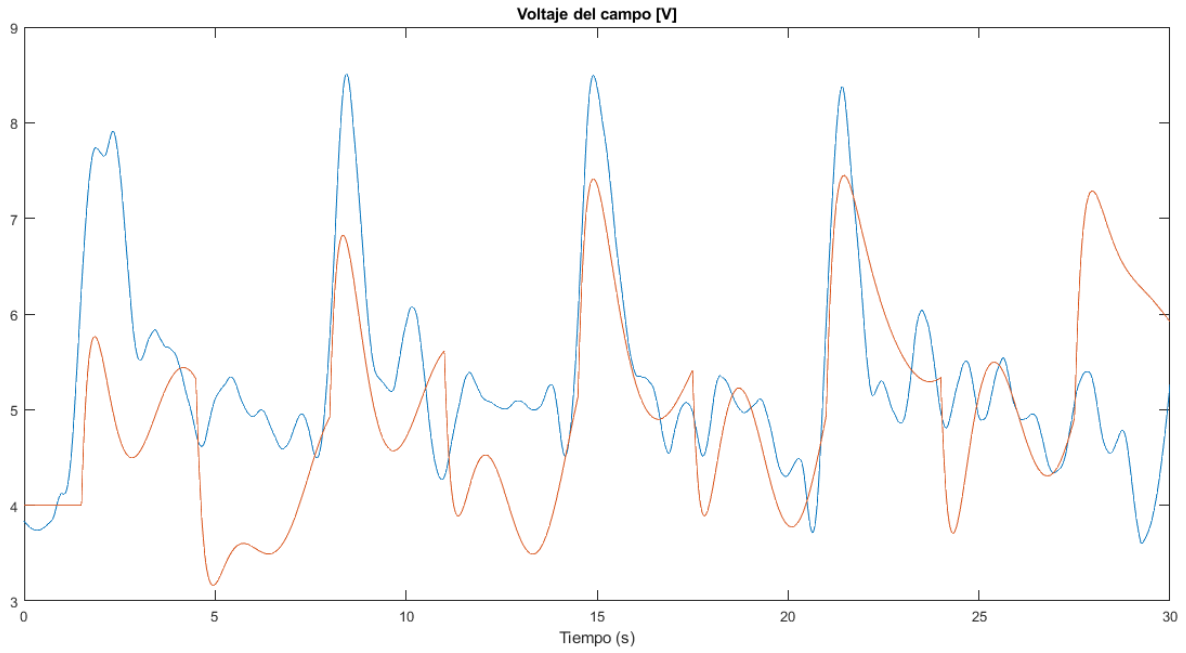
b) Valores de intensidad del campo



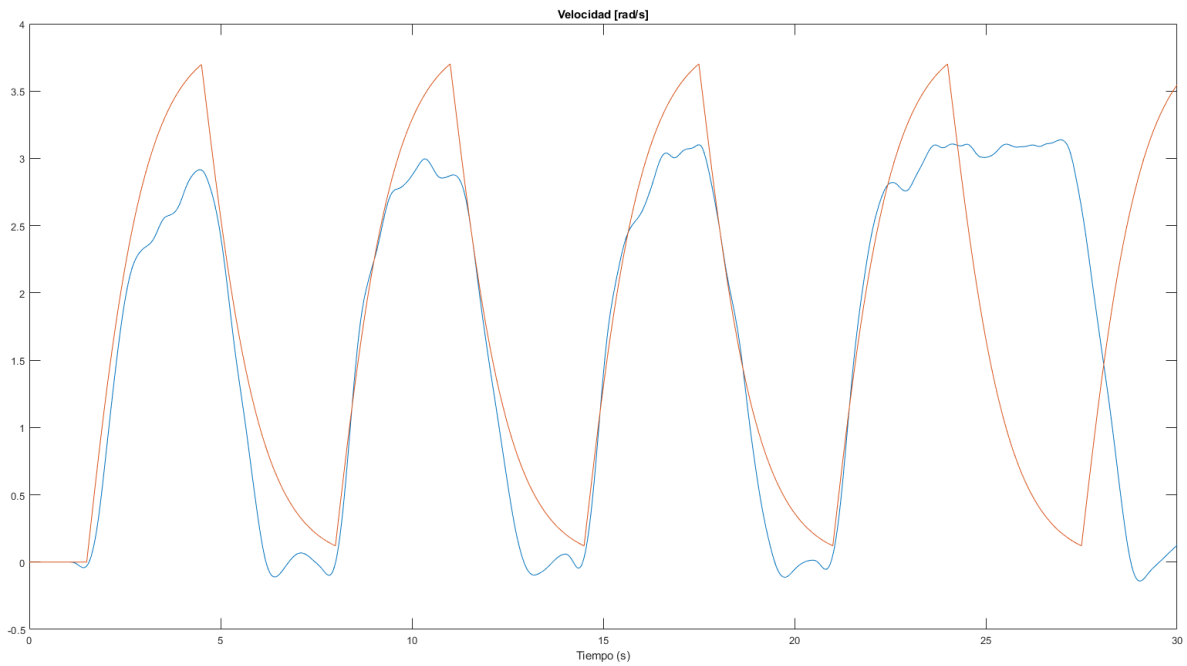
c) Valores de intensidad del motor



d) Valores de voltaje del motor



*e) Valores de voltaje del campo*



*f) Valores de velocidad*

*Figura 4.21. Comparación entre ensayo y modelo para una aceleración del 10 por ciento.*

De nuevo, comprobamos como el modelo se ajusta con bastante precisión a los valores reales, y también aparece el mismo problema con la corriente y el voltaje de campo que se comentó con el anterior ensayo, por lo que la solución sería la misma.



## 4.6 Paso del sistema a Simscape Multibody

El primer paso fue realizar el modelado del sistema de transmisión desarrollado por [2] y que se muestra en la Figura 4.22.

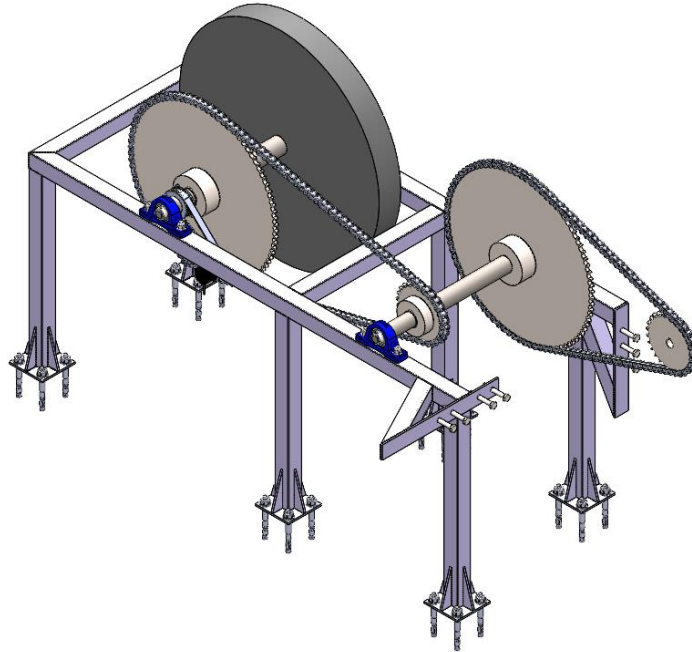


Figura 4.22. Estructura de ampliación del banco de ensayos.

A continuación, se lleva a cabo una simplificación de la estructura, que será la que finalmente trasladaremos al entorno de la herramienta Simscape Multibody. El resultado de dicha simplificación se muestra en la Figura 4.23.

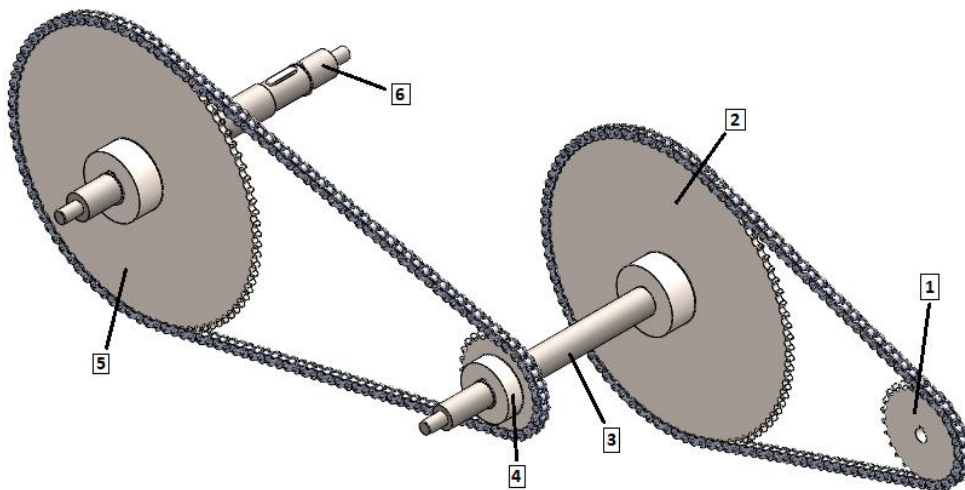


Figura 4.23. Reductora simplificada.

En ella, se muestran los siguientes elementos:

1. Piñón de la etapa 1.
2. Catenaria de la etapa 1.
3. Eje de la etapa 1.
4. Piñón de la etapa 2.
5. Catenaria de la etapa 2.
6. Eje de la etapa 2.

Antes de pasar a modelar el sistema en cuestión, se hicieron algunas pruebas para determinar si era posible recrear el sistema haciendo uso del bloque Poleas de Simscape Multibody. Finalmente, se desechó esta opción debido a que aún está en fase de desarrollo y no cuenta con todas las funcionalidades necesarias. En su lugar, nos decantamos por el bloque de Engranajes ya que, a pesar de que la transmisión se realiza mediante cadenas y piñones, si indicamos la relación de transmisión y la distancia entre centros como si se tratasen de engranajes, el resultado obtenido sería el mismo.

El primer paso fue importar las piezas ya diseñadas en [2] al entorno Simscape Multibody. De esta forma, el programa obtiene todos los valores de masa e inercia de los distintos elementos, así como el resto de sus características.

El bloque de revolución de articulación de Simscape Multibody restringe el giro al eje Z. Por ello, fue necesario modificar las coordenadas de origen de cada una de las piezas ya que no todas poseían esta configuración.

A continuación, se relacionan todas las piezas haciendo uso de los bloques de articulación y *common gear constraint*, y se ubican adecuadamente en el espacio haciendo uso de transformaciones rígidas.

El programa quedaría tal y como se muestra en la Figura 4.24.

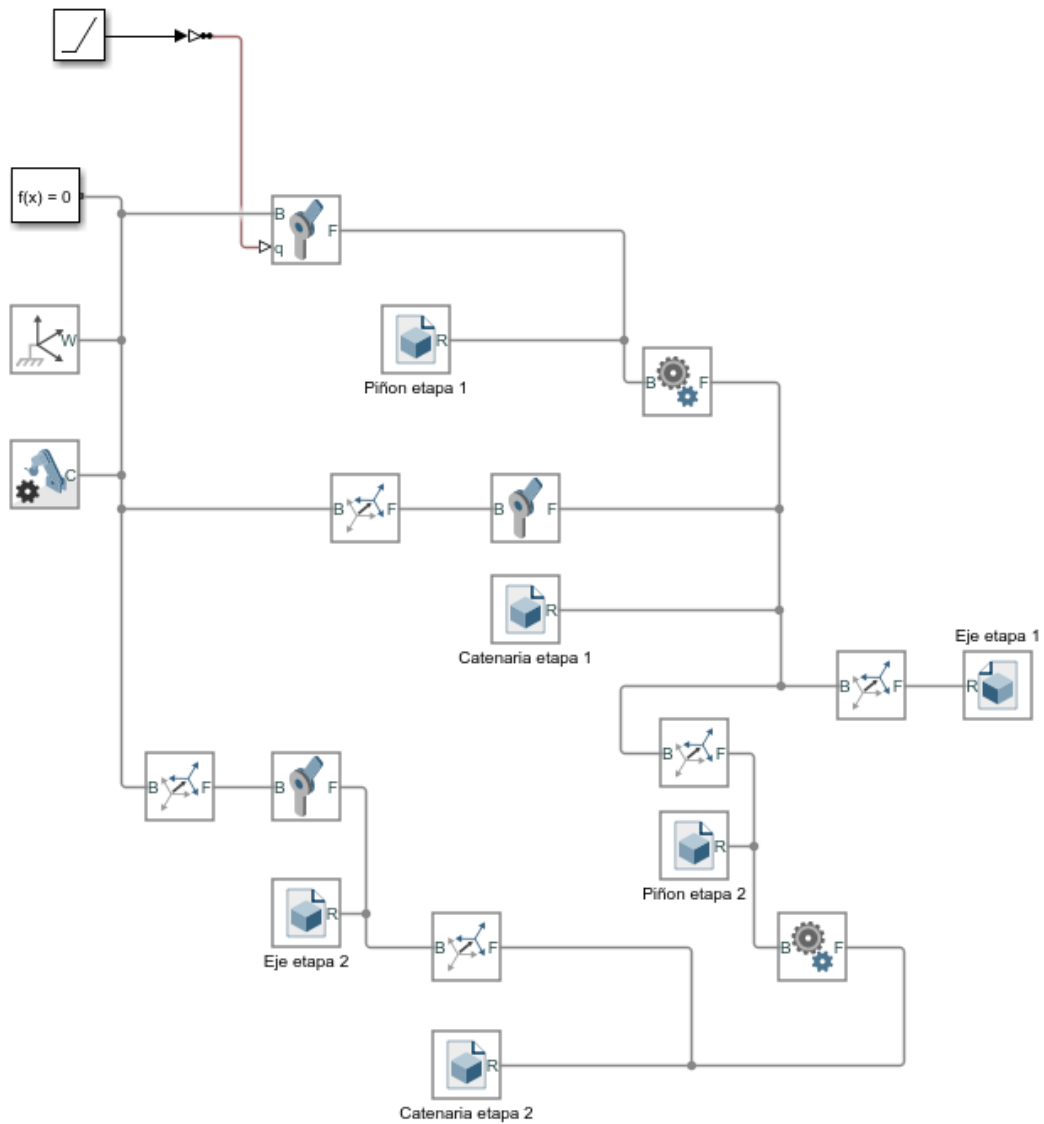


Figura 4.24. Programación en Simscape Multibody.

El resultado de la simulación de dicho programa se muestra en la Figura 4.25.

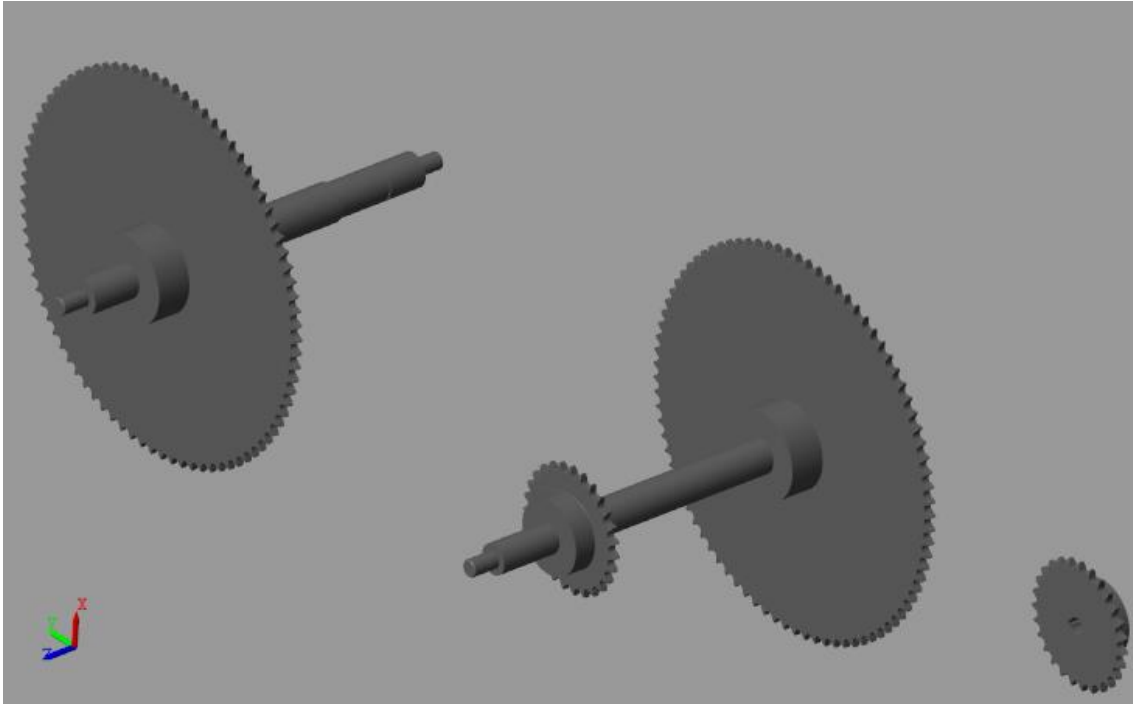


Figura 4.25. Simulación del programa en Simscape Multibody.

Como se puede observar, las cadenas no están representadas, pero el movimiento relativo de los distintos elementos es el correcto para este sistema.

## 4.7 Modelado del motor eléctrico

El siguiente paso es trabajar con las ecuaciones que definen el comportamiento de un motor eléctrico. En función del voltaje de entrada al mismo, se obtendrán los valores de corriente y par generados.

### Modelado del motor mediante ecuaciones diferenciales

Un motor eléctrico consta de una parte eléctrica y otra mecánica. Está compuesto por una resistencia ' $R$ ' en serie con una inductancia ' $L$ ', por la cual circula una corriente ' $i$ ', y una tensión de alimentación de la armadura ' $v$ '. Este motor gira un eje a una velocidad angular ' $\omega$ ', generando un torque ' $T_m$ '. El parámetro ' $J$ ' corresponde con el momento de inercia del motor y de la carga a la que va acoplado. El coeficiente ' $B$ ' hace referencia al coeficiente de fricción equivalente al motor y la carga y ' $E_o$ ' a la fuerza electromotriz.

En la Figura 4.26 podemos ver representado este esquema.

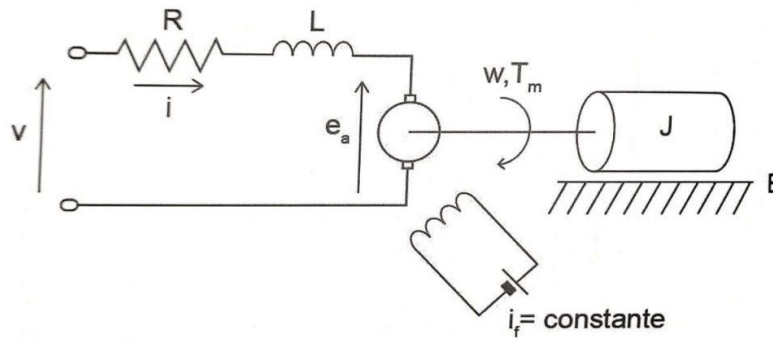


Figura 4.26. Circuito equivalente de un motor eléctrico DC.

Analizando el circuito mediante mallas, y tomando un sentido horario para la corriente, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_a(t)$$

Reescribiendo la ecuación:

$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) - Ri(t) - E_a(t) \quad (4.1)$$

$E_a(t)$  es una tensión generada que resulta cuando los conductores de la armadura se mueven a través del flujo de campo establecido por la corriente del campo  $i_f$ .

A continuación, obtenemos la ecuación de la sección mecánica:

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

Reescribiendo los términos:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - B\omega(t) \quad (4.2)$$

Existe una relación proporcional,  $K_a$ , entre el voltaje inducido en la armadura y la velocidad angular del eje del motor.

$$E_a(t) = K_a \omega(t) \quad (4.3)$$

Además, se puede establecer otra relación proporcional,  $K_m$ , entre el torque y la corriente eléctrica.

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (4.4)$$

Si aplicamos la transformada de Laplace a estas cuatro ecuaciones, nos quedan como sigue:

$$Lsi(s) = v(s) - Ri(s) - E_a(s) \quad (4.5)$$

$$Js\omega(s) = T_m(s) - B\omega(s) \quad (4.6)$$

$$E_a(s) = K_a \omega(s) \quad (4.7)$$

$$T_m(s) = K_m i(s) \quad (4.8)$$

Sustituyendo (4.7) y (4.8) en (4.5), nos queda:

$$Ls \frac{T_m(s)}{K_m} = v(s) - R \frac{T_m(s)}{K_m} - K_a \omega(s)$$

Reescribiendo la ecuación, queda:

$$v(s) = \frac{(R + Ls)T_m(s)}{K_m} + K_a \omega(s) \quad (4.9)$$

De la ecuación (6), despejamos la velocidad angular:

$$\omega(s) = \frac{T_m(s)}{Js + B} \quad (4.10)$$

Si sustituimos esta expresión en la ecuación (4.9), nos queda:

$$v(s) = \frac{(R + Ls)T_m(s)}{K_m} + K_a \frac{T_m(s)}{Js + B}$$

Reescribiendo los términos:

$$v(s) = \left( \frac{R + Ls}{K_m} + \frac{K_a}{Js + B} \right) T_m(s)$$

$$v(s) = \frac{(R + Ls)(Js + B) + K_a K_m}{K_m (Js + B)} T_m(s) \quad (4.11)$$

Así, obtenemos la función de transferencia que relaciona la salida (torque) con la entrada (voltaje):

$$\frac{T_m(s)}{v(s)} = \frac{K_m (Js + B)}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m}$$

Función de transferencia de la fuerza electromotriz y el voltaje:

$$\frac{E_a(s)}{v(s)} = \frac{K_m K_a}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m}$$

Función de transferencia de la corriente y el voltaje:

$$\frac{i(s)}{v(s)} = \frac{Js + B}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m}$$

Función de transferencia de la velocidad angular y el voltaje:

$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K_m}{LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m}$$

Integrando la velocidad angular, obtenemos la posición angular:

$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{K_m}{s(LJs^2 + (RJ + LB)s + RB + K_a K_m)}$$

### Representación en Simulink

Podemos recrear el comportamiento del motor en Simulink haciendo uso de las ecuaciones diferenciales (ecuaciones 4.1 - 4.4) o bien empleando las funciones de transferencia obtenidas. Para comprobar que efectivamente con ambos métodos obtenemos el mismo resultado, haremos el cálculo de las dos formas y compararemos los resultados finales.

En la Figura 4.27 puede verse el resultado de la implementación de las ecuaciones diferenciales 4.1 – 4.4 en Simulink. A modo de ejemplo, se han establecido los siguientes valores para las variables:

Variable	Valor
J	0.01 [kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
B	0.1 [N·m]
K <sub>m</sub>	0.01
K <sub>a</sub>	0.01
R	1 [Ω]
L	0.5 [H]

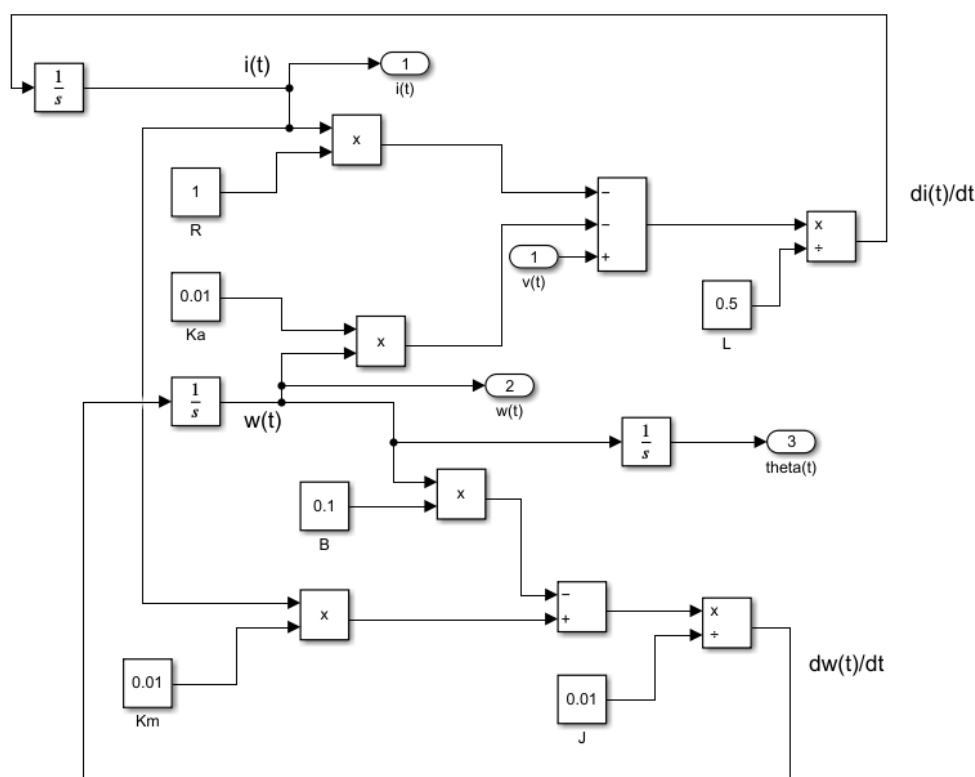


Figura 4.27. Representación mediante ecuaciones diferenciales en Simulink.

En la Figura 4.28 están representadas en la zona inferior las funciones de transferencia tanto de la corriente como de la velocidad angular, y en la parte superior, dentro de un bloque, las ecuaciones diferenciales descritas en la Figura 4.27. Para comprobar que efectivamente con ambos métodos obtenemos un modelado de un motor eléctrico, se comparan ambas salidas en una misma gráfica.

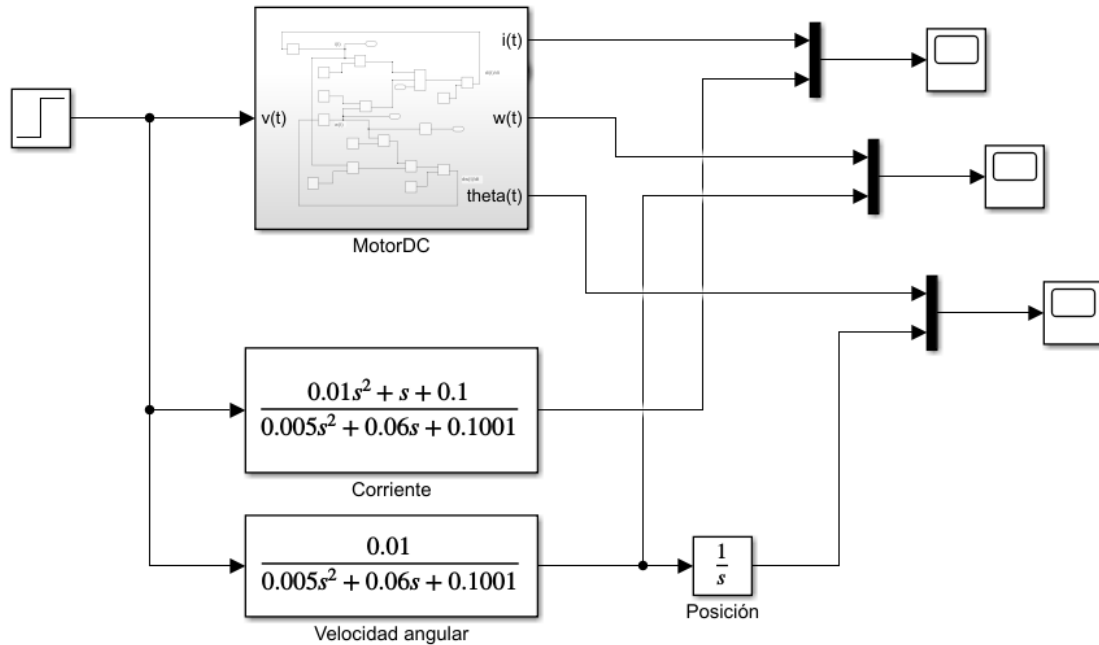
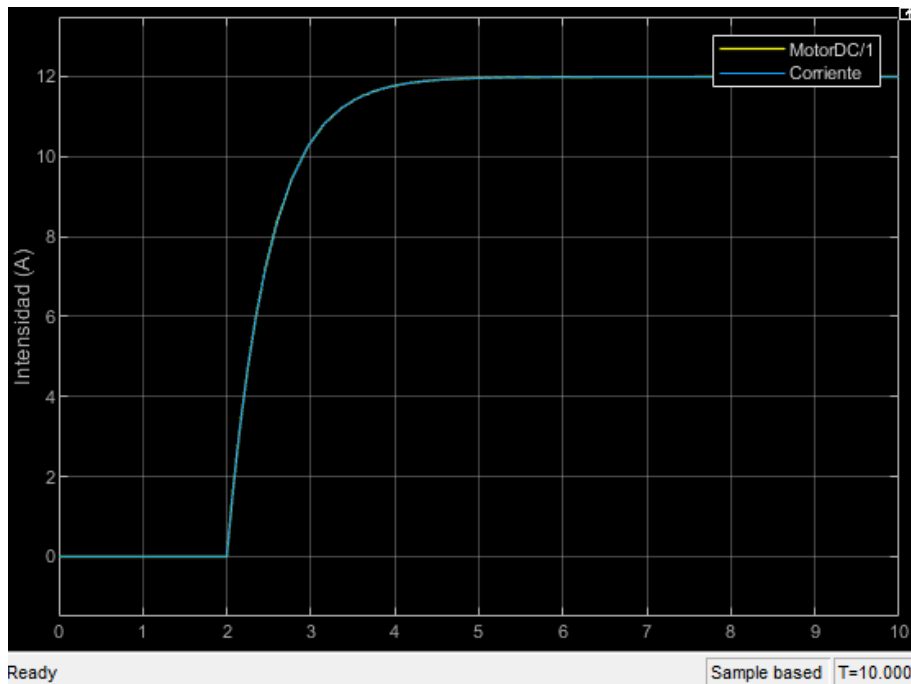


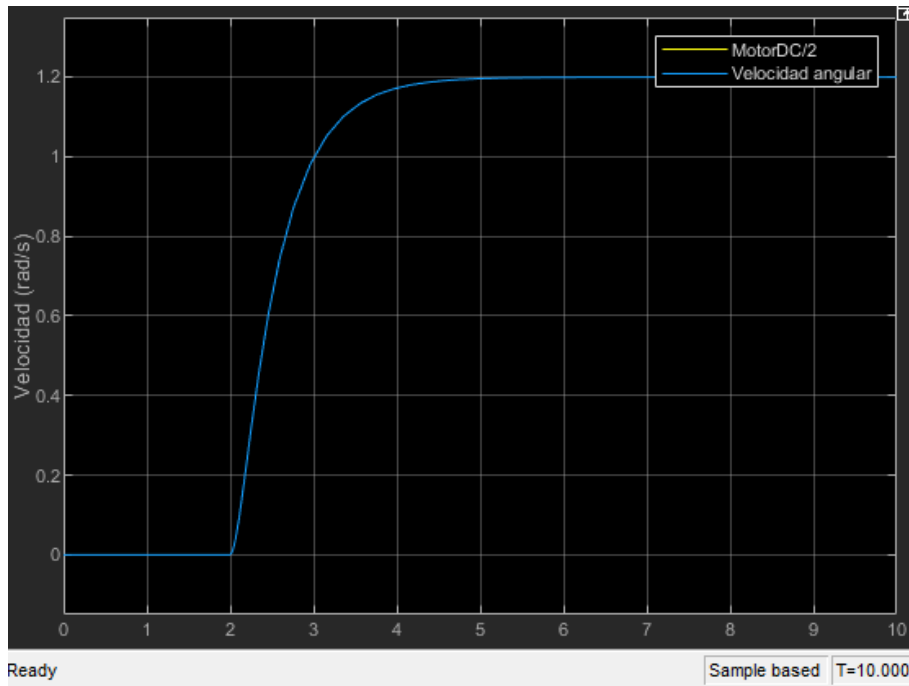
Figura 4.28. Funciones de transferencia en Simulink.

A continuación, se muestran los resultados arrojados por las gráficas:

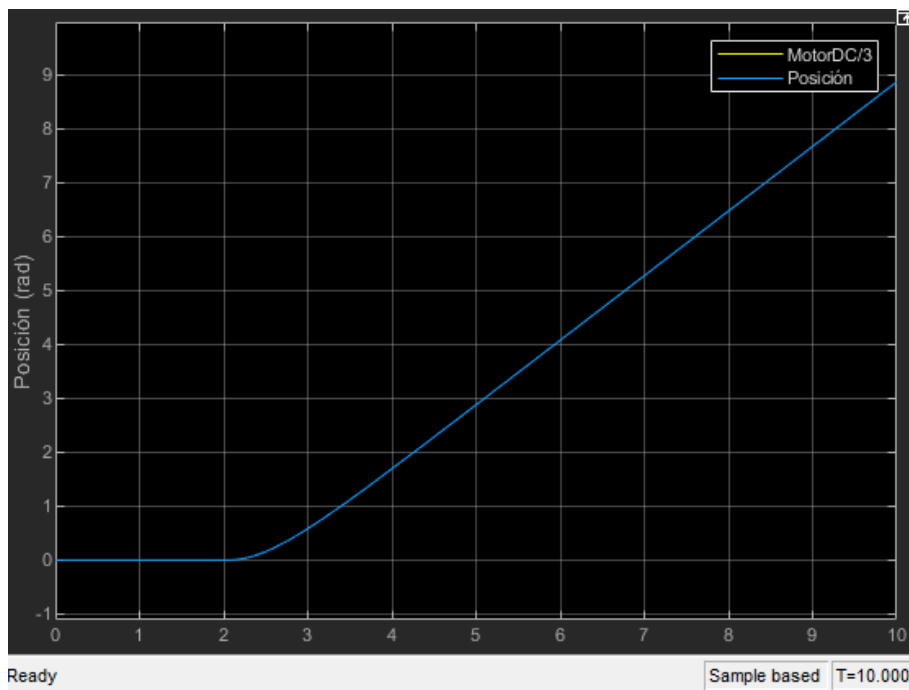


a) Intensidad del motor





b) Velocidad de salida del motor



c) Posición

Figura 4.29. Valores obtenidos por el modelo en Simulink.

Como se puede observar, ambas gráficas están superpuestas, ya que coinciden exactamente. De esta forma se comprueba cómo se podría modelar también este sistema si obtenemos los parámetros característicos de este motor, aplicándolos o bien a ecuaciones diferenciales o a funciones de transferencia



## 5. Resultados y conclusiones

En este apartado se presentarán las estimaciones proporcionadas por el modelo obtenido, así como su comparación con los valores reales del ensayo para comprobar la validez del mismo. Además, se presentarán las conclusiones finales de todo el proyecto realizado y posibles ideas futuras de cara a continuar en esta línea de trabajo.

### 5.1 Resultados

En este apartado del proyecto se presentarán y analizarán los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Por un lado, se ha realizado un modelado SIMO de todo el sistema mediante caja negra (Figura 5.1) para predecir consumos y comportamientos del motor, cuyo proceso se expone detalladamente en el capítulo 4.

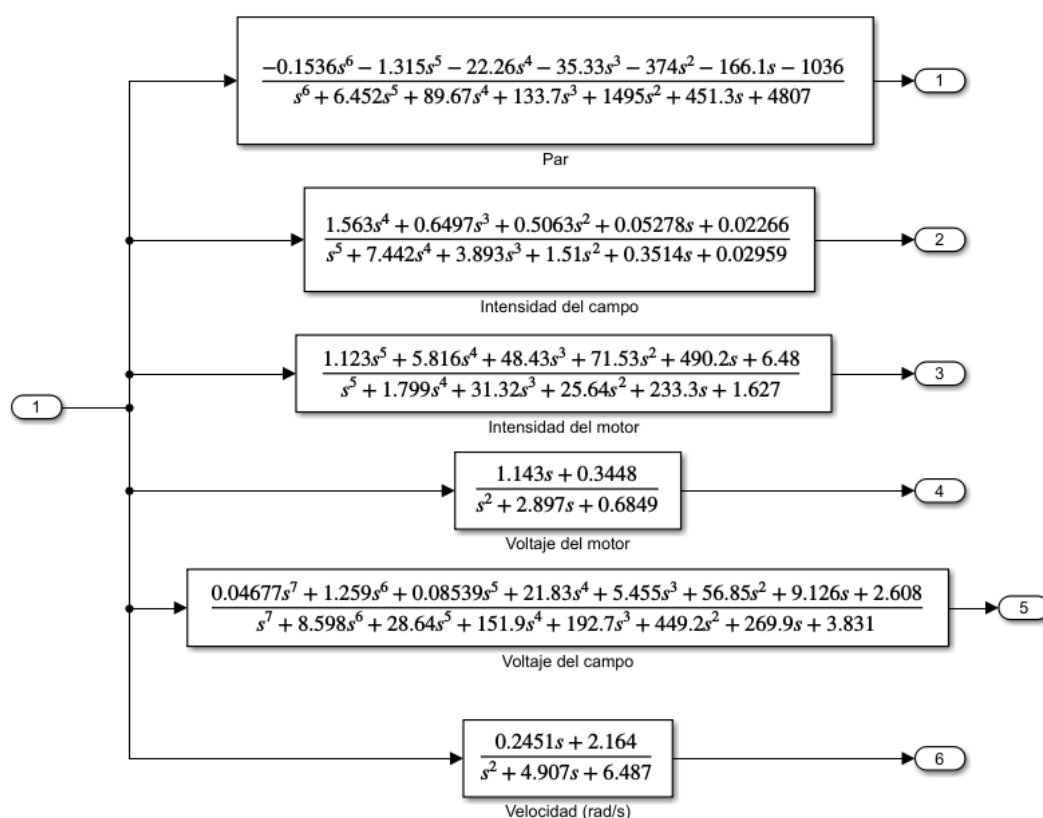


Figura 5.1. Modelado del sistema con los discos de inercia instalados.

Por otro lado, para lograr dicho objetivo fue necesario realizar un reacondicionamiento del banco. Uno de los trabajos realizados fue el diseño y construcción de un sistema de transmisión mediante poleas dentadas (Figura 5.2). Dicho proceso se expone con mayor detalle en el capítulo 3.

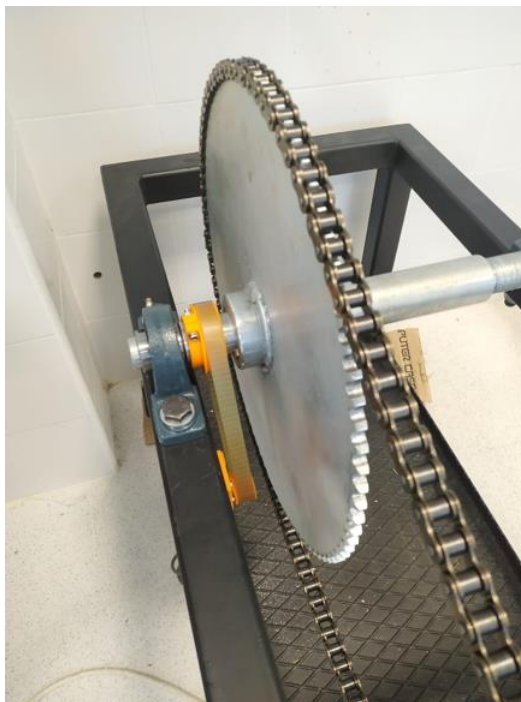


Figura 5.2. Instalación del encoder.

A continuación, se expone una comparación de los resultados de un ensayo y los valores ofrecidos por el modelo, junto con una discusión de los mismos.

En la Figura 5.3 se presentan los valores que ha tomado el acelerador durante el ensayo. Se trata de una prueba de sucesivos arranques y paradas del motor, por lo que los valores de aceleración se asemejan a pulsos con una amplitud del quince por ciento.

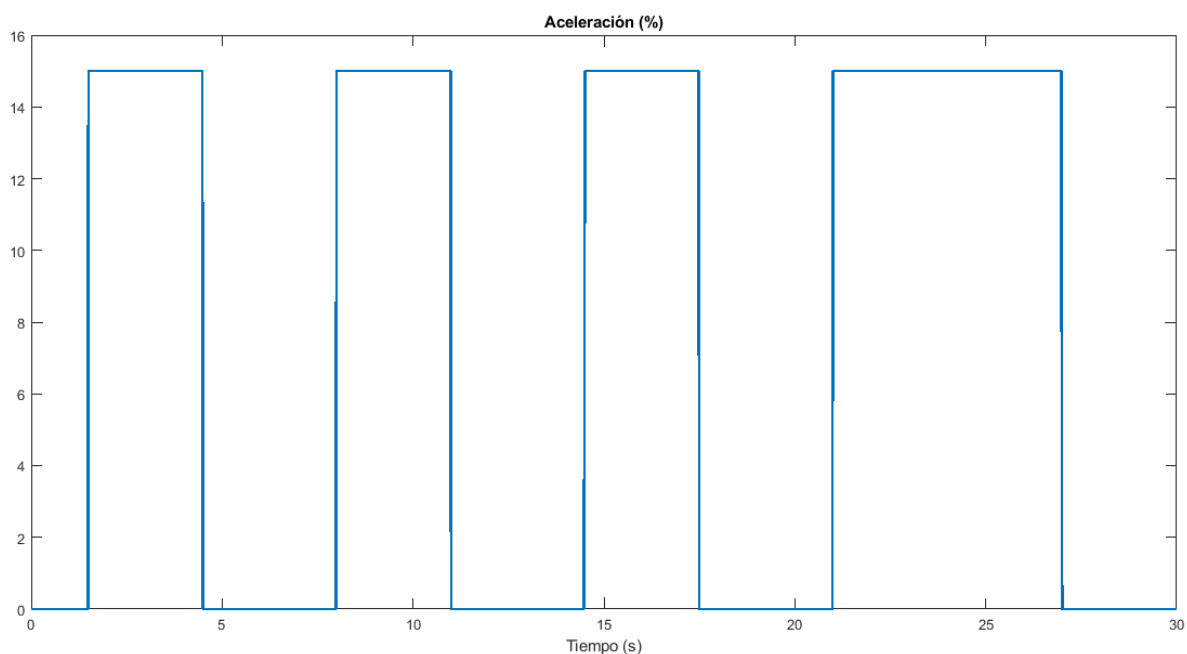
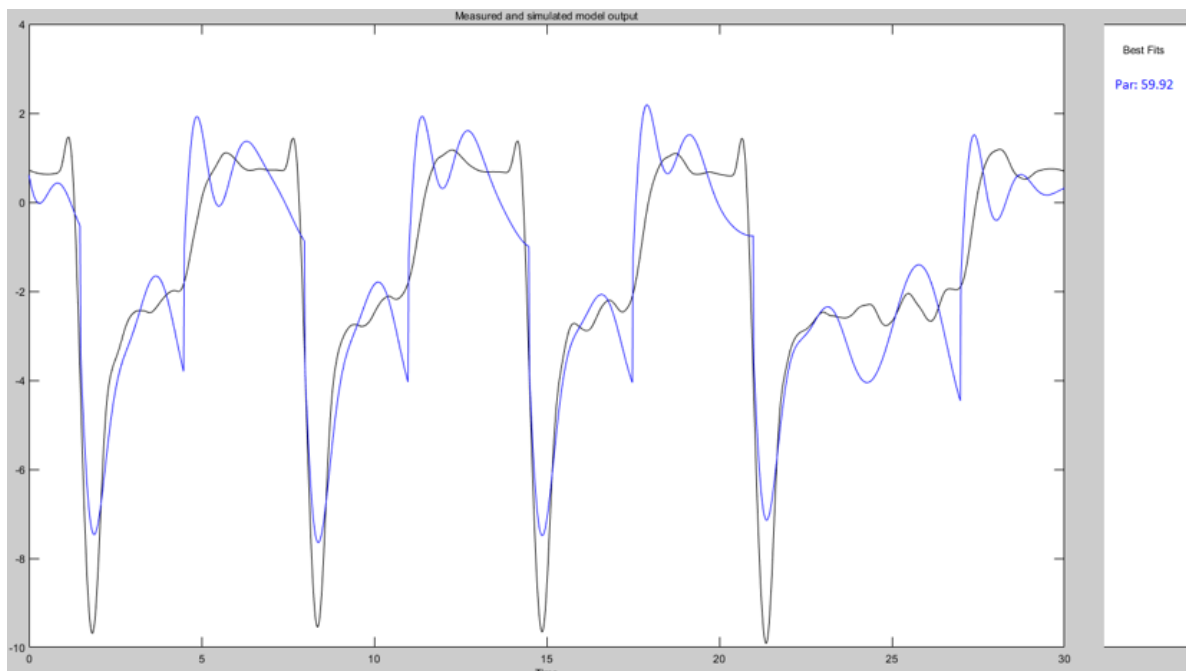
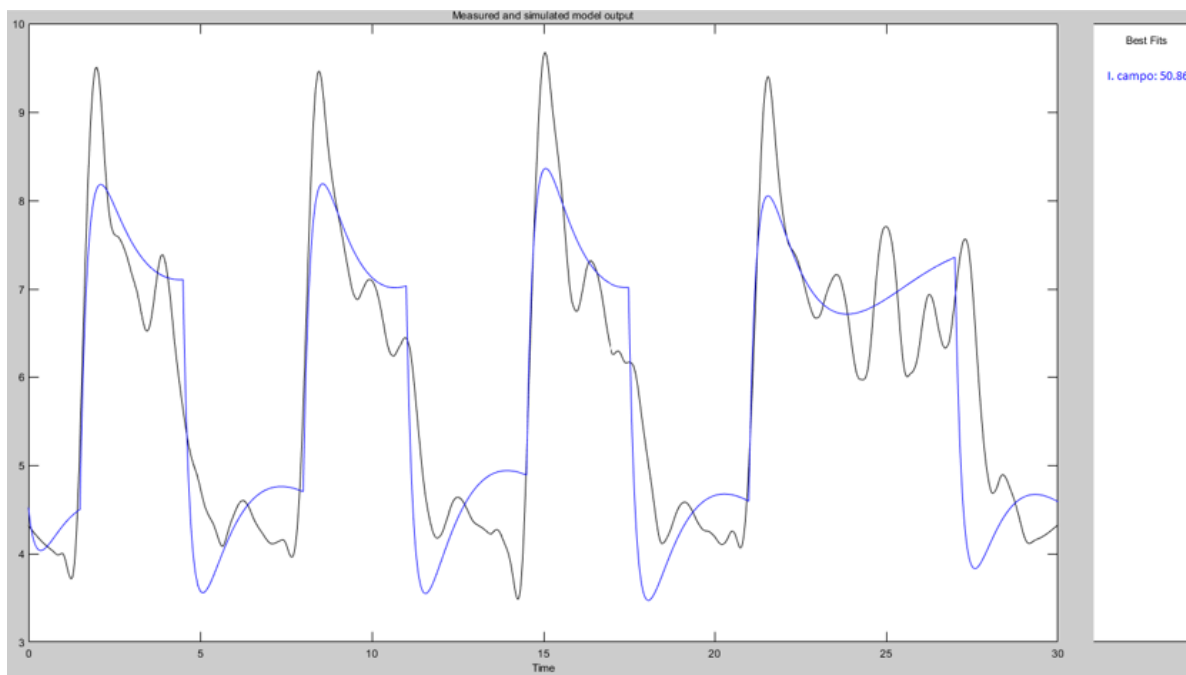


Figura 5.3. Valores de aceleración.

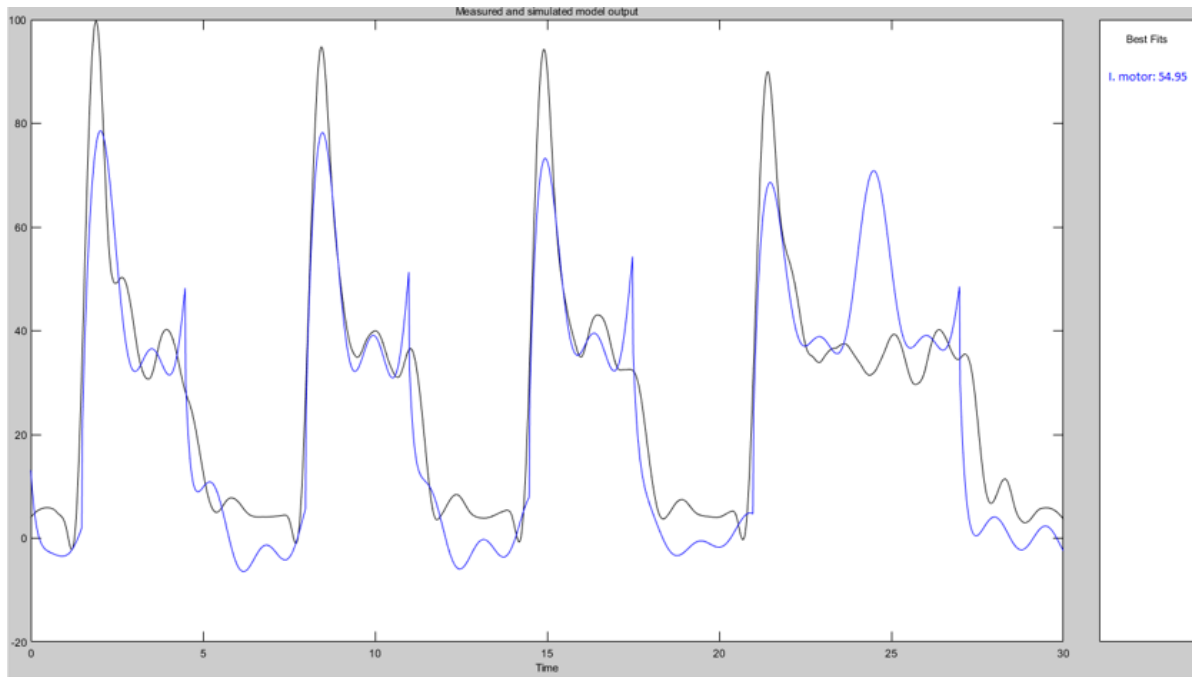
En la Figura 5.4 se observa una comparación entre los valores reales y los estimados por el modelo para cada una de las variables.



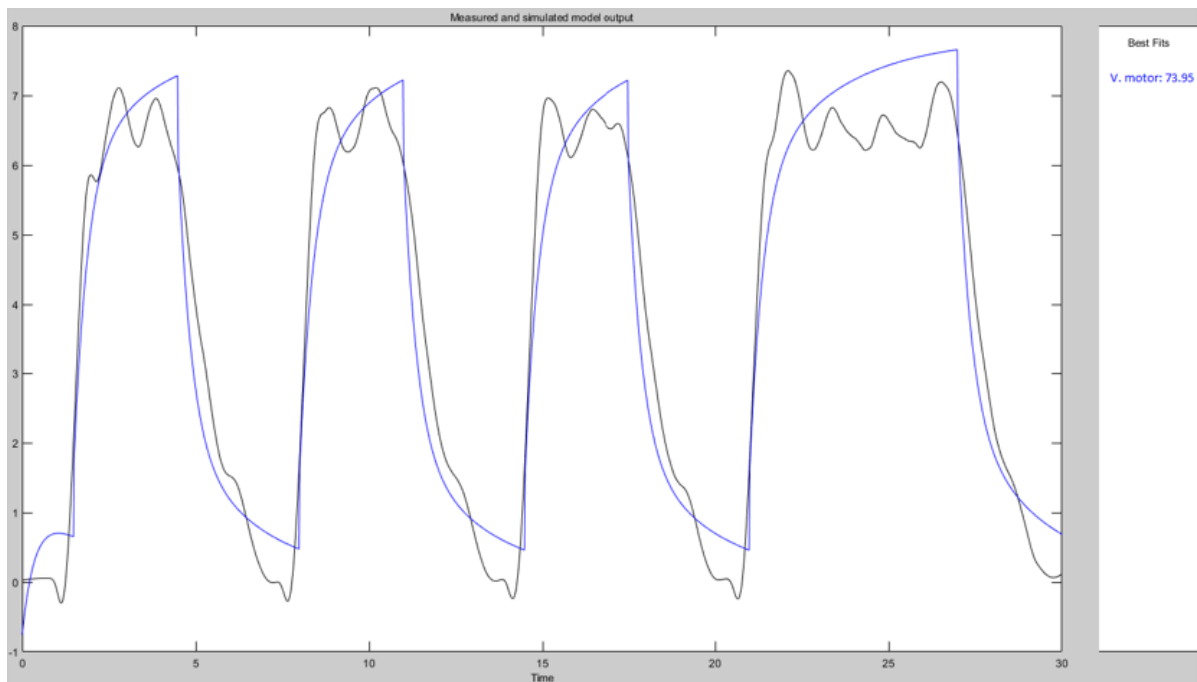
a) Par



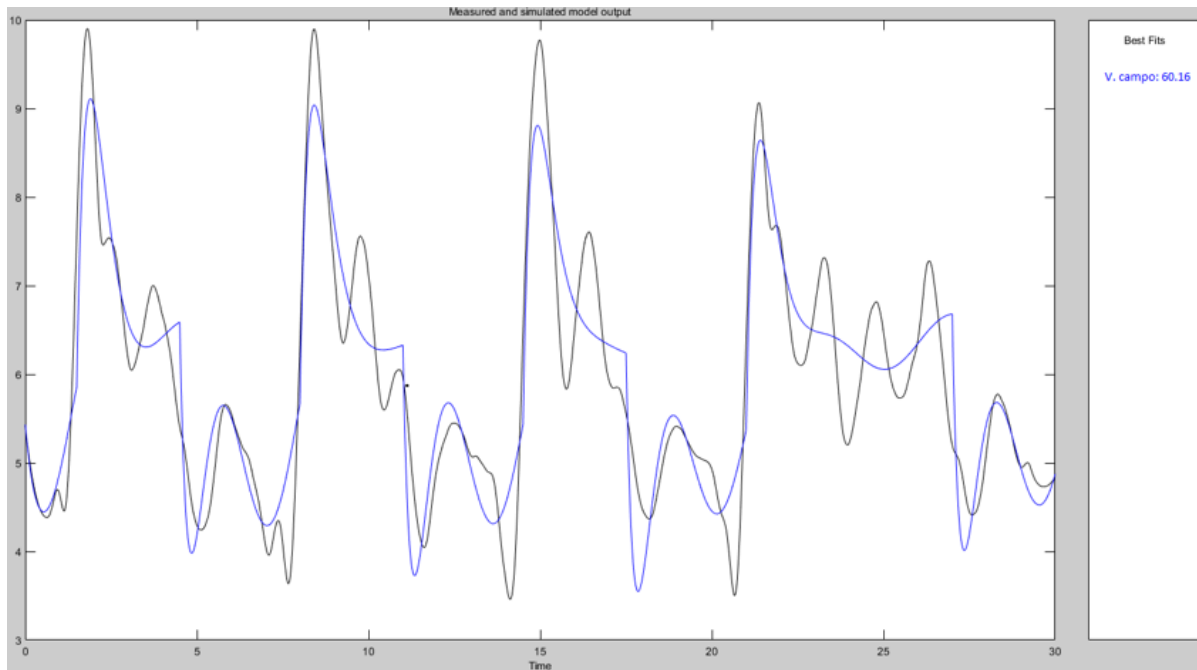
b) Intensidad del campo



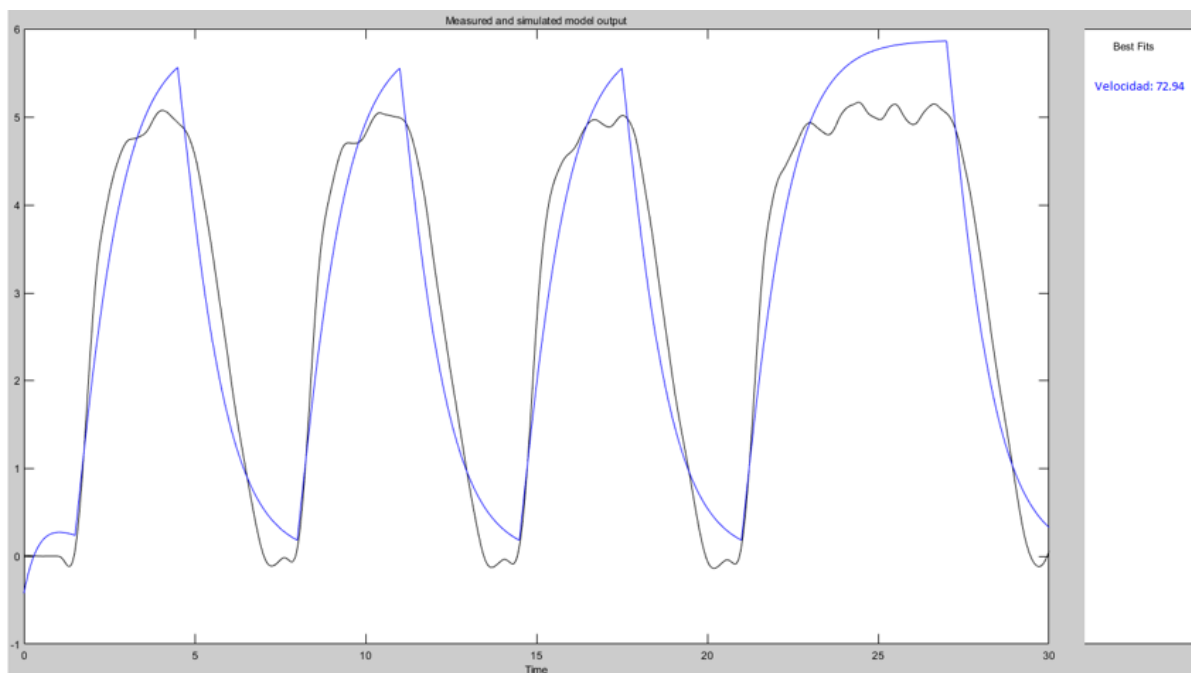
c) Intensidad del motor



d) Voltaje del motor



e) Voltaje del campo



f) Velocidad

Figura 5.4. Resultados del modelo.

Se aprecia como en cada arranque se producen picos en la mayoría de las variables, los cuales son casi siempre mayores en los ensayos reales que en los proporcionados por el modelo, ya que era difícil ajustar los parámetros de las funciones de transferencia para que se adaptasen a este comportamiento sin que se viera comprometido el ajuste al resto de valores en estado estacionario.

También hay que tener en cuenta que se ha realizado un filtrado de los datos proporcionados por los sensores para eliminar el exceso de ruido. Este hecho puede introducir imperfecciones que resulten en una mayor dificultad para ajustarse de forma precisa al comportamiento real del motor.

Se observa como la respuesta del sistema ante una entrada del acelerador es casi inmediata, aspecto que facilita el análisis de los datos.

También se aprecia como hay variables cuyo valor una vez detenido el motor es distinto de cero, como ocurre con el caso de la intensidad de campo y el voltaje de campo. Este aspecto está relacionado con el controlador Curtis, ya que este a su vez actúa como una caja negra ya que ciertas características de su funcionamiento no vienen reflejadas en su manual.

Por otro lado, en la subfigura '*f) Velocidad*' de la Figura 5.4 se observa como los valores medidos por el encoder no presentan anomalías y se ajustan correctamente a la actuación esperada, aunque se observa como el sistema se detiene con rapidez una vez detenido el motor, hecho que pone de manifiesto el alto rozamiento provocado por el freno mecánico actual. Dichos valores se corresponden con la velocidad a la que se desplazaría el vehículo eléctrico *eCARM*, por lo que se podría predecir la velocidad de movimiento del mismo mediante este modelo.



## 5.2 Conclusiones

En este apartado se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo de las distintas etapas del proyecto.

En primera instancia, se considera que se ha cumplido el objetivo principal propuesto, realizar un modelado de todo el sistema que recoja su comportamiento en función de una entrada del acelerador, así como la mayoría de los subobjetivos propuestos. Con respecto a la incorporación integral de todo el sistema y su comportamiento al entorno de Simscape Multibody, se ha comprobado la viabilidad de este y se ha presentado un primer modelo válido que recoge los distintos elementos de la reductora y las velocidades relativas entre los distintos elementos.

Respecto al estado del banco de ensayos, se han corregido algunos problemas existentes, como las dificultades que ocasionaban las medidas del anterior encoder. Al instalarse un nuevo equipo en una zona que alcanza una velocidad menor, se obtienen medidas precisas que permiten realizar mejores análisis y simulaciones del comportamiento real del vehículo eléctrico, que es el fin principal de este banco.

A pesar de que los modelos obtenidos aún tienen margen de mejora, se considera que los resultados obtenidos son muy satisfactorios y que permiten predecir consumos de energía por parte del sistema. También se ha presentado la metodología para la obtención de las funciones de transferencia que definen el comportamiento de un sistema partiendo de unos datos de ensayo. Estos conocimientos pueden extrapolarse a múltiples ámbitos de la ingeniería relacionados con la automatización y el modelado de sistemas.

Finalmente, destacar que, gracias a la realización de este proyecto, se ha podido llevar a cabo una síntesis de diversos conocimientos adquiridos durante el transcurso del grado, llevando éstos a un ámbito más práctico y teniendo la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos en aspectos relacionados con la automatización, la electrónica y el modelado de sistemas, que han permitido tomar decisiones adecuadas frente a los problemas derivados de un trabajo técnico.

### 5.3 Trabajos futuros

Son múltiples las posibilidades de trabajo de cara al futuro que ofrece un banco de este tipo. En este apartado se expondrán algunas de ellas basándose en el trabajo realizado hasta ahora.

La más interesante sería continuar con el trabajo de modelado, subsanando algunos defectos e implementando todo el sistema en el entorno de Simscape Multibody, ya que las posibilidades que ofrece esta herramienta de trabajo son muy variadas e interesantes de cara a obtener estimaciones más reales del comportamiento real del vehículo eléctrico. Los resultados obtenidos haciendo uso de del software LabView son satisfactorios, por lo que sería interesante continuar trabajando en este entorno en trabajos futuros.

Por otro lado, se podría seguir mejorando el banco, cambiando el freno mecánico actual, que provoca un gran rozamiento y pérdidas de energía, por un freno magnético. También se podría estimar el coeficiente de fricción de todo el sistema, de forma que pudiera incorporarse a los modelos todas las pérdidas de energía presentes en el banco.

## Bibliografía

- [1] F. Acuña Prieto, «Diseño y construcción de un banco de ensayos para la caracterización del motor de un vehículo eléctrico,» TFG, Universidad de Almería, 2015.
- [2] F. Martos Guzmán, «Diseño de un volante de inercia para un banco de ensayos de un motor eléctrico,» TFG, Universidad de Almería, 2017.
- [3] G. J. Heredia Vicente, «Caracterización automática y control de motores de corriente continua. Implementación en banco de ensayos,» TFG, Universidad de Almería, 2019.
- [4] «Changzhou Greenland Vehicle,» 24 10 2021. [En línea]. Available: [http://www.glev.com/en/pro\\_show.php?id=155](http://www.glev.com/en/pro_show.php?id=155).
- [5] Wikipedia, «Diagrama de Gantt,» 24 septiembre 2021. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Gantt](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Gantt).
- [6] Y. Merizalde Zamora, L. López Dominguez Rivas y S. López Domínguez Rivas, «Las máquinas de corriente continua mediante Labview y microcontrolador en las carreras de licenciatura o ingeniería eléctrica,» 22 Diciembre 2015.
- [7] I. Cerón Morales, J. O. Vázquez Espinoza y E. Aquino Díaz, «Modelo matemático del motor de corriente directa,» *Universidad Politécnica de Puebla*, Febrero 2017.
- [8] P. Samanuhut y A. Dogan, «Dynamics equations of planetary gear set for shift quality by Lagrange method,» 22 Octubre 2008.
- [9] J. L. Torres Moreno, G. Heredia y A. Giménez Fernández, «Banco de ensayo para motores de vehículos eléctricos,» Universidad de Almería, 2019.



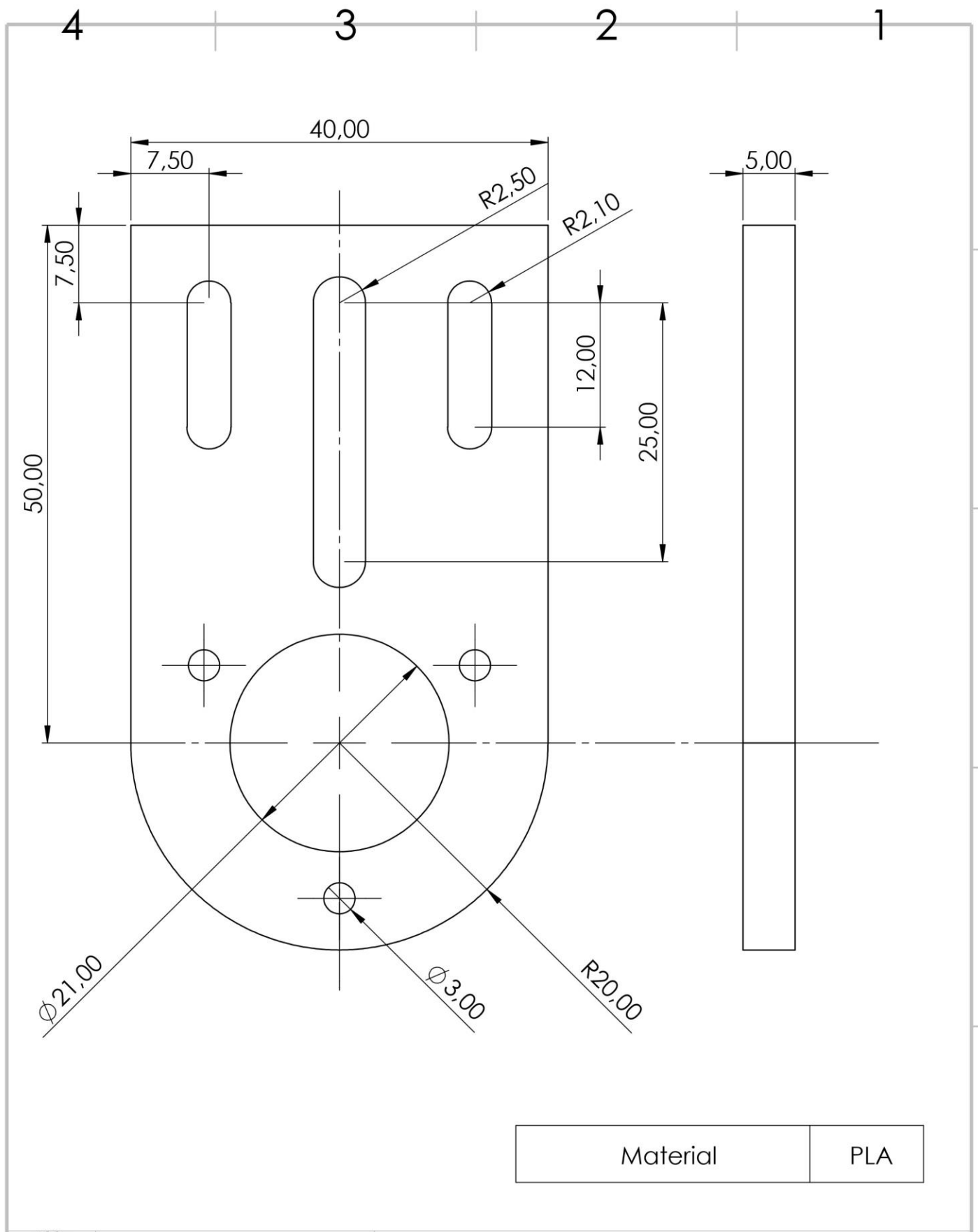
# **Anexos**



## **ANEXO I. PLANOS**







Material	PLA
----------	-----



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Título:

# Soporte del encoder

TFG:

Caracterización del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico ligero

Formato:

A4

Dibujado por:

Pablo Arias Moreno

Fecha:

20/20/2021

Cotas:

mm

Corregido por:

José Luis Torres Moreno

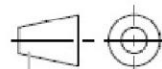
Fecha:

25/20/2021

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Escala:

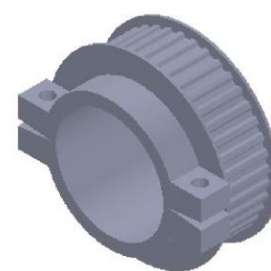
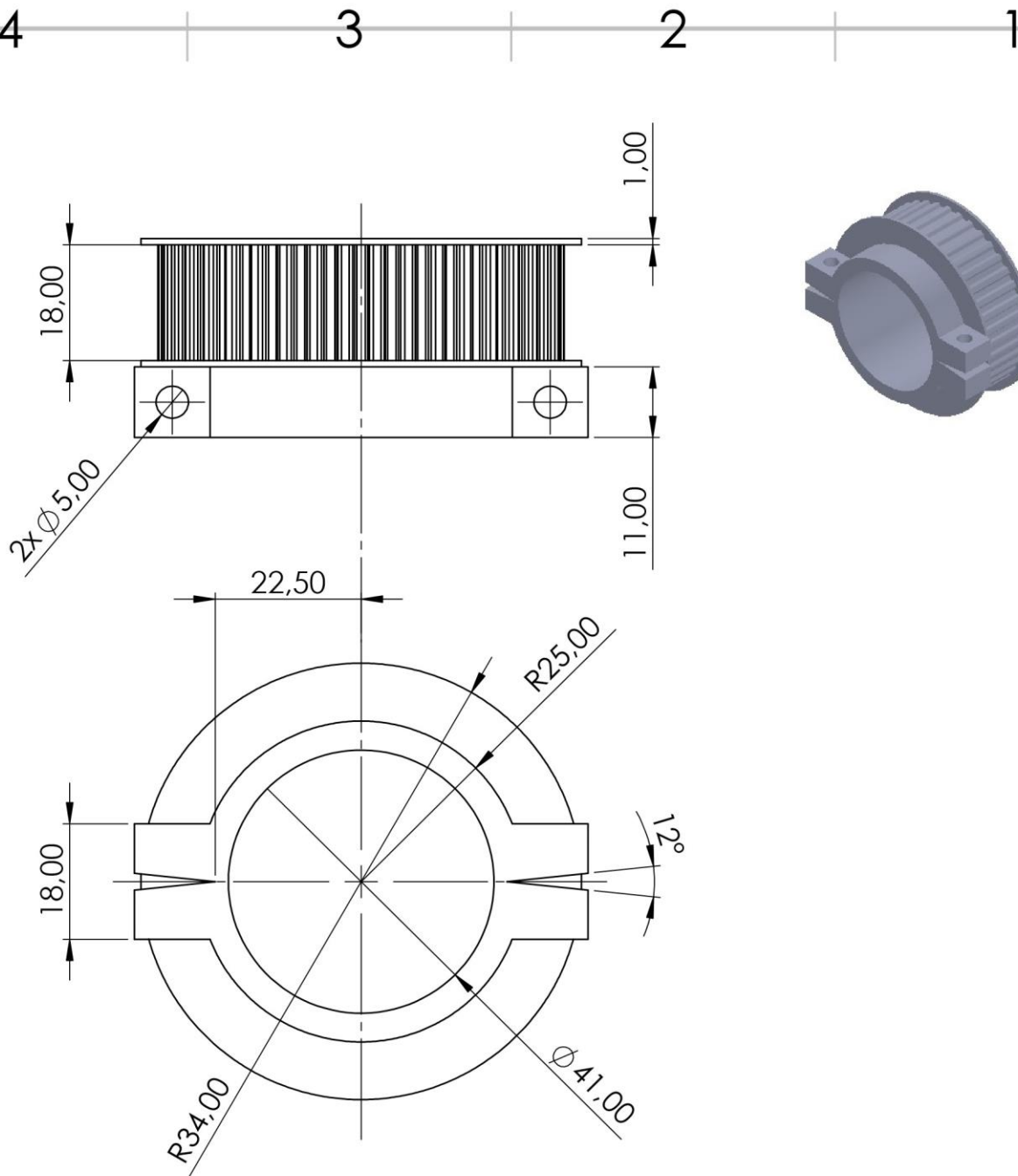
2:1



Plano:

1





Número de dientes	40
Paso	5 mm
Anchura de la correa	16 mm
Material	PLA



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Título:

# Polea dentada grande

TFG:

Caracterización del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico ligero

Formato:

A4

Dibujado por:

Pablo Arias Moreno

Fecha:

20/20/2021

Cotas:

mm

Corregido por:

José Luis Torres Moreno

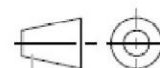
Fecha:

25/20/2021

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Escala:

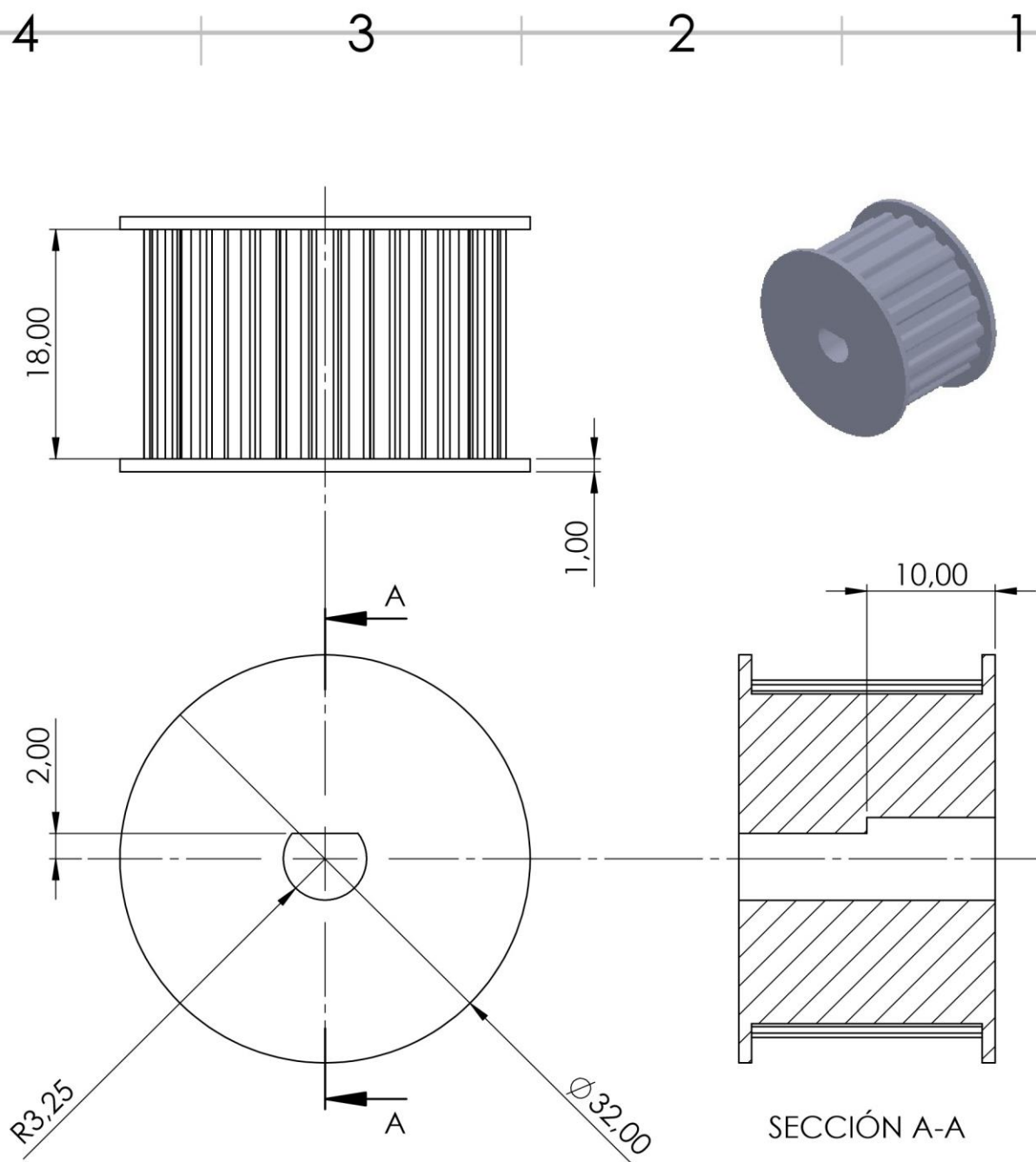
1:1



Plano:

2





SECCIÓN A-A

Número de dientes	18
Paso	5 mm
Anchura de la correa	16 mm
Material	PLA



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Título: **Polea dentada pequeña**

TFG:  
Caracterización del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico ligero

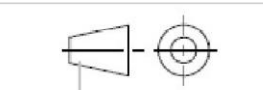
Formato:  
A4  
Cotas:  
mm

Dibujado por:  
Pablo Arias Moreno  
Corregido por:  
José Luis Torres Moreno

Fecha:  
20/20/2021  
Fecha:  
25/20/2021

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Escala:  
2:1



Plano:  
3



## **ANEXO II. Scripts desarrollados**





A continuación, se muestra el script desarrollado para el tratamiento de datos en Matlab.

## Script (gráficas.m)

```
importdata('Archivo.lvm');
```

Lo siguiente es ejecutar el *script*:

```
graficas
```

```
%Primero obtenemos las distintas variables de la matriz
```

```
t=ans(:,1);  
par=ans(:,2);  
ic=ans(:,3);  
im=ans(:,4);  
vm=ans(:,5);  
vc=ans(:,6);  
rads=ans(:,7);  
ace=ans(:,8);
```

```
%Aplicamos el suavizado de la señal con un valor del 5%
```

```
par=smooth(par,0.05,'loess');  
ic=smooth(ic,0.05,'loess');  
im=smooth(im,0.05,'loess');  
vm=smooth(vm,0.05,'loess');  
vc=smooth(vc,0.05,'loess');  
rads=smooth(rads,0.05,'loess');
```

```
%Dibujamos las gráficas de las distintas variables en función del tiempo
```

```
subplot(2,3,1)  
plot(t,par)  
title('Par [N·m]')  
xlabel('Tiempo (s)')  
subplot(2,3,2)  
plot(t,ic)  
title('Intensidad del campo [A]')  
xlabel('Tiempo (s)')  
subplot(2,3,3)  
plot(t,im)  
title('Intensidad del motor [A]')  
xlabel('Tiempo (s)')  
subplot(2,3,4)  
plot(t,vm)  
title('Voltaje del motor [V]')  
xlabel('Tiempo (s)')  
subplot(2,3,5)  
plot(t,vc)  
title('Voltaje del campo [V]')  
xlabel('Tiempo (s)')
```

```
subplot(2,3,6)
plot(t,rads)
title('Velocidad [rad/s]')
xlabel('Tiempo (s)')
```





## Resumen

Los vehículos eléctricos tienen cada vez un mayor impacto en nuestra sociedad. La reducción de los gases de efecto invernadero se ha convertido en un objetivo prioritario para asegurar un desarrollo sostenible y mejorar la calidad del aire en las ciudades. Puesto que en estos entornos no se necesitan grandes autonomías ni potencias elevadas, los vehículos eléctricos ligeros tienen un gran potencial para sustituir al parque automovilístico actual.

Por todo ello, este trabajo se enfoca en el modelado y la caracterización de un motor eléctrico de corriente continua, así como en los principales parámetros que rigen su control. Para lograrlo, se realizarán una serie de ensayos en un banco de pruebas y se procesarán los datos generados con el objetivo final de obtener un modelo que permita desarrollar técnicas de control para la optimización energética.

La principal aportación de este proyecto consiste en ofrecer un modelado de caja negra capaz de predecir los consumos energéticos de un vehículo eléctrico, además de proporcionar una metodología para la obtención de las funciones de transferencia que definen el comportamiento de un sistema partiendo de unos datos de ensayo.

Palabras clave: Motor CC, Modelado de sistemas, Automatización

## Abstract

Electric vehicles are having an increasing impact on our society. The reduction of greenhouse gases has become a priority objective to ensure sustainable development and improve air quality in cities. Since these environments do not require long autonomies or high power, light electric vehicles have a great potential to replace the current vehicle fleet.

Therefore, this work focuses on the modeling and characterization of a DC electric motor, as well as on the main parameters that govern its control. To achieve this, a series of tests will be carried out on a test bench and the data generated will be processed with the final objective of obtaining a model that will allow the development of control techniques for energy optimization.

The main contribution of this project consists of offering a black box model capable of predicting the energy consumption of an electric vehicle, as well as providing a methodology for obtaining the transfer functions that define the behavior of a system based on test data.

Keywords: DC Motor, System modeling, Automation