



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Control de impedancia de un exoesqueleto de  
extremidades inferiores

Autor/es

Pablo Álvarez Romeo

Director/es

Luis Enrique Montano Gella

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza

Noviembre 2017





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. PABLO ÁLVAREZ ROMEO,

con nº de DNI 17769989M en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
MÁSTER, (Título del Trabajo)

CONTROL DE IMPEDANCIA DE UN EXOESQUELETO DE EXTREMIDADES  
INFERIORES

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 NOVIEMBRE 2017

Fdo:  \_\_\_\_\_



## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer primero a mi familia, en concreto a mis padres, José Antonio Álvarez Conde y María Nieves Romeo Recaj, por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida, y el esfuerzo que han hecho para que llegue hasta aquí. También a mis abuelos, Marino Romeo Gracia y Delia Recaj Lorient, por creer en mí todos estos años.

En segundo lugar, agradecimientos a mis amigos, por mantenerme cuerdo mientras trabajaba en el proyecto y dibujar múltiples sonrisas en mi barbuda cara.

Y, por último, por su pequeña pero necesaria aportación, agradecimientos a la cafeína, por mantenerme operativo en los momentos más oscuros del proyecto.

Sin ninguno de vosotros no habría sido posible. Menos la cafeína. Gracias de nuevo.



## **Resumen**

El objetivo de este proyecto es diseñar un control adaptativo basado en impedancia, para un exoesqueleto de rehabilitación inferior. Este debe ser capaz de complementar los movimientos del usuario, aportando la fuerza restante necesaria para generar movimiento, y presentar capacidad de adaptación de trayectoria ante obstáculos. Este documento se basa en el trabajo realizado en el proyecto HYPER, dentro del marco de CONSOLIDER-INGENIO 2010. Para ello primero se realiza un estudio del equipo empleado, y la documentación y software disponible. Posteriormente, tras una evaluación del equipo, se realiza un modelado del exoesqueleto, en concreto del sistema de la cadera, en Matlab/Simulink. A continuación, se simula su respuesta con el control de admitancia en sus diferentes configuraciones, comenzando con un modelo exclusivamente rígido, añadiendo posteriormente amortiguación e inercia. Se estudia la capacidad de adaptación de dichos parámetros ante un comportamiento variable de las fuerzas externas. En cuanto a experimentación, se modela un sistema de medición de fuerzas a partir de mediciones del par motor y una galga extensiométrica, aplicando posteriormente el control de admitancia implementado en simulación. Estas pruebas se realizan con un usuario externo al robot, aplicando fuerzas externas manualmente para comprobar su funcionamiento. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en simulación y experimentación, proponiendo una serie de mejoras y trabajos futuros en esta línea de trabajo.





## Índice

1	Lista de figuras.....	1
2	Introducción .....	5
2.1	Motivación y objetivos.....	5
2.2	Contexto .....	5
2.3	Estado de la técnica.....	5
2.3.1	Algoritmos de control .....	5
2.3.2	Exoesqueletos de rehabilitación.....	7
2.4	Estructura .....	9
3	Modelado y control del exoesqueleto .....	11
3.1	Descripción del exoesqueleto de extremidades inferiores .....	11
3.1.1	Elementos mecánicos.....	11
3.1.2	Dispositivos electrónicos .....	12
3.1.3	Control de posición.....	12
3.1.4	Condiciones del equipamiento.....	13
3.2	Modelado para simulación .....	15
3.2.1	Modelado dinámico .....	15
3.2.2	Modelado del motor y del controlador .....	16
3.2.3	Comparación entre modelo y comportamiento real.....	17
3.3	Estimación y medida de par en articulaciones .....	19
3.3.1	Medida de par con galgas extensiométricas .....	19
3.3.2	Estimación del par motor.....	21
3.4	Control de admitancia .....	27
3.4.1	Concepto y esquema de control .....	27
3.4.2	Simulación del movimiento .....	28
3.4.3	Experimentación con el exoesqueleto.....	32
3.4.3.1	Adaptación de trayectorias .....	35
3.4.3.2	Modo de movimiento libre .....	37
3.5	Interacción con el entorno y rehabilitación. Análisis de resultados.....	39
4	Conclusiones .....	40
	Anexos .....	42
A	Puesta en marcha del prototipo.....	42
B	Cálculos .....	44
B.1	Parámetros de Denavit Hartenberg (D-H) del exoesqueleto (cadera).....	44
B.2	Cálculo de pares mediante las ecuaciones de Newton-Euler .....	45
B.3	Parámetros del controlador .....	47
C	System identification toolbox .....	48
C.1	Identificaciones base .....	48
C.1.1	PID .....	48
C.1.2	PID y Posición .....	50
C.1.3	PID y Velocidad.....	52
C.1.4	PID y Galga .....	54
C.1.5	PID, Posición y Velocidad.....	57
C.1.6	Modelo eléctrico .....	58
C.1.7	PID, Posición y Galga.....	63
C.1.8	Modelo mecánico.....	65

---

C.2	Respuestas con corrección de ganancia .....	67
C.3	Respuestas con corrección de ganancia y desfase (delay) .....	71
D	Simulador del exoesqueleto - Subsistemas .....	74
E	Experimentación .....	74
E.1	Esquemas.....	74
E.2	Resultados .....	76
E.2.1	Obstáculos con control rígido .....	76
E.2.2	Ayuda con control amortiguado .....	79
E.2.3	Modo de movimiento libre .....	83
5	Bibliografía .....	87

## 1 Lista de figuras

Figura 1 Esquemas de control de a) Fuerza con impedancia b) Posición con admitancia.....	6
Figura 2 Influencia de la constante de amortiguamiento en un sistema de segundo orden frente a una entrada de escalón unitario, extraído de Wikipedia .....	7
Figura 3. Modelo comercial de HAL para rehabilitación, comercializada por Cyberdyne.....	8
Figura 4 Modelo comercial de Lokomat para rehabilitación.....	9
Figura 5 Exoesqueleto H1 a) Modelado 3D. b) Prototipo.....	11
Figura 6 Controladores de los motores (izquierda) y ordenador embebido empleado (derecha). .....	12
Figura 7 Controlador de posición del motor de la cadera.....	13
Figura 8 Pierna izquierda del exoesqueleto empleada en experimentación. a) Pierna izquierda empleada. b) Sensores y placa JointCAN de adquisición y comunicaciones.....	14
Figura 9 Condiciones normales de funcionamiento con la trayectoria sin modificar. ....	14
Figura 10 Convenio de signos. ....	16
Figura 11 Control de velocidad del controlador. ....	17
Figura 12 Bloques de control de corriente, alimentación, conmutación, y motor empleados en simulación. ....	17
Figura 13 Comparación de posición entre el simulador y el motor real.....	18
Figura 14 Medición de la galga extensiométrica en a) Condiciones normales. b) Dos pares tipo obstáculo. c) Dos pares tipo ayuda. ....	19
Figura 15 Ajuste de la ecuación dinámica.....	20
Figura 16 Pares netos detectados con la galga.....	21
Figura 17 Señal sinusoidal de identificación. ....	22
Figura 18 Respuesta generada con la función de transferencia PID - Par identificada.....	23
Figura 19 Comparación de sistemas identificados modificados.....	24
Figura 20 Identificación PID, posición y velocidad con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales. b) Trayectoria con obstáculo. c) Trayectoria con apoyo. ....	25
Figura 21 Esquema general del control de admitancia empleado.....	27
Figura 22 Efectos del control de admitancia ante a) Obstáculos. b) Ayudas. ....	28
Figura 23 Esquema de control de admitancia en simulación.....	29
Figura 24 Posición medida con el control de rigidez para fuerzas de a) Obstáculo. b) Ayuda. ....	30
Figura 25 Influencia de diferentes valores de amortiguamiento en el ángulo de admitancia para obstáculos. a) Ángulo de admitancia. b) Posición medida.....	30
Figura 26 Influencia de los parámetros de admitancia con inercia en el ángulo de admitancia, ante una fuerza de obstáculo de tipo escalón unitario. ....	31
Figura 27 Influencia de los parámetros de admitancia con inercia en el ángulo de admitancia.....	32
Figura 28 Rango de operación del motor.....	33
Figura 29 Subsistema de admitancia variable.....	33

Figura 30 Esquema del medidor de fuerza. ....	34
Figura 31 Respuesta de un control rígido con $K=0.5$ en presencia de pares en ambos sentidos. ....	35
Figura 32 Comparación de diferentes controles de admitancia para mediciones experimentales. ....	36
Figura 33 Respuesta del control rígido con $K=0.25$ ante obstáculos y $Gain=8$ $D=1$ $K=2$ ante pares de tipo ayuda. ....	36
Figura 34 Control de admitancia en modo libre. ....	37
Figura 35 Análisis del medidor de par en modo libre. ....	38
Figura 36 Configuración de red. ....	43
Figura 37 Dimensiones del sistema. ....	44
Figura 38 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID - Par. ....	49
Figura 39 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID - Par. ....	49
Figura 40 Respuesta de la identificación PID y posición ante los datos de entrenamiento. ....	50
Figura 41 Respuesta de la identificación PID y posición ante los datos de comprobación. ....	50
Figura 42 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y posición - Par. ....	51
Figura 43 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Posición - Par. ....	51
Figura 44 Respuesta de la identificación PID y velocidad ante los datos de entrenamiento. ....	52
Figura 45 Respuesta de la identificación PID y velocidad ante los datos de comprobación. ....	53
Figura 46 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y Velocidad - Par. ....	53
Figura 47 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Velocidad - Par. ....	54
Figura 48 Respuesta de la identificación PID y galga ante los datos de entrenamiento. ....	55
Figura 49 Respuesta de la identificación PID y galga ante los datos de comprobación. ....	55
Figura 50 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y Galga - Par. ....	56
Figura 51 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Galga - Par. ....	56
Figura 52 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID, posición y velocidad - Par. ....	57
Figura 53 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID, posición y velocidad - Par. ....	57
Figura 54 Esquema de obtención de la consigna de voltaje. ....	58
Figura 55 Comparación de voltaje del sistema identificado PID - Vdc. ....	59
Figura 56 Esquema de medición usando el modelado eléctrico. ....	60
Figura 57 Respuesta del modelado eléctrico ante los datos de entrenamiento. ....	61
Figura 58 Respuesta del modelado eléctrico ante los datos de comprobación. ....	61
Figura 59 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID - Vdc. ....	62
Figura 60 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID - Vdc. ....	62

Figura 61 Respuesta de la identificación PID, posición y galga ante los datos de entrenamiento.....	63
Figura 62 Respuesta de la identificación PID, posición y galga ante los datos de comprobación.....	64
Figura 63 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID, posición y galga - Par. ....	64
Figura 64 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID, posición y galga - Par. ....	65
Figura 65 Respuesta del modelado mecánico ante los datos de entrenamiento. ....	66
Figura 66 Respuesta del modelado mecánico ante datos experimentales. ....	66
Figura 67 Identificación PID con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	67
Figura 68 Identificación PID y posición con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	68
Figura 69 Identificación PID y velocidad con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	68
Figura 70 Identificación PID y galga con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	69
Figura 71 Identificación PID, posición y velocidad con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	69
Figura 72 Identificación eléctrica con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	70
Figura 73 Identificación PID, posición y galga con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	70
Figura 74 Identificación PID con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	71
Figura 75 Identificación PID y posición con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	71
Figura 76 Identificación PID y velocidad con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	72
Figura 77 Identificación PID y galga con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	72
Figura 78 Identificación eléctrica con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	73
Figura 79 Identificación PID, posición y galga con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo.....	73
Figura 80 Subsistema de admitancia empleado en simulación.....	74
Figura 81 Filtrado de la señal de aceleración tomada en simulación. ....	74
Figura 82 Esquema de control de posición con medidor de pares externos y admitancia. ....	75
Figura 83 Control rígido $K=1$ ante obstáculo. ....	76
Figura 84 Control rígido $K=0.5$ ante obstáculo. ....	76
Figura 85 Control rígido $K=0.3$ ante obstáculo. ....	77

Figura 86 Control rígido $K=0.25$ ante obstáculo. ....	77
Figura 87 Control rígido $K=0.2$ ante obstáculo. ....	78
Figura 88 Control rígido $K=0.15$ ante obstáculo. ....	78
Figura 89 Control rígido $K=0.1$ ante obstáculo. ....	79
Figura 90 Control amortiguado con $Gain=1$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	79
Figura 91 Control amortiguado con $Gain=2$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	80
Figura 92 Control amortiguado con $Gain=3$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	80
Figura 93 Control amortiguado con $Gain=4$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	81
Figura 94 Control amortiguado con $Gain=5$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	81
Figura 95 Control amortiguado con $Gain=6$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	82
Figura 96 Control amortiguado con $Gain=8$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	82
Figura 97 Control amortiguado con $Gain=10$ $D=1$ $K=2$ ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado. ....	83
Figura 98 Control rígido con $K=1$ y amortiguado con $Gain=1$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	83
Figura 99 Control rígido con $K=0.5$ y amortiguado con $Gain=2$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	84
Figura 100 Control rígido con $K=0.3$ y amortiguado con $Gain=3$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	84
Figura 101 Control rígido con $K=0.25$ y amortiguado con $Gain=4$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	85
Figura 102 Control rígido con $K=0.2$ y amortiguado con $Gain=6$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	85
Figura 103 Control rígido con $K=0.15$ y amortiguado con $Gain=8$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	86
Figura 104 Control rígido con $K=0.1$ y amortiguado con $Gain=10$ $D=1$ $K=2$ en modo libre. ....	86

## 2 Introducción

### 2.1 Motivación y objetivos

Este trabajo toma como base los desarrollos producidos en el sector de la rehabilitación, concretamente la inferior. Las terapias tradicionales, basadas en ejercicios guiados por un asistente, han evolucionado con la aparición de los exoesqueletos de rehabilitación. Estos presentan nuevas posibilidades, tales como la recuperación asistida de fuerza, o de movimientos sincronizados, como es el caso de caminar. Para la recuperación inferior, el control más común es el de posición, el cual reproduce una trayectoria fija. Sin embargo, esta estrategia presenta problemas en presencia de fuerzas y perturbaciones externas, no teniendo capacidad de adaptación, lo cual puede generar fallos e incluso dañar al paciente.

Por ello, el objetivo del proyecto es diseñar e implementar un algoritmo de control flexible, con capacidad de adaptación, de manera que complemente los movimientos del usuario, detectando la fuerza ejercida por el mismo y aportando la restante para realizar el movimiento de manera fluida. Para ello, el control se basa en una impedancia adaptativa, el par ejercido sobre el exoesqueleto por la extremidad, y la posición.

### 2.2 Contexto

El proyecto se realiza dentro del grupo RoPeRT (Robotics, Perception and Real Time Group) en el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (i3a). Se basa en el trabajo realizado en el proyecto HYPER<sup>1</sup>, dentro del programa CONSOLIDER – INGENIO 2010, donde un exoesqueleto inferior para rehabilitación y asistencia fue desarrollado, empleándose en este trabajo la primera versión del mismo (H1).

### 2.3 Estado de la técnica

#### 2.3.1 Algoritmos de control

Las técnicas de control clásicas en robótica son de posición y fuerza, midiendo dichos parámetros exclusivamente, usualmente en combinación con un controlador de tipo PID (Proporcional Integral Derivativo) o sus variantes (Proporcional, Proporcional Derivativo o Proporcional Integral). Sin embargo, en terapias de rehabilitación inferior, estos controladores son insuficientes, al ser necesarias tanto la posición, para la trayectoria efectuada, como la fuerza, para adaptarse a elementos externos y perturbaciones.

El controlador de impedancia, extensamente explicado en [1]–[3], supone un método alternativo para sistemas dinámicos, donde el robot o manipulador interacciona con objetos, ofreciendo flexibilidad ante fuerzas externas. Para ello, se relacionan las variables de posición y fuerza, existiendo dos posibilidades: generar una fuerza a partir de errores de posición, o producir una variación de posición en

---

<sup>1</sup> <http://www.neuralrehabilitation.org/projects/HYPER/>

función de una fuerza de entrada. Estos dos modelos son, respectivamente, los controles de impedancia (Z) y admitancia (A), siendo uno inverso del otro, de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

$$Z(s) = \frac{F(s)}{x(s)} = I \cdot s^2 + D \cdot s + K \quad (1)$$

$$A(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{I \cdot s^2 + D \cdot s + K} \cdot F(s) \quad (2)$$

Estos controles dependen de tres componentes: inercia (I), amortiguación (D), y rigidez (K), presentando diferentes comportamientos en función de las condiciones de funcionamiento. Ambos modelos se aplican en conjunto con los controles básicos antes mencionados. Así pues, el control de impedancia complementa al controlador de fuerza, y el de admitancia al de posición, de acuerdo a la Figura 1.

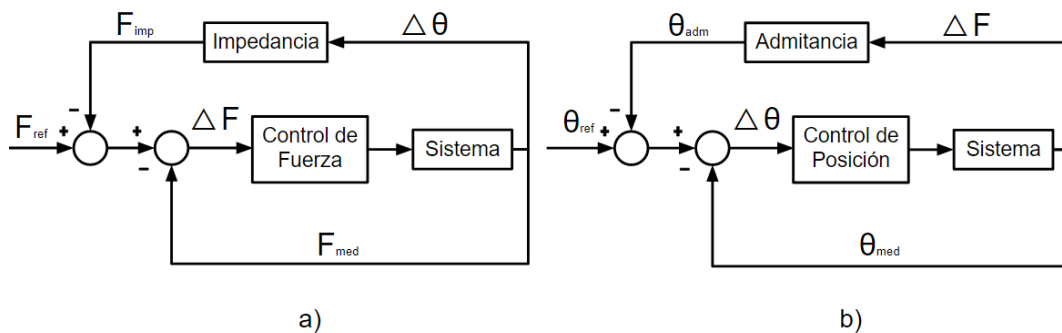


Figura 1 Esquemas de control de a) Fuerza con impedancia b) Posición con admitancia.

En el caso del controlador de admitancia cabe destacar el análisis temporal y de amortiguamiento de sus diferentes versiones. Así pues, en la versión rígida pura, donde solo se encuentra presente la constante K, el sistema se comporta como una constante de ganancia, siendo instantánea su respuesta, pero sin ofrecer amortiguamiento ni suavizado a la señal.

Para un control que incluya amortiguación D, la respuesta del sistema difiere del modelo rígido. La ecuación 3 indica la forma general de una función de transferencia continua con un solo polo, siendo T la constante de tiempo para el cual se alcanza el 63.21% del valor final si este es contante (entrada de tipo escalón), y G la ganancia en estado estacionario del sistema.

$$F(s) = \frac{G}{T \cdot s + 1} \quad (3)$$

Por lo tanto, en el caso del control amortiguado con un coeficiente de ganancia denominado *Gain*, la ganancia estática y la constante de tiempo serían las descritas en la ecuación 4.

$$A(s) = \frac{Gain}{D \cdot s + K} \rightarrow T = \frac{D}{K} \quad G = \frac{Gain}{K} \quad (4)$$



El tercer caso es un controlador de admitancia que incluya el componente inercial, siendo una función de transferencia continua con dos polos, de acuerdo a la ecuación 5.

$$F(s) = \frac{G \cdot w_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot s + w_n^2} \quad (5)$$

Siendo  $\xi$  la constante de amortiguamiento, y  $w_n$  la frecuencia natural no amortiguada. La influencia de la primera variable se puede observar en la Figura 2.

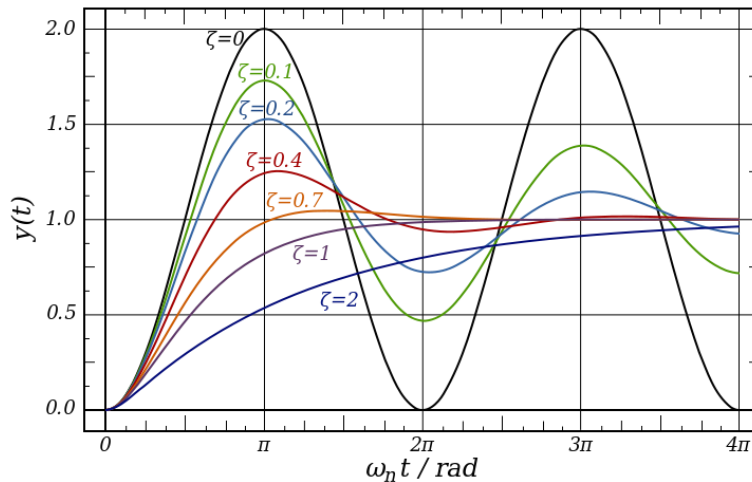


Figura 2 Influencia de la constante de amortiguamiento en un sistema de segundo orden frente a una entrada de escalón unitario, extraído de Wikipedia<sup>2</sup>.

Siendo la frecuencia natural, la ganancia y la constante de amortiguación en el control de admitancia los descritos en la ecuación 7, obtenidos a partir de la ecuación 6.

$$A(s) = \frac{Gain}{Js^2 + D \cdot s + K} \rightarrow A(s) = \frac{\frac{Gain}{J}}{s^2 + \frac{D}{J} \cdot s + \frac{K}{J}} \quad (6)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{J}} \quad \xi = \frac{D}{2\sqrt{KJ}} \quad G = \frac{Gain}{K} \quad (7)$$

### 2.3.2 Exoesqueletos de rehabilitación

Existen múltiples antecedentes de exoesqueletos inferiores con controles mixtos. En el ámbito de la asistencia un referente es el exoesqueleto HAL, que ha sido extensamente modificado y probado. En [4] se le aplica un control basado en impedancia y mediciones de electromiograma (EMG). Una función de asistencia para parapléjicos es explicada en [5], con controladores PD de posición, cuyas

<sup>2</sup> [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Damping\\_ratio&oldid=810203186](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Damping_ratio&oldid=810203186)

ganancias dependen de la fase de caminar y la articulación, incluyendo compensación de fricción y viscosidad. En [6], dentro de la asistencia para caminar, HAL se aplica a la sincronización de la pierna izquierda, con controladores PD de posición con compensación gravitatoria. En la actualidad HAL se comercializa para fines de rehabilitación inferior.



Figura 3. Modelo comercial de HAL para rehabilitación, comercializada por Cyberdyne<sup>3</sup>.

MoonWalker [7] es otro ejemplo, soportando el exoesqueleto parte del peso del usuario, empleando para ello un control de posición. En Mindwalker [8] se implementa un control de impedancia con seguimiento de trayectoria, empleando solo rigidez. También se encuentran modelos de 1-DOF [9], donde se emplea un control de admitancia con parámetros relativos al exoesqueleto y usuario, generando entonces una trayectoria de referencia. En [10] se diseña un control de admitancia en combinación con un control con modo de deslizamiento, lo que ofrece una mayor robustez del algoritmo. La fuerza se mide por dos métodos: modelado con dinámica inversa y EMG. El primero resulta óptimo ante condiciones estándar de funcionamiento, y el segundo con cambios bruscos, presentando una función de aprendizaje a partir del primer método.

Un exoesqueleto para ancianos y pacientes se presenta en [11], empleando un control difuso que usa mediciones de posición y fuerza. En MINA [12] se diseña un exoesqueleto de asistencia para parapléjicos, con un control proporcional-derivativo (PD) de par. También existen exoesqueletos de rehabilitación que ofrecen asistencia al sincronizar los movimientos al caminar, como en el caso de [13], donde se hace uso de un control interno de fuerza, para los actuadores neumáticos, y uno externo de posición, con un PD.

---

<sup>3</sup> <http://walk-again.com/hal-therapy/>



Figura 4 Modelo comercial de Lokomat para rehabilitación<sup>4</sup>.

Para ejercicios de rehabilitación están presentes modelos como Lokomat, uno de los exoesqueletos con mayor tiempo de desarrollo. En [14] presenta diversos algoritmos de control que hacen uso de modelos dinámicos directos e inversos, y de controles de impedancia para adaptación de trayectoria. Un control de impedancia que combina un controlador PD de posición y uno PI de fuerza es presentado en [12], y uno híbrido en [16]. Este último combina controles de posición y fuerza, logrando que el paciente tenga control sobre los movimientos que realiza, incrementando la efectividad de la rehabilitación. ALEX [17] [18] es un exoesqueleto que emplea un concepto similar al de impedancia, denominado '*campo de fuerza*', el cual aplica una fuerza virtual para corregir los errores de trayectoria realizados por el individuo. LOPES [19] [20] es otro ejemplo de exoesqueleto inferior de rehabilitación, que combina controladores de impedancia y par en serie. ANdROS [21] es un prototipo para rehabilitación de una sola pierna, empleando un control de impedancia para corrección de trayectoria. Un caso adicional sería NaTure-Gaits [17] [18] donde se aplican controles de posición. En este caso particular, se diseña un modelo que genera una trayectoria de referencia en función de las características físicas del sujeto.

Teniendo en cuenta los casos descritos, se considera que el control de admitancia es el más adecuado en este proyecto, al aportar una mayor flexibilidad ante fuerzas externas, además de disponer del control de posición base necesario, tal y como se explica posteriormente en el apartado 3.1.3.

## 2.4 Estructura

El capítulo 3 comienza con un análisis del exoesqueleto en 3.1, en términos de componentes y funcionamiento. Posteriormente, en el apartado 0 se explica el modelado realizado para simulación, tanto sobre el exoesqueleto, en aspectos mecánicos, como del motor y controlador empleados, analizando su validez y exactitud. Adicionalmente, para experimentación, un sistema de estimación de pares externos es desarrollado en 3.3, para poder aplicar posteriormente el control

---

<sup>4</sup> <http://airindo.com/product/lokomat/>

de admitancia. A continuación, en 3.4 se explican los esquemas de control aplicados, tanto en simulación como en experimentación, analizando y comparando los resultados obtenidos en el apartado 3.5. Para finalizar, se exponen las conclusiones del proyecto en el apartado 4, abordando los objetivos cumplidos y proponiendo una serie de mejoras y líneas de investigación futuras.

### 3 Modelado y control del exoesqueleto

#### 3.1 Descripción del exoesqueleto de extremidades inferiores

El exoesqueleto empleado, mostrado en la Figura 5, es explicado en detalle en la tesis de máster de Magdo Bortole [22]. En el presente apartado se procede a explicar las características mecánicas, electrónicas y de control necesarias para comprender el desarrollo posterior del proyecto.

Éste se compone, a grandes rasgos, de seis motores con sistemas de reducción acoplados, unidos por eslabones de aluminio, acoplándose al usuario por medio de bridas de sujeción. En cada articulación se sitúa un módulo de sensorización, con medición de fuerzas y posiciones. La unidad central, los controladores de los motores y la batería se encuentran situadas en una mochila, en la espalda del usuario.



Figura 5 Exoesqueleto H1 a) Modelado 3D. b) Prototipo.

Se procede a explicar las principales características.

##### 3.1.1 Elementos mecánicos

Los motores presentan sistemas reductores, de 100:1 para la cadera y 160:1 para rodilla y pie, teniendo unos limitadores mecánicos para evitar movimientos perjudiciales para el usuario, siendo los rangos los descritos en la Tabla 1. De esta manera, el par máximo constante de la cadera es de 39 Nm y 20.8 Nm para rodilla y tobillo.

	Reducción	Extensión [°]	Flexión [°]
Cadera	100:1	-20	100
Rodilla	160:1	-5	100
Tobillo	160:1	-15	20

Tabla 1 Ángulos límite de las articulaciones del proyecto de Magdo Bortole [22].

Los eslabones de unión entre articulaciones están fabricados de aluminio, teniendo geometrías variables que, en el modelado, se considerarán paralelepípedos macizos para simplificar cálculos.

### 3.1.2 Dispositivos electrónicos

En términos de hardware, el exoesqueleto presenta un motor para cada articulación (cadera, rodilla y tobillo), de tipología brushless (sin escobillas) de 3 fases, modelos Maxon EC90-90W<sup>5</sup> para caderas y Maxon EC45-70W<sup>6</sup> para el resto. Cada uno se controla con un servo drive modelo AZBH12A8<sup>7</sup>, de tipo PWM, el cual presenta varios modos de control, siendo empleado en este caso el de velocidad con sensores Hall. En este modo, el controlador tiene una entrada de control, con rango [-10, +10] V, que marca la velocidad de referencia, y las mediciones de los sensores Hall incorporados en el motor. Las salidas empleadas son las tres fases de potencia para el motor, y la medición de corriente consumida, a partir de la cual se calcula el par electromagnético. La alimentación de los controladores es de 24 VDC.

En términos de sensorización, en cada articulación se emplean potenciómetros de 10K $\Omega$ +0.25% como sensores de posición, y galgas extensiométricas como sensores de fuerzas externas, las cuales están acondicionadas con puentes de Wheatstone. Dichas medidas son procesadas y digitalizadas por un módulo de adquisición, denominado JointCAN, existiendo uno por cada articulación. Se conectan a la unidad central empleando el protocolo de comunicación Bus CAN. El ordenador empleado es un PC104, observable junto a los controladores en la Figura 6.



Figura 6 Controladores de los motores (izquierda) y ordenador embebido empleado (derecha).

### 3.1.3 Control de posición

Se usa el software Matlab/Simulink R2011a, con la Toolbox xPC Target, cargándose previamente en el ordenador objetivo un kernel de la misma. Esta Toolbox permite compilar y cargar directamente los diagramas desarrollados en Simulink en el procesador PC104 del exoesqueleto.

<sup>5</sup> <http://www.farnell.com/datasheets/1392365.pdf>

<sup>6</sup> <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/397172>

<sup>7</sup> <http://servosystems.com/pdf/amc/azbh12a8.pdf>

El esquema diseñado en los proyectos anteriores realiza adquisición de datos de los módulos JointCAN y controladores, procesándolos. Implementa un control de posición, que reproduce una trayectoria predefinida para ambas piernas, no teniendo el usuario control alguno sobre sus movimientos. Para ello usa un control PID (Proporcional Integral Derivativo) de posición, mostrado en la Figura 7, cuya salida es la consigna de velocidad del controlador, comprendida entre  $[-10,10]$  V. En el esquema están propuestos dos tipos de control adicionales: fuerza o par, y de impedancia. En este proyecto se ha desarrollado un tercer tipo de control, que se adapta mejor que los anteriores a las prestaciones deseadas.

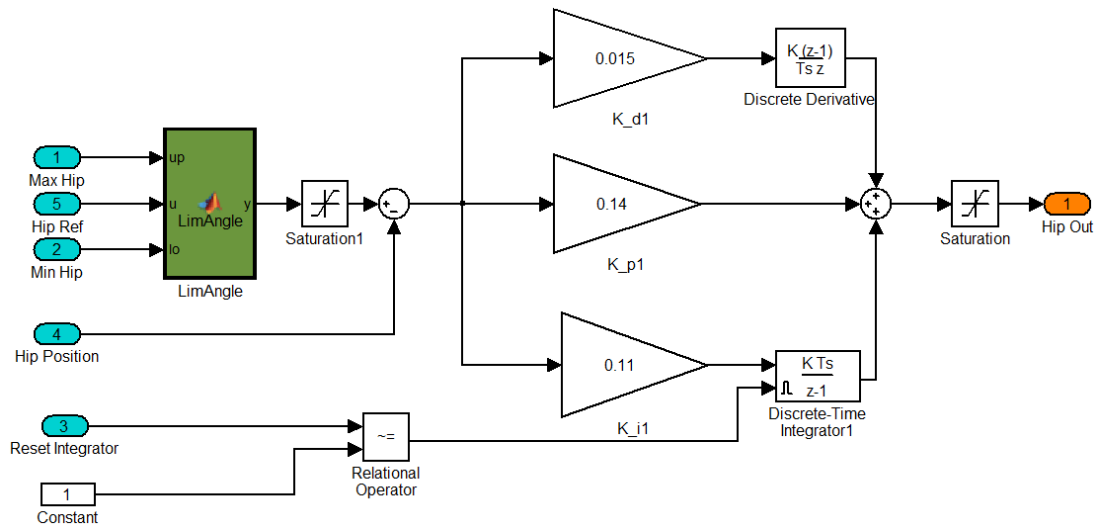


Figura 7 Controlador de posición del motor de la cadera.

### 3.1.4 Condiciones del equipamiento

Sin embargo, el prototipo empleado no se encuentra actualmente plenamente operativo, por problemas mecánicos que no se han podido resolver en este periodo de desarrollo del trabajo, y que se encontraban fuera del alcance del proyecto planteado. Actualmente funcionan los motores de las caderas y de los tobillos, con rozamientos y comportamientos no lineales, producto del desgaste. Por ello, las simulaciones y pruebas se han centrado en el motor de la cadera, en concreto la izquierda. En el anexo A se detallan las instrucciones para la carga de la imagen del kernel del xPC-Target de Matlab.

Respecto a los sensores, los potenciómetros y el sensor de corriente del controlador son funcionales, sin embargo, las galgas extensiométricas miden exclusivamente pares en sentido negativo (opuesto a la subida de la pierna), es decir, obstáculos, no teniendo apenas rango de detección para fuerzas en sentido positivo (subida). En cuanto al acondicionamiento de la galga extensiométrica, este afecta al control de admitancia, explicándose en el apartado 3.3 el método alternativo para medición de pares, que combina las mediciones de la galga con un modelado del sistema para la estimación de pares.

El exoesqueleto empleado se puede observar en la Figura 8, estando sujeto a una estructura fija. Se emplea exclusivamente el eslabón superior de la pierna

izquierda, debido a la carencia de fuerza del motor de la rodilla izquierda para sujetar el eslabón inferior. Esto supone una simplificación del sistema en términos dinámicos, al no tener efectos de inercia y fuerzas adicionales producto de un mayor número de articulaciones.

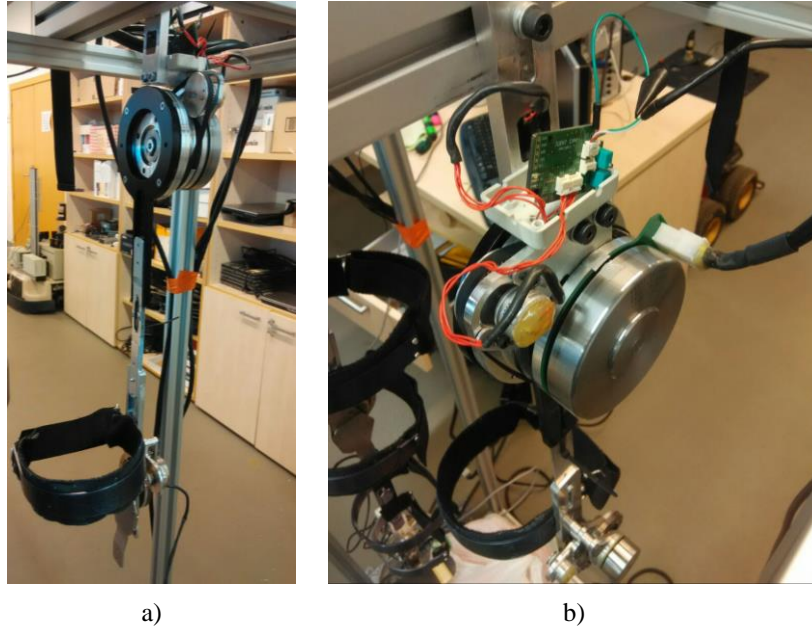


Figura 8 Pierna izquierda del exoesqueleto empleada en experimentación. a) Pierna izquierda empleada. b) Sensores y placa JointCAN de adquisición y comunicaciones.

La respuesta del motor al control de posición base es la mostrada en la Figura 9. En las pruebas realizadas en este proyecto las fuerzas son usualmente aplicadas en el segundo ciclo de movimiento, al ser idéntico al tercero, permitiendo visualizar más claramente los cambios producidos por el controlador.

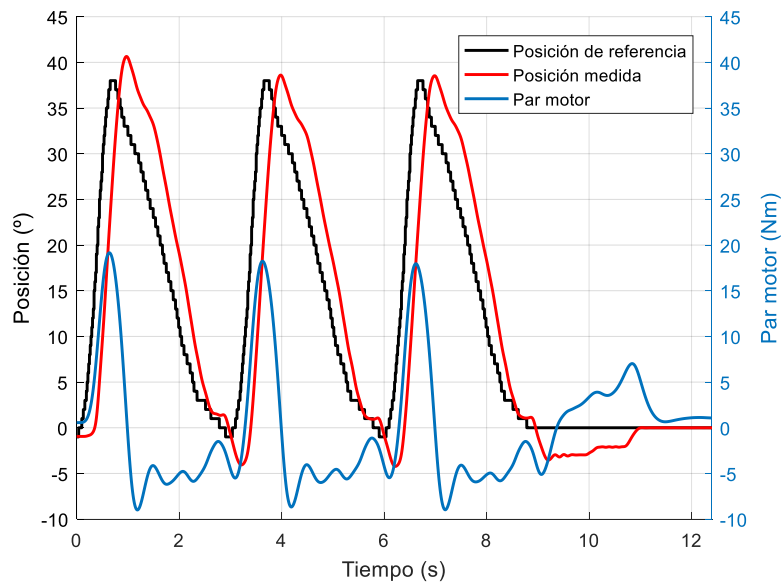


Figura 9 Condiciones normales de funcionamiento con la trayectoria sin modificar.



### 3.2 Modelado para simulación

El modelado se realiza en Matlab/Simulink R2016b. Primero se explican las ecuaciones dinámicas empleadas para calcular la carga soportada por el motor. Posteriormente, se explican los modelos del motor y controlador, justificando la elección de parámetros y comparando el comportamiento en simulación con el real.

#### 3.2.1 Modelado dinámico

Las ecuaciones dinámicas indican la carga soportada por el motor. El sistema mecánico empleado consiste en el motor de la cadera izquierda, fijo a una estructura teóricamente inamovible, teniendo acoplado al eje el eslabón de la pierna superior, con el motor de la rodilla y el sistema de reducción en el extremo inferior, teniendo este sistema un grado de libertad (Degree Of Freedom, DOF). Los parámetros empleados se exponen en el Anexo B.1.

Posteriormente se emplea el método de Newton-Euler [23] para el cálculo de pares soportados en los motores, de acuerdo al Anexo B.2. La fórmula final del par soportado es la ecuación 8.

$$\tau = S_x \cdot g \cdot m \cdot \sin(\theta) - S_y \cdot g \cdot m \cdot \cos(\theta) + ((S_y^2 + S_x^2) \cdot m + I_{zz}) \cdot \ddot{\theta} \quad (8)$$

Siendo  $\tau$  el par motor en Nm,  $S_x$  y  $S_y$  las distancias al centro de gravedad en coordenadas  $x$  e  $y$ , en metros,  $m$  la masa en Kg,  $g$  la aceleración en  $m/s^2$ ,  $I_{zz}$  la componente inercial en  $z$  en  $Kg \cdot m^2$ ,  $\ddot{\theta}$  la aceleración en  $rad/s^2$  y  $\theta$  la posición angular en  $rad/s$ . Sustituyendo por los datos explicados en el Anexo B.2, se obtiene la ecuación 9 para simulación.

$$\tau = 1.810123360792284 \cdot \sin(\theta) + 0.07401927063407857 \cdot \ddot{\theta} \quad (9)$$

Cabe destacar el convenio de signos empleado para los pares externos detectados, mostrado en la Figura 10. Los de tipo obstáculo (opuestos al movimiento) son positivos, siendo negativos para fuerzas de ayuda o apoyo. Se ha seleccionado este convenio siguiendo la siguiente premisa: las fuerzas de obstáculo, al oponerse al movimiento, requieren que el sistema aporte una mayor fuerza para la misma trayectoria, es decir, la fuerza normal más una adicional. En cambio, una fuerza de ayuda aporta fuerza al sistema, por lo tanto, el motor genera el par normal menos el par aportado por el elemento externo.

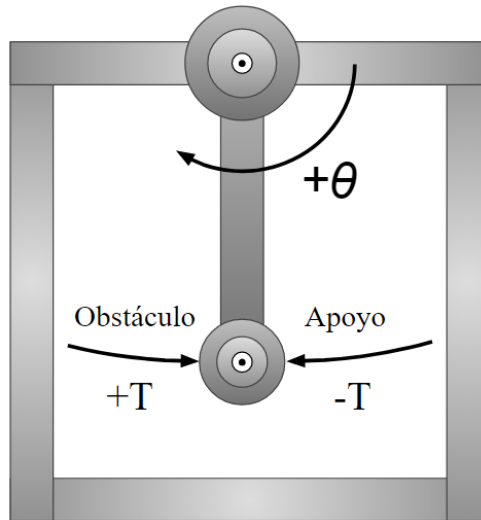


Figura 10 Convenio de signos.

### 3.2.2 Modelado del motor y del controlador

Se diseña en Simulink el esquema del motor y controlador. En Simulink se puede encontrar el modelado de un motor síncrono de imán permanente (Permanent Magnet Synchronous Motor), el cual se configura con los datos del datasheet del motor, modelo EC90, introduciendo sus valores de resistencia e inductancia entre terminales, inercia, par Nominal, voltaje Nominal y constante de par. El amortiguamiento y fricción estáticas son parámetros que, en la realidad, con el desgaste del equipamiento, presentan valores indeterminados y variables, por tanto, se han introducido unos valores estimados empíricamente.

El controlador se modela empleando el bloque “*Brushless DC Motor Drive*” de Simulink 2016b, el cual presenta una estructura similar a la modelada en los artículos [24] [25]. Se realizan modificaciones en la etapa de alimentación y en el controlador de velocidad. De acuerdo al fabricante y a la documentación del exoesqueleto, el controlador incluye un controlador de velocidad, cuya consigna de entrada es la producida por el control de posición del exoesqueleto, con un rango de  $[-10, +10]$  V. Este se conforma de un PID, cuya entrada es el error estimado entre dicha consigna y la velocidad medida mediante sensores Hall, y un componente de prealimentación (feedforward) derivativo. Este control de velocidad, representado en la Figura 11, produce como salida una consigna de par, entrada del siguiente subsistema, el de control de corriente. Este genera la secuencia de conmutación de los interruptores MOSFET a partir de mediciones de los sensores Hall, las de corriente de cada fase y la consigna de par. La tensión de alimentación de la fase inversora es de 24 VDC. Esta segunda etapa del controlador se puede observar en la Figura 12.

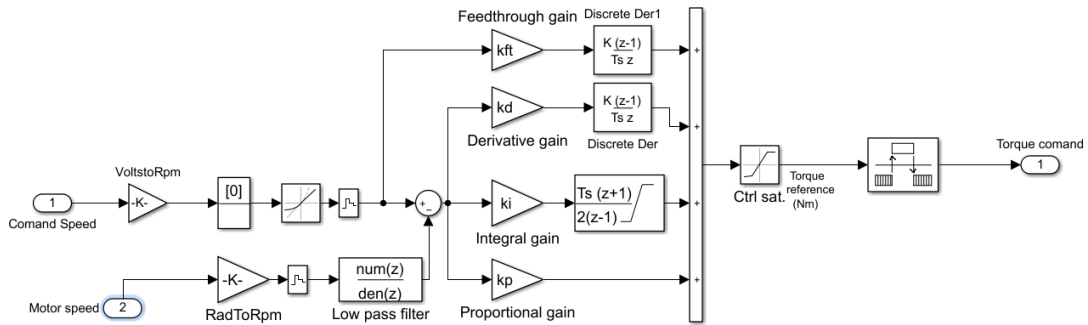


Figura 11 Control de velocidad del controlador.

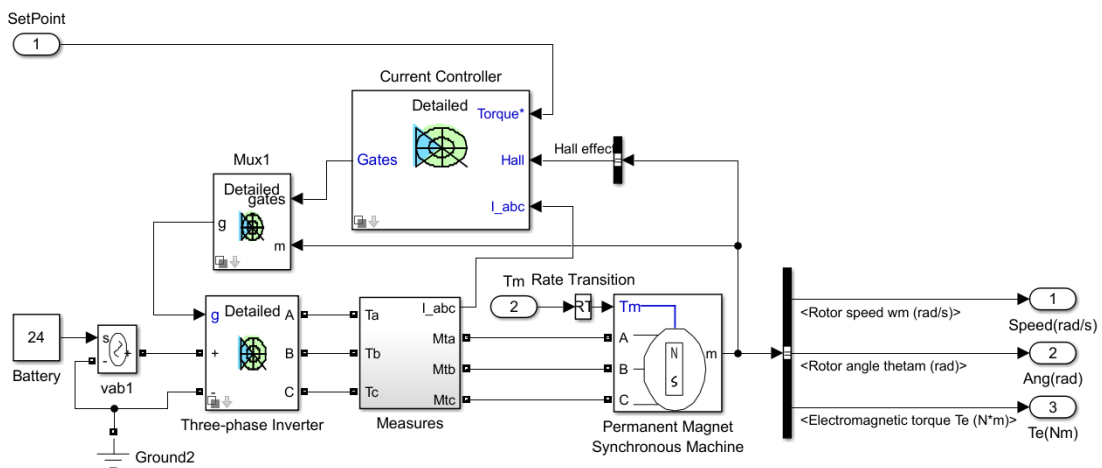


Figura 12 Bloques de control de corriente, alimentación, conmutación, y motor empleados en simulación.

Los valores empleados se pueden consultar en el anexo B.3.

### 3.2.3 Comparación entre modelo y comportamiento real

Los parámetros de los componentes de potencia se eligen de acuerdo a la documentación del motor, que establece los límites de par nominal y la constante de par. Sin embargo, al no tener disponible documentación de la configuración del driver, se estiman los valores del controlador de velocidad de manera empírica. Se aplican tres trayectorias de referencia, cuya respuesta real en posición se conoce, comparándose con la simulada. El objetivo es obtener comportamiento similar de la posición medida, en cuanto a tiempo de respuesta y amplitud, dentro de un margen de error. Por lo tanto, se realizan diversas pruebas, variando los parámetros del controlador, rozamiento estático, coeficiente de amortiguamiento viscoso y tasas de muestreo del driver. Se obtiene un controlador que ofrece una respuesta similar ante movimientos de duración media-baja, presentando una menor eficiencia ante cambios bruscos en la posición de referencia. Sin embargo, como el objetivo del simulador es analizar la influencia de los diferentes parámetros del control de admitancia para trayectorias normales, es suficiente. En la Figura 13 se presentan las comparaciones descritas para distintas trayectorias de referencia, estando representada una trayectoria estándar en la trayectoria 3, con un 90% de acierto.

Las condiciones iniciales son determinantes para la respuesta del driver, puesto que en la trayectoria 1 la trayectoria es estándar, pero el pico inicial en la referencia determina la respuesta posterior. Como se puede apreciar, la trayectoria medida y la salida del modelo se aproximan bastante. Se puede considerar que el modelo es lo suficientemente preciso para la evaluación del esquema y parámetros de control que se van a evaluar en el control de admitancia.

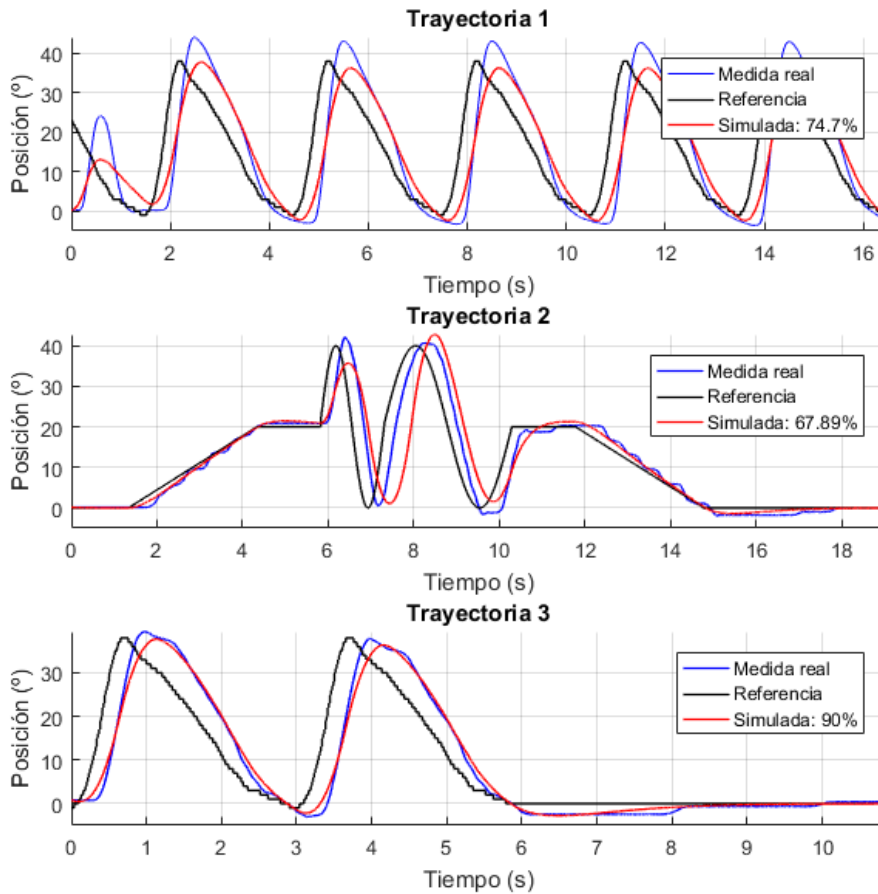


Figura 13 Comparación de posición entre el simulador y el motor real.

### 3.3 Estimación y medida de par en articulaciones

Para realizar el control de admitancia en el exoesqueleto se requieren mediciones de las fuerzas externas al dispositivo. Sin embargo, como se ha mencionado en el apartado 3.1.4, la galga extensiométrica empleada no realiza mediciones correctas en el sentido de las fuerzas de apoyo. Posiblemente necesite un rediseño del puente de Wheatstone utilizado, pero no se ha querido alterar el hardware del exoesqueleto original. Por lo tanto, ante la dificultad de reemplazar la galga y cambiar la electrónica, de la cual no se tiene documentación, se opta por realizar un modelado del sistema. Se comenta a continuación la obtención del par neto a partir de la galga, para posteriormente exponer el modelado complementario para calcular los pares netos negativos, de tipo ayuda.

#### 3.3.1 Medida de par con galgas extensiométricas

Las mediciones realizadas con las galgas extensiométricas no miden en Nm y presentan un desfase en su medición, pudiendo medir, en equilibrio, fuerzas de bajo módulo. En la Figura 14 se pueden ver las mediciones que experimenta la galga en diversas situaciones. Las fuerzas de obstáculo y ayuda se aplican en el tramo de subida de la pierna. Las fuerzas de ayuda son las que presentan saturación en 0, al no estar en el rango de medición.

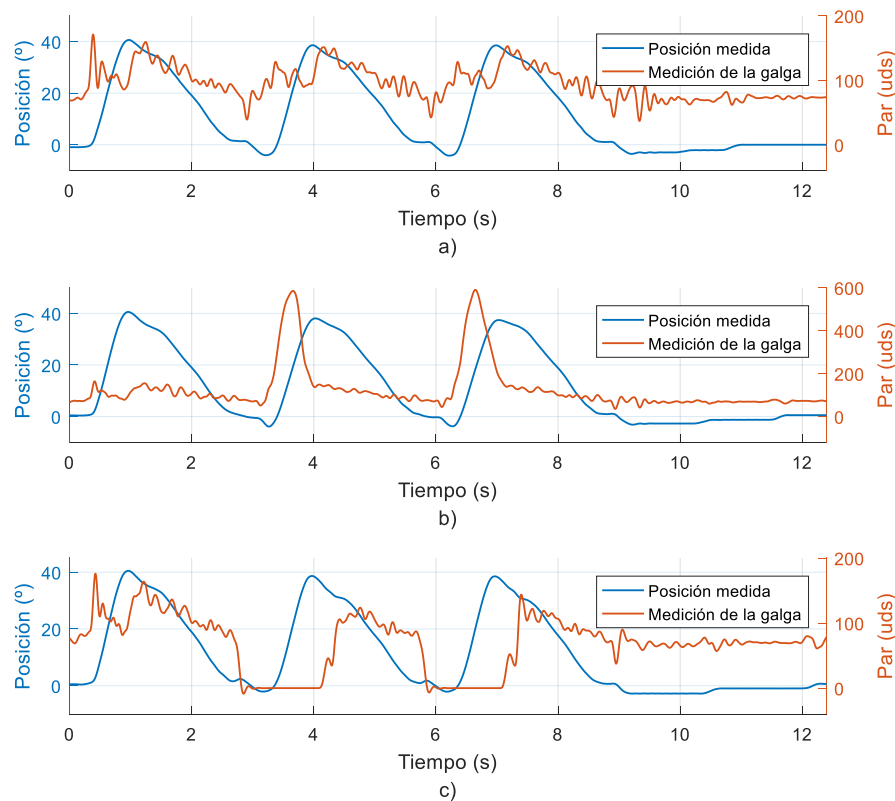


Figura 14 Medición de la galga extensiométrica en a) Condiciones normales. b) Dos pares tipo obstáculo. c) Dos pares tipo ayuda.

Por lo tanto, para poder medir los pares producto de las fuerzas externas, hay que restar los que son producto de la gravedad y dinámica del sistema (aceleraciones, inercias, etc.). El cálculo de este par se explica en el Anexo B.2. En su versión simplificada, solo hay tres variables: el ángulo, la aceleración angular y el desfase u offset. Sin embargo, no se tienen los parámetros mecánicos del sistema, y obtenerlos mediante el cálculo de la geometría induciría a error, debido a la complejidad geométrica del sistema. Para ello, en lugar de realizar los cálculos mecánicos, se emplea un algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados. Este ajuste se realiza para diferentes valores de desfase (offset) y de las constantes a y b, de la ecuación 10.

$$N = a \cdot \sin(\theta) + b \cdot \ddot{\theta} + \text{offset} \quad (10)$$

El mejor resultado se obtiene para unos valores de  $a=108.9688$ ,  $b= 6.3343$  y un offset de 74 unidades. La curva resultante se muestra en la Figura 15.

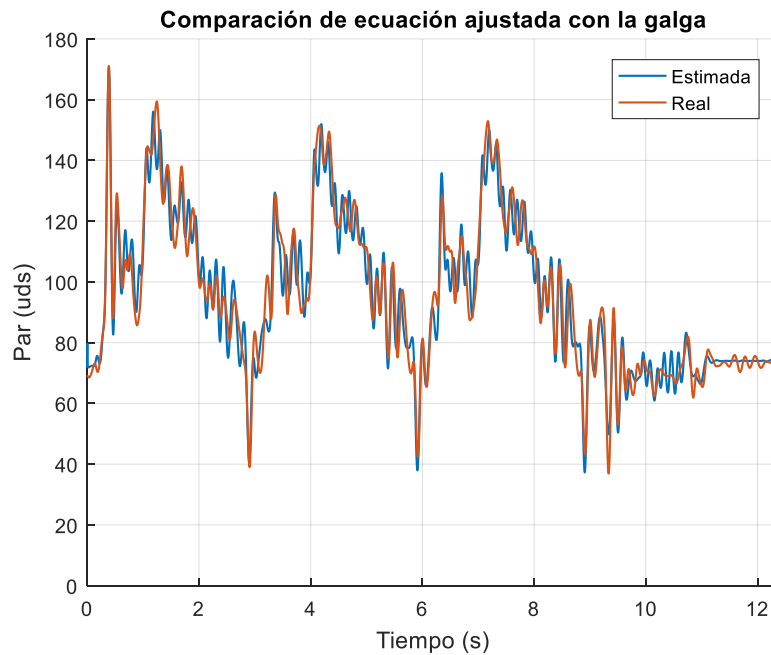


Figura 15 Ajuste de la ecuación dinámica

Una vez ajustada, requiere ser convertida a Newtons-metro (Nm). Para ello se emplean los datos de la galga cuando hay un obstáculo. Se calcula la diferencia entre el par del motor en presencia de obstáculo y el normal, y la diferencia entre los valores máximos se divide por la fuerza neta. Esta fuerza es la diferencia entre la medición de la galga en presencia de fuerza y la calculada. Con este método se obtiene una constante que, aunque no calcula el par exacto, nos permite convertir las mediciones de fuerza a cantidades de similar magnitud a las reales. En la Figura 16 se pueden ver las fuerzas medidas por la galga para los casos anteriores.

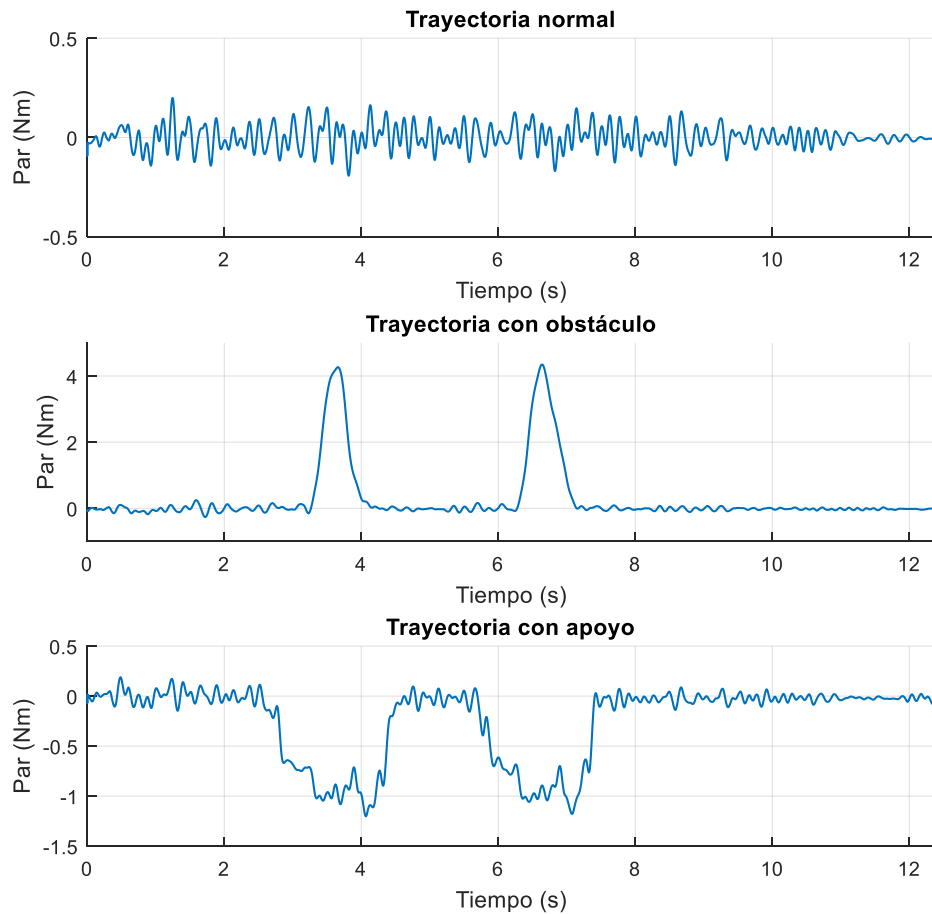


Figura 16 Pares netos detectados con la galga.

El resultado es una medición aceptable, que permite medir obstáculos y detectar fuerzas de apoyo, con el inconveniente de su cuantificación. Cabe destacar que, aunque en la posición de equilibrio las fuerzas de apoyo apenas se pueden medir, si la pierna se encuentra levantada, el valor de la galga es mayor por la influencia de la gravedad, por lo tanto, las fuerzas de apoyo presentan un mayor rango de medición. Sin embargo, en condiciones normales es insuficiente, pasando a explicar en el apartado siguiente otro método de estimación de fuerzas.

### 3.3.2 Estimación del par motor

Para obtener las fuerzas externas se emplean las mediciones de par electromagnético del motor, obtenidas a partir de la medición de corriente del controlador. Analizando las mediciones del par motor en presencia y ausencia de fuerzas, se observa un mayor par ejercido si hay obstáculos, y uno menor si hay fuerzas de apoyo. Por lo tanto, para poder medir el par neto, se modela el sistema con la carga que soporta por defecto. Entonces, si el sistema está correctamente calculado, al restar el par obtenido en la realidad con el calculado se obtiene el externo. El modelado debe emular el comportamiento del motor sin fuerzas externas, solo con la estructura adjunta, de manera que calcule el par bruto que genera el motor en condiciones normales. De esta manera, con el par medido del

motor real, calculando la diferencia de ambos se obtiene el par neto, es decir, el par producto de las fuerzas externas. Adicionalmente, se busca que presente un coste computacional bajo, para poder efectuarse en tiempo real en el exoesqueleto.

Por dicha razón, un modelado como el realizado en simulación no es posible, debido a la alta carga computacional que requiere y a la falta de precisión que presenta. Se opta por emplear el módulo de identificación de sistemas de Matlab, denominado ‘*System Identification Toolbox*’. Este permite obtener modelos matemáticos a partir de datos experimentales. Se procede a realizar la identificación de funciones de transferencia discretas del sistema.

Para realizar una identificación correcta, lo ideal es introducir al sistema objetivo una señal aleatoria que incluya la mayor cantidad posible de frecuencias, y preferiblemente sea de tipo onda cuadrada aperiódica. Sin embargo, en el exoesqueleto una entrada de este tipo podría provocar inestabilidades. Por ello, la identificación se ha realizado con una señal senoidal, de frecuencias alternas y variables, teniendo un ciclo de cada una. En el presente caso, la señal de par se intenta identificar en primera instancia con la señal de PID generada por el control de posición, que será la entrada al sistema (controlador-motor-reductor-estructura). Por lo tanto, en vez del control de posición estándar, se aplica una señal sinusoidal de 1V de amplitud, enviada directamente al controlador, obteniendo la Figura 17.

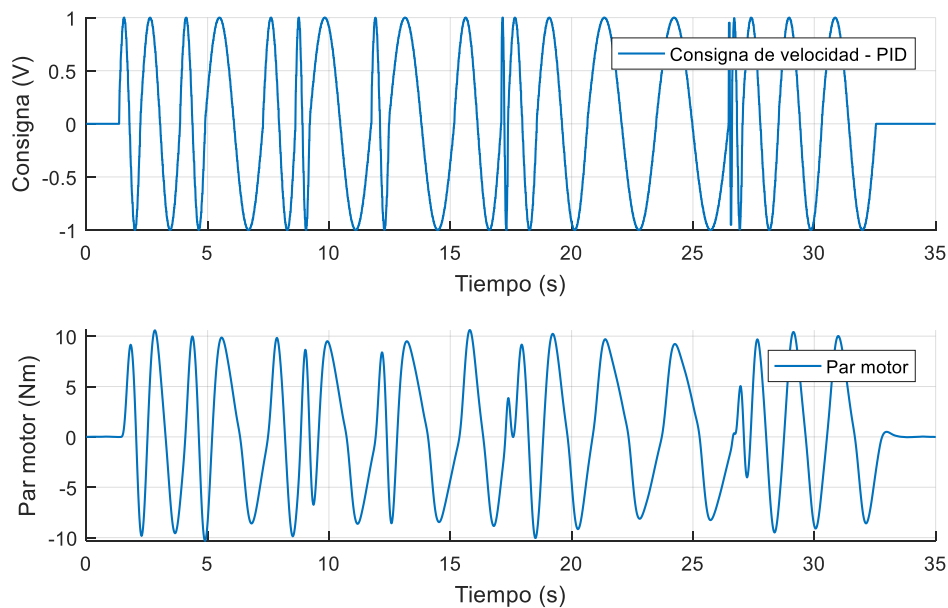


Figura 17 Señal sinusoidal de identificación.

Se realiza la identificación, obteniendo un mejor resultado con 3 polos, 1 cero y prealimentación, mostrados en la ecuación 11. Se comprueba su eficiencia tanto para la señal identificada como para una trayectoria estándar, mostrando en la Figura 18 el par ejercido en la realidad y el calculado por medio de la identificación para ambos casos. Cabe destacar que la eficiencia es calculada a partir de la diferencia entre las señales y la media de la señal original, estando ya implementado en la función de Matlab denominada ‘*compare*’.



$$F(z^{-1}) = \frac{-0.0008717 + 0.0008885z^{-1}}{1 - 2.952z^{-1} + 2.905z^{-2} - 0.9526z^{-3}} \quad (11)$$

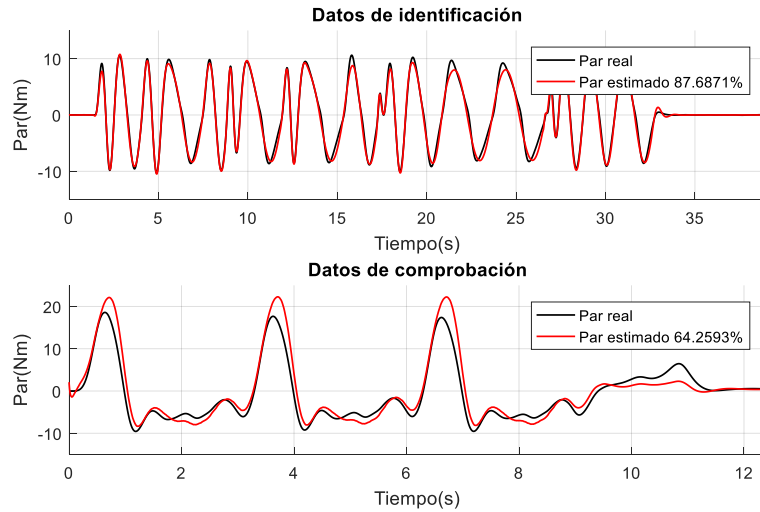


Figura 18 Respuesta generada con la función de transferencia PID - Par identificada.

La respuesta obtenida presenta una eficiencia de 64.2593% para una trayectoria estándar, insuficiente para medir correctamente fuerzas externas. Adicionalmente, se observa que el par estimado excede al real en una proporción constante, para valores positivos. Se requiere una mayor precisión si se quieren medir pares externos. Por ello se realizan diferentes identificaciones, añadiendo entradas adicionales, tales como la posición angular, velocidad angular y la medición sin tratar de la galga extensiométrica. También se realiza identificación combinada con un modelado eléctrico simple, el cual trata al motor como uno de una sola fase. Adicionalmente, se realiza una identificación con un modelado mecánico. La explicación de dichos modelados se encuentra en el anexo C.1, junto al análisis de sus polos, ceros y respuesta en frecuencia. Las eficiencias obtenidas, para una trayectoria estándar, se pueden observar en la Tabla 2.

Sistema - Entradas	Identificación (%)	Comprobación (%)
PID	87.6871	64.2593
PID+Posición(°)	90.5000	67.7416
PID+Velocidad(°/s)	90.4629	74.5865
PID+Galga(uds)	88.8601	56.5529
PID+Posición(°)+ +Velocidad(°/s)	92.4657	74.4462
Modelo eléctrico	90.8704	68.3134
PID+Posición(°)+ +Galga(uds)	88.2940	65.3283
Modelo mecánico	83.2206	41.9297

Tabla 2 Eficiencias de los sistemas identificados para los datos de entrenamiento y los de prueba.

Analizando los resultados de comprobación, se concluye que no cumplen los requisitos mínimos de eficiencia necesarios, puesto que el error cometido es

elevado. Sin embargo, se observa que los valores máximos positivos del par identificado y real mantienen la misma proporción para cada caso, de acuerdo al anexo C.2. Adicionalmente, las señales presentan un mayor error debido a una falta de alineamiento de las ondas, o sincronización. Se aplica una corrección de ganancia a la señal identificada, y un retraso a la señal de par real, para sincronizarla con la identificada y poder medir un par neto de menor error. En la Tabla 3 se muestran los resultados, comparando las funciones identificadas con la versión modificada, además de mostrar el error medio cuadrático para cada una. No se ha realizado la comparación para el modelado mecánico debido a su baja eficiencia, descartándose para el sistema de medición. Ejemplos de medición de obstáculos y pares de ayuda se muestran en el anexo C.3.

Sistema - Entradas	Ganancia	Retraso (ms)	Eficiencia (%)	Diferencia de eficiencia (%)	Error medio cuadrático ( $10^3 \cdot \text{uds}$ )
PID	0.8046	44	78.1315	+13.8722	2.677
PID+Posición(°)	0.7937	43	78.4852	+10.7436	2.5899
PID+Velocidad(°/s)	0.8223	41	84.1854	+9.5989	1.3994
PID+Galga(uds)	0.7414	43	68.8774	+12.3245	5.4222
PID+Posición(°)+ +Velocidad(°/s)	0.8386	40	83.9397	+9.4936	1.4424
Modelo eléctrico	0.8105	45	81.1744	+12.861	1.9828
PID+Posición(°)+ +Galga(uds)	0.7938	44	76.5149	+11.1867	3.0874

Tabla 3 Eficiencias de los sistemas identificados con corrección de ganancia y sincronización.

Se obtiene una mejora general de los rendimientos, siendo el caso más preciso tanto por eficiencia como por error cuadrático medio el tercero, que emplea la consigna del PID y la velocidad medida. Sin embargo, la señal generada es ruidosa, debido a que, para mejorar la eficiencia, se emplean más polos, los cuales incluyen ruido para ajustar mejor la señal. Es por ello que se decide emplear la segunda señal más eficiente, identificada empleando PID, posición (°) y velocidad (°/s). Esta última, aunque presenta una eficiencia levemente inferior, ofrece una señal menos ruidosa, requisito necesario para el control de admitancia donde, en el caso del control rígido puro, se amplifica directamente la fuerza, amplificando el ruido también si se encuentra presente. En la Figura 19 se muestra el error de medición de ambas en ausencia de fuerzas.

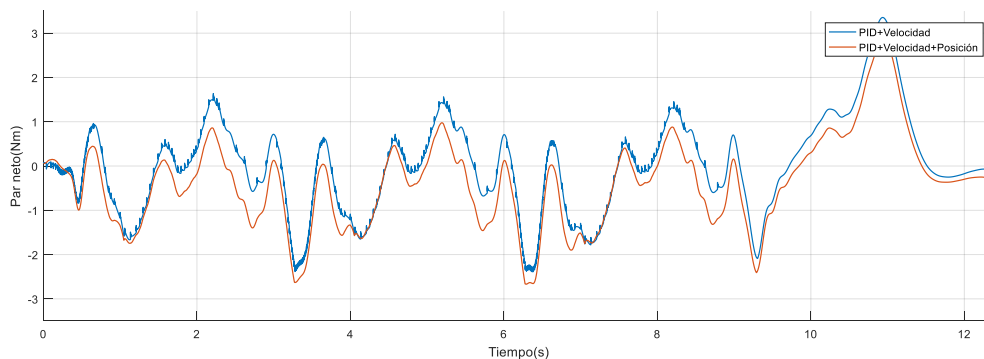


Figura 19 Comparación de sistemas identificados modificados.

El sistema identificado empleado es por tanto el que combina mediciones del PID de posición, la velocidad angular, y el ángulo de la cadera. Las funciones de transferencia se muestran en las ecuaciones 12-14.

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{-0.0003122 + 0.0003201z^{-1}}{1 - 2.238z^{-1} + 0.7357z^{-2} + 1.243z^{-3} - 0.7408z^{-4}} \quad (12)$$

$$\frac{T(z)}{\theta(z)} = G_2(z-18) = \frac{-0.0002093 + 0.002011z^{-1} - 0.003394z^{-2} + 0.001592z^{-3}}{1 - 2.984z^{-1} + 2.969z^{-2} - 0.9844z^{-3}} \quad (13)$$

$$\frac{T(z)}{\dot{\theta}(z)} = G_3(z-14) = \frac{0.0002592 + 0.0003032z^{-1} - 0.0005739z^{-2}}{1 - 2.238z^{-1} + 0.7357z^{-2} + 1.243z^{-3} - 0.7408z^{-4}} \quad (14)$$

Siendo el par obtenido calculado a partir de las tres funciones de transferencia de acuerdo a la ecuación 15.

$$T(z) = G_1(z) \cdot PID(z) + G_2(z-18) \cdot \theta(z) + G_3(z-14) \cdot \dot{\theta}(z) \quad (15)$$

Se comprueba en la Figura 20 el cálculo de par externo por medio de identificación para los tres casos: trayectoria normal, con obstáculo y con fuerza de ayuda o apoyo. El par motor se muestra sin la sincronización, la cual ya está incluida en el par neto calculado.

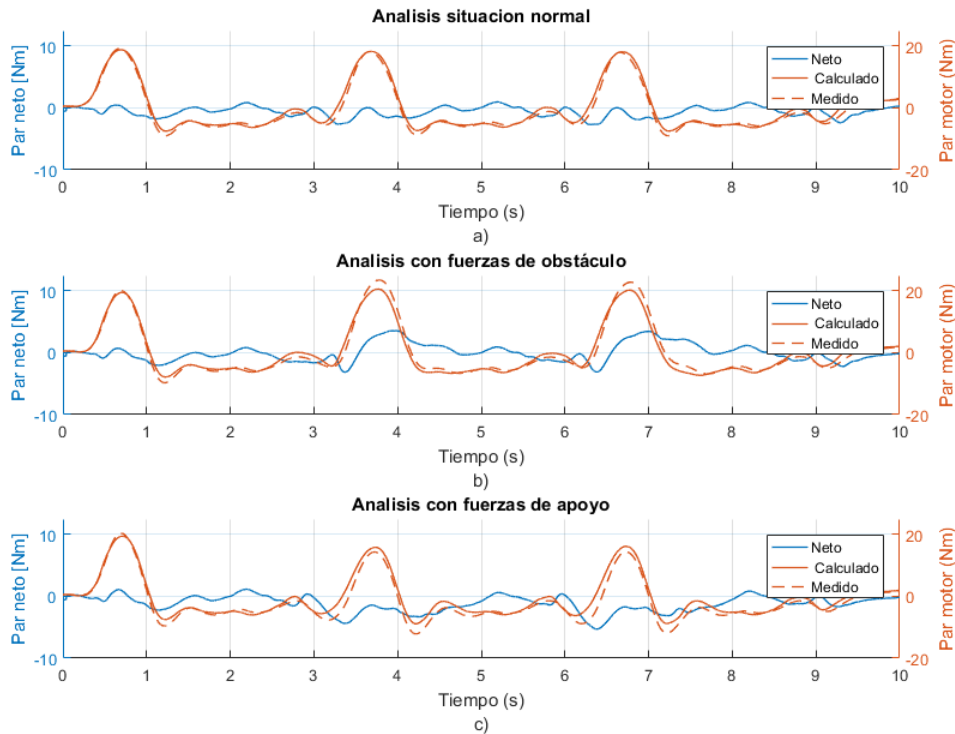


Figura 20 Identificación PID, posición y velocidades con corrección de ganancia y retraso aplicada a  
a) Trayectorias normales. b) Trayectoria con obstáculo. c) Trayectoria con apoyo.

Las fuerzas se aplican en el segundo y tercer paso, observando que se detectan los dos tipos de fuerza, dando valores positivos para obstáculos y negativos para apoyo/ayuda. Por esta razón, en el modelo experimental se combinan las

mediciones de la galga extensiométrica e identificación, empleando la galga para cuantificar obstáculos detectar apoyos. Para el segundo tipo de fuerza el par calculado será el de mayor valor, a elegir entre galga e identificación.

### 3.4 Control de admitancia

#### 3.4.1 Concepto y esquema de control

En el presente capítulo se exponen el control de admitancia empleado tanto en simulación como en experimentación, mostrado en la Figura 21, y las mediciones obtenidas, analizando la influencia de los parámetros en la respuesta del motor.

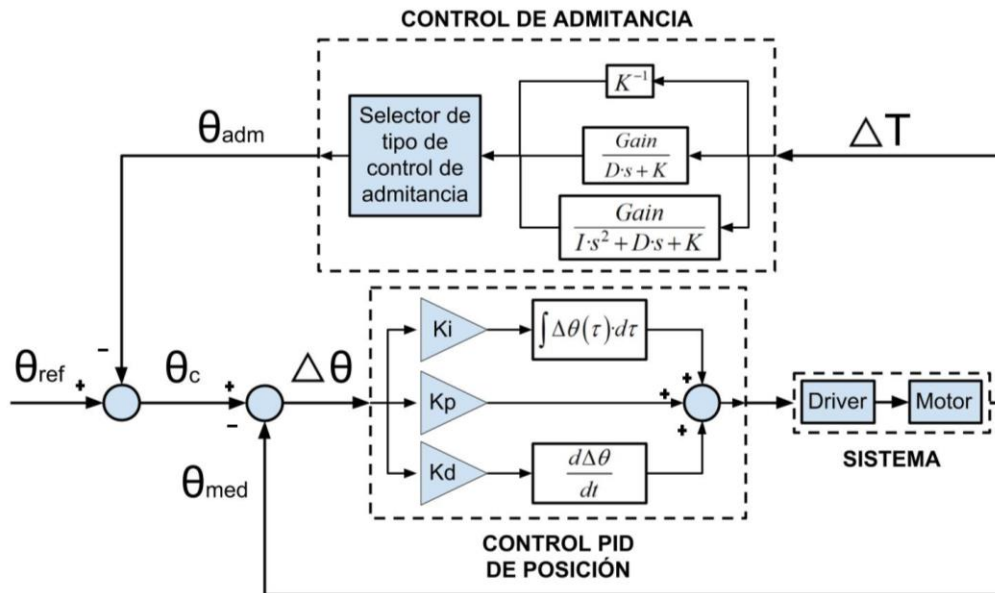


Figura 21 Esquema general del control de admitancia empleado.

El control de admitancia aplicado genera, a partir de las mediciones de fuerzas externas, una modificación del ángulo, que en el caso de un obstáculo es negativa y con una fuerza de ayuda o apoyo es positiva. De esta manera, en la trayectoria normal del exoesqueleto, una de obstáculo disminuiría el valor de la consigna del control de posición ( $\theta_c$ ), al existir un elemento externo que se opone a la subida de la pierna. En cambio, si hay una fuerza de ayuda, el ángulo de referencia se incrementa, realizando una subida más rápida de la pierna, o manteniéndola en un ángulo positivo si al bajarla choca con un escalón. Estas situaciones son visibles en la Figura 22.

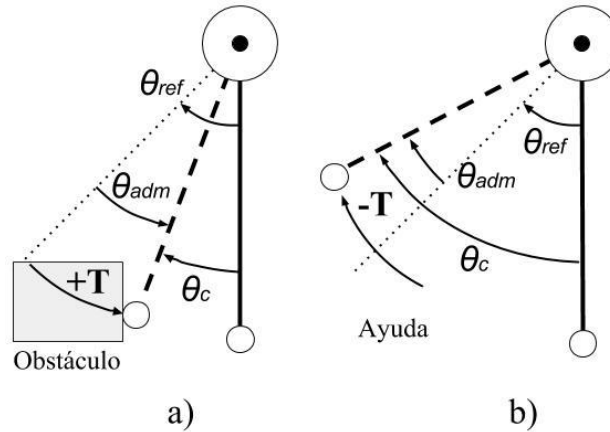


Figura 22 Efectos del control de admitancia ante a) Obstáculos. b) Ayudas.

Un detalle importante a destacar es la respuesta temporal de los diferentes controladores de admitancia.

Para analizar la influencia del controlador de admitancia se aplica primero al simulador para evaluar la respuesta ante diferentes parámetros, y posteriormente se seleccionan los modelos más flexibles, analizando su respuesta en el exoesqueleto, comparando resultados.

### 3.4.2 Simulación del movimiento

El esquema de control empleado en simulación es el representado en la Figura 23, que implementa el esquema conceptual representado en la Figura 21, siendo mostrados sus subsistemas en el D. El tipo de control de admitancia es seleccionado antes de simular, indicando si se aplica un control rígido (solo K), amortiguado (D y K) o inercial (I, D o K). Las perturbaciones externas aplicadas son pares de tipo escalón unitario, estudiándose perturbaciones tanto de obstáculo como de ayuda. Cabe destacar que el sistema reductor 100:1 se aplica a las mediciones de posición, sus derivadas (velocidad y aceleración) y al par que soporta el motor.

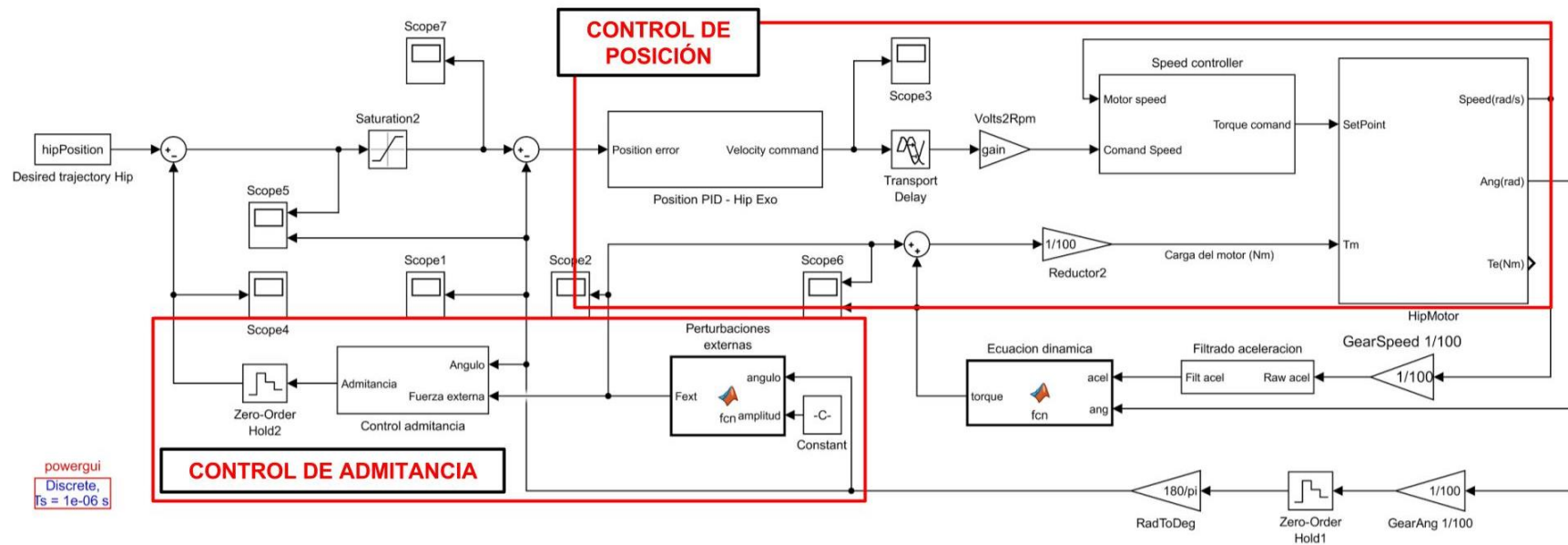


Figura 23 Esquema de control de admittance en simulación.

Se aplican los diferentes controles de admitancia. En la Figura 24 se puede observar la variación de comportamiento del motor ante diferentes controles de tipo rígido (K), los cuales son proporcionales a la fuerza tipo escalón introducida. Por lo tanto, con una rigidez baja (K=0.1) el sistema presenta una mayor flexibilidad, modificando en gran medida su posición respecto a la trayectoria estándar. Una rigidez alta se aproxima a realizar un control de posición puro (K=10).

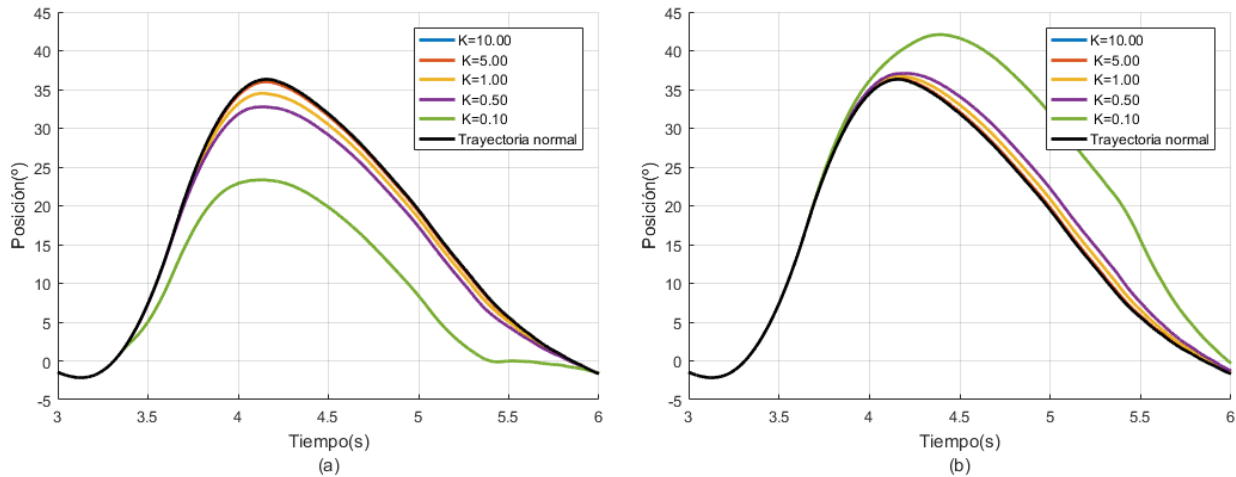


Figura 24 Posición medida con el control de rigidez para fuerzas de a) Obstáculo. b) Ayuda.

Con un modelo amortiguado ( $D \ll 0$ ) la influencia y la forma del ángulo generado varían. Siendo un modelo flexible si la rigidez es baja, la relación entre el coeficiente de amortiguamiento y el de rigidez determinan la forma de onda resultante. Para una amortiguación baja el sistema se comporta de manera similar a un rígido puro, teniendo una menor constante de tiempo T. En cambio, para valores mayores la onda resultante presenta una mayor lentitud de respuesta, lo que conlleva a su vez una forma de onda más suave, tal y como se puede observar en la Figura 25 para obstáculos. La respuesta para fuerzas de ayuda presentaría la misma respuesta de admitancia en este caso, pero en sentido contrario.

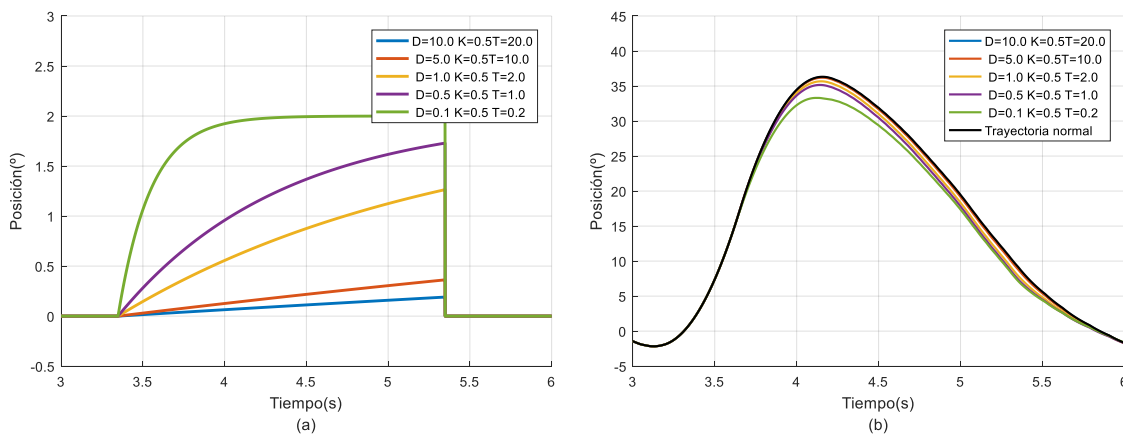


Figura 25 Influencia de diferentes valores de amortiguamiento en el ángulo de admitancia para obstáculos. a) Ángulo de admitancia. b) Posición medida.



Añadir el componente inercial ( $I > 0$ ) incrementa la complejidad del controlador de admitancia. Como en los casos anteriores los controles más flexibles se obtienen con valores bajos, analizando entonces como influyen los valores de los tres parámetros (inercia  $I$ , amortiguación  $D$  y rigidez  $K$ ) a la forma de onda resultante, estudiando su coeficiente de amortiguamiento  $\xi$ . Se aplican diferentes combinaciones de parámetros, para estudiar la influencia de sistemas con sobre-amortiguamiento, inercias elevadas, etc. Tras analizar en la Figura 26 diferentes posibilidades, y calcular ganancia, frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento en la Tabla 4, se concluye que, para conseguir un control inercial flexible, hay que aplicar coeficientes bajos. Así, se tiene una mayor ganancia, escogiendo un amortiguamiento inferior a la rigidez, y una inercia a su vez menor que el amortiguamiento, de manera que se obtenga un sistema ligeramente subamortiguado o críticamente amortiguado, con un coeficiente  $\xi$  en torno a 0.7-1. Adicionalmente, la frecuencia natural debe presentar un valor alto, para que el sistema responda con mayor rapidez.

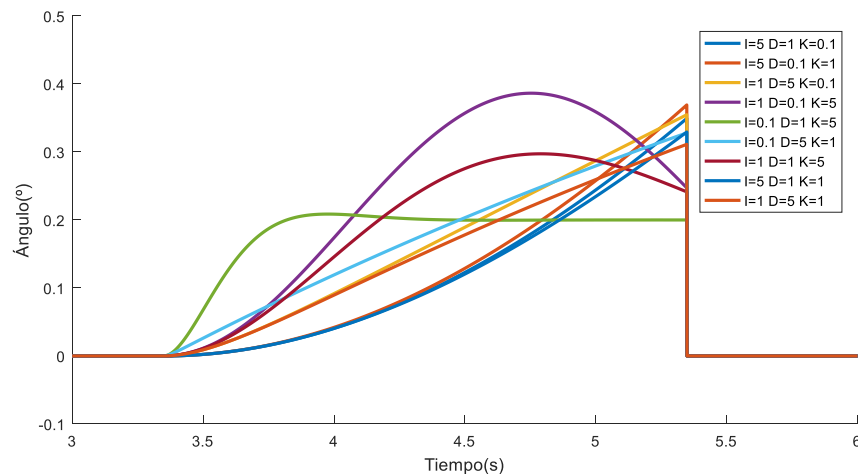


Figura 26 Influencia de los parámetros de admitancia con inercia en el ángulo de admitancia, ante una fuerza de obstáculo de tipo escalón unitario.

Ganancia	I	D	K	G	$w_n(\text{rad/s})$	$\xi$
1	5	1	0.1	10	0.141	0.707
1	5	0.1	1	1	0.447	0.022
1	1	5	0.1	10	0.316	7.905
1	1	0.1	5	0.2	2.236	0.022
1	0.1	1	5	0.2	7.071	0.707
1	0.1	5	1	1	3.162	7.905
1	1	1	5	0.2	2.236	0.223
1	1	1	5	0.2	2.236	0.223
1	5	1	1	1	0.447	0.223
1	1	5	1	1	1	2.5

Tabla 4 Análisis de las características de ganancia estática y amortiguamiento para cada combinación de parámetros de admitancia.

En la Figura 27 se observa, para los coeficientes anteriores, la posición obtenida al aplicar dichos controles con una ganancia de 10, tanto para obstáculos como apoyo. La respuesta es parecida en la mayoría, teniendo una mayor flexibilidad para  $I=0.1$ ,  $D=1$  y  $K=5$ , debido a la rapidez de su señal. De estos resultados se deduce que, para el presente caso, la inercia no mejora la flexibilidad del sistema, siendo el resultado más flexible el que emplea una inercia inferior al resto de coeficientes, pudiéndose considerar esta omisible.

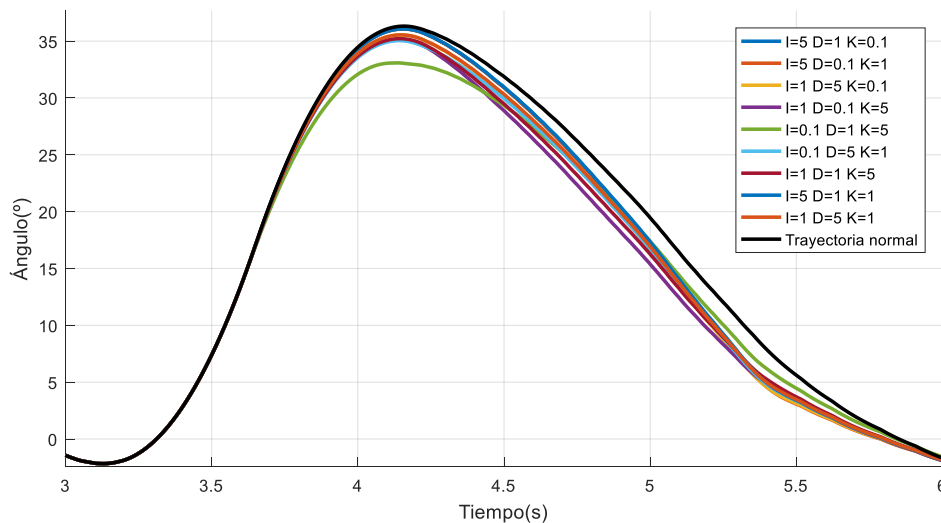


Figura 27 Influencia de los parámetros de admitancia con inercia en el ángulo de admitancia.

Una vez analizados en simulación los diferentes controles, se procede a comprobar su comportamiento en el modelo real en el siguiente apartado.

### 3.4.3 Experimentación con el exoesqueleto

En el prototipo se ha aplicado un esquema similar, representado en el anexo E.1. Respecto al empleado en simulación existen dos principales diferencias. La primera es el estimador de fuerza externa, que calcula el par combinando mediciones del sistema identificado definidas en el apartado 3.3.2 y la ecuación de la galga obtenida en el apartado 3.3.1. La galga se aplica a los pares de tipo obstáculo, de valor positivo. Para los valores negativos se emplea una combinación de ambas, usándose la galga para indicar la presencia de fuerzas de ayuda. Si es así, el valor de la fuerza de ayuda es el de mayor amplitud generada (galga o identificación). Cabe destacar que el retraso aplicado al par motor para calcular el par neto por identificación también se aplica a las mediciones de la galga. En la Figura 30 se muestra el esquema del medidor.

La segunda diferencia es el control de admitancia. Como consecuencia de emplear dos sistemas de medición diferentes en función del par detectado, se ha implementado un sistema de admitancia variable, mostrado en la Figura 29. Este es capaz de conmutar entre un control de admitancia rígido ( $D=I=0$ ) a uno amortiguado en función de las fuerzas y posiciones medidas. En el presente proyecto, el control rígido se encuentra operativo para obstáculos si el ángulo medido es mayor de  $-5^\circ$ .

En cambio, para fuerzas de ayuda se aplica un control amortiguado, hasta que alcanza un ángulo de  $40^\circ$ . Se han establecido dichos límites teniendo en cuenta el rango de operación de una trayectoria normal  $[-2^\circ, 35^\circ]$ . En la Figura 28 se muestran dichos límites angulares, junto al rango de operación del conjunto. Se muestran los límites mecánicos del exoesqueleto (rojo), y los establecidos para el control (naranja), que deshabilitan el control si son superados, como medida de seguridad adicional.

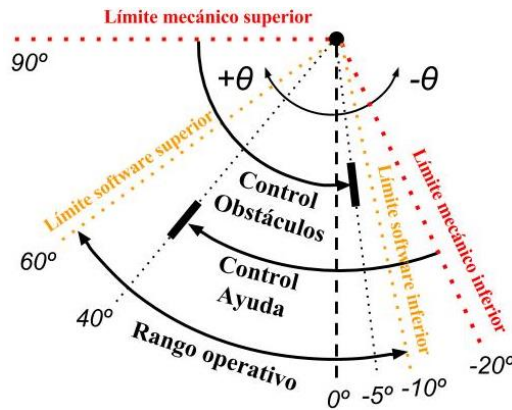


Figura 28 Rango de operación del motor.

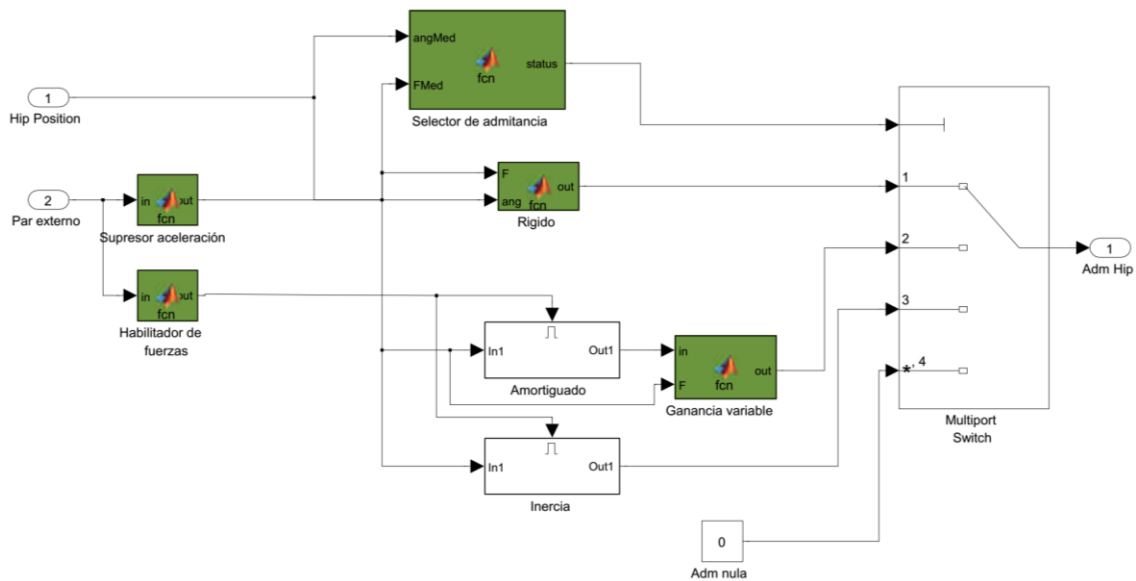


Figura 29 Subsistema de admitancia variable.

Con los sistemas descritos se realizan dos grupos de experimentos. El primero consiste en adaptación de trayectorias, donde se introduce una trayectoria de referencia y el control de admitancia modifica sus trayectorias en función de las fuerzas externas. El segundo experimento es el denominado “*modo libre*”, en el cual no se introduce ninguna referencia, siendo la entrada del PID de posición, y por tanto el error de ángulo medido, el generado por el sistema de admitancia. Se comienza explicando los resultados de adaptación de trayectorias.

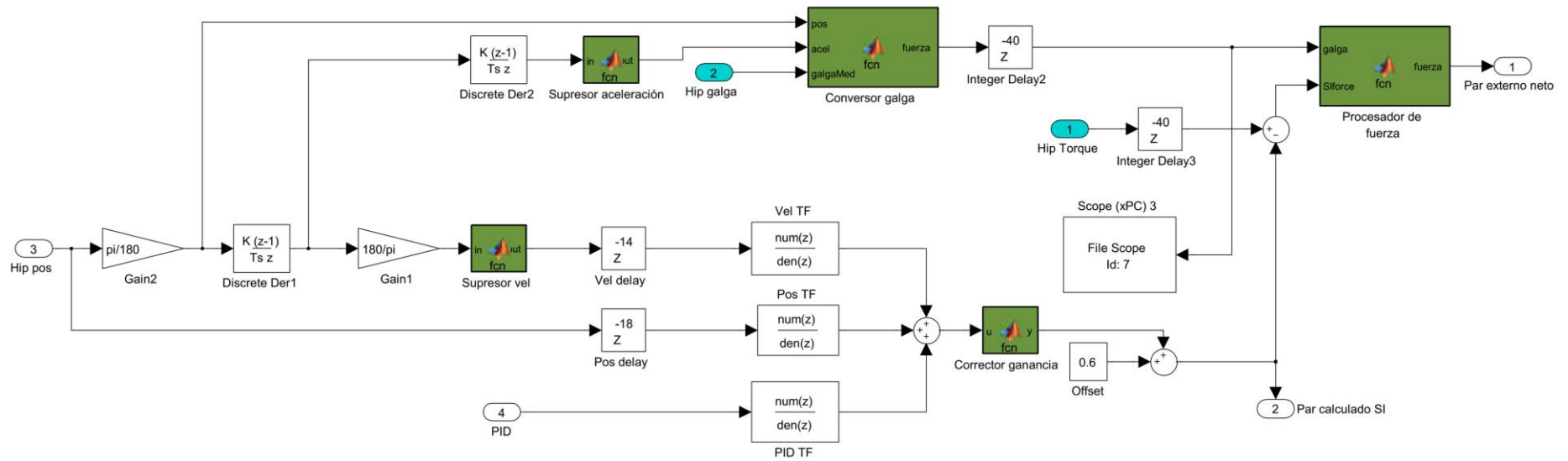


Figura 30 Esquema del medidor de fuerza.

### 3.4.3.1 Adaptación de trayectorias

Para adaptación de trayectorias se realizan pruebas similares a las de simulación, con la diferencia de que la fuerza aplicada no es uniforme, al ser manual, ejercida por un usuario con la mano. Se realizan pruebas con el control rígido, observándose una respuesta correcta para obstáculos, tal y como se puede ver en la Figura 31 para una rigidez baja (admitancia positiva en verde en el segundo ciclo). La posición real disminuye por efecto del obstáculo, el comportamiento deseado. Sin embargo, para fuerzas de ayuda no se obtiene una respuesta adecuada, debido a que la forma de onda presenta oscilaciones, amplificándose estas con un control rígido flexible (admitancia negativa en verde en el tercer ciclo).

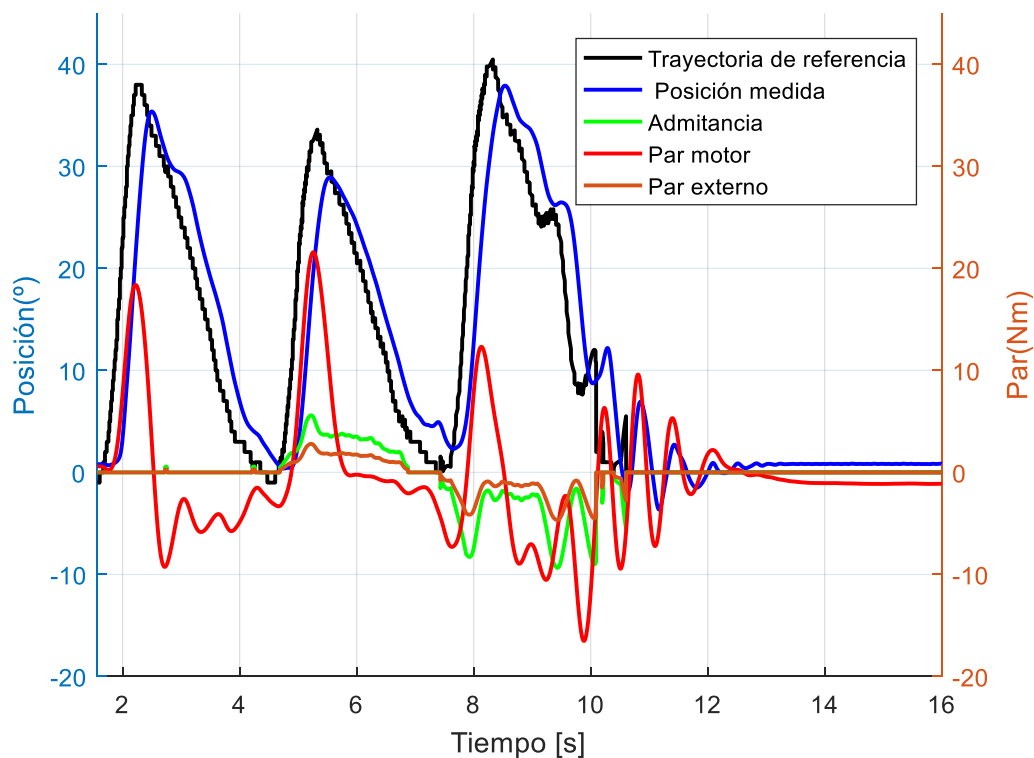


Figura 31 Respuesta de un control rígido con  $K=0.5$  en presencia de pares en ambos sentidos.

Por lo tanto, se emplean controles de admitancia distintos para cada tipo de fuerza. Primero, sin aplicar el ángulo de admitancia a la trayectoria, ésta es estimada con diferentes valores de amortiguación e inercia. Los mejores resultados se obtienen para las combinaciones representadas en la Figura 32.

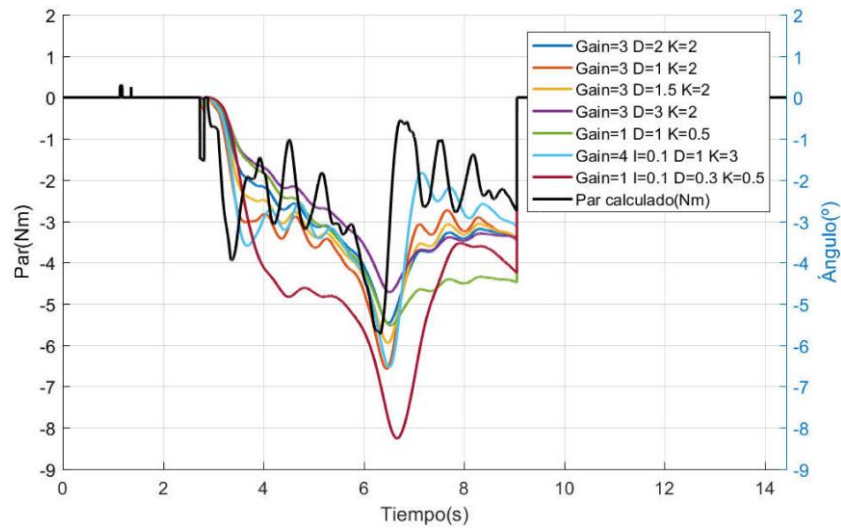


Figura 32 Comparación de diferentes controles de admitancia para mediciones experimentales.

Analizando la gráfica, se escogen los parámetros  $D=1$  y  $K=2$ , debido a que suavizan la señal y ofrecen una rapidez de respuesta media.

Respecto al control de rigidez para obstáculos, se aplican diferentes valores, obteniendo un resultado de flexibilidad alta para  $K=0.25$ . Usar valores inferiores de rigidez provoca reacciones excesivas para la fuerza aplicada, generando oscilaciones. Se aplican para pares de ayuda los valores de amortiguamiento descritos, ofreciendo una respuesta flexible con un coeficiente de ganancia de valor 8. En la Figura 33 se comprueba la respuesta del controlador.

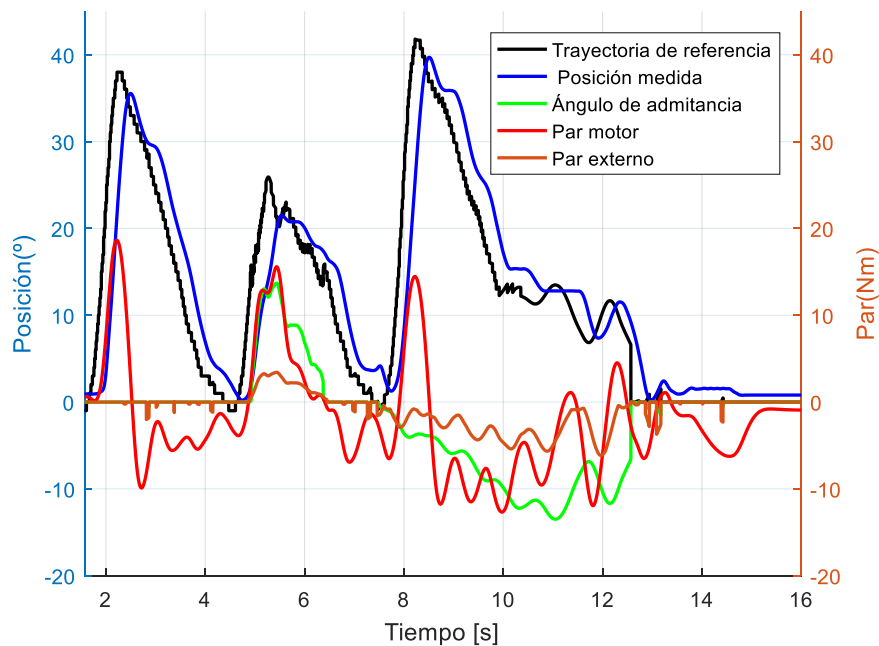


Figura 33 Respuesta del control rígido con  $K=0.25$  ante obstáculos y  $\text{Gain}=8$   $D=1$   $K=2$  ante pares de tipo ayuda.

Como se puede observar, el control de admitancia escogido, compuesto por una admitancia rígida ( $K=0.25$   $D=0$   $I=0$ ) para pares de tipo obstáculo, y una amortiguada ( $\text{Gain}=8$   $I=0$   $D=1$   $K=2$ ) para pares de tipo ayuda, presenta adaptabilidad de trayectorias frente a fuerzas externas, modificando en gran medida la posición del exoesqueleto. Reduce el ángulo respecto a la consigna ante obstáculos, y lo aumenta cuando interviene una fuerza de ayuda.

### 3.4.3.2 Modo de movimiento libre

En este control la consigna de posición es cero, es decir, no se desea un movimiento determinado para el exoesqueleto. Interviene únicamente el movimiento generado por la admitancia cuando se detecta una fuerza externa. Con este control se pretende que una fuerza externa pilote el movimiento, es decir, el exoesqueleto es “guiado” externamente. En el anexo E.2.3 se muestran las respuestas ante distintos valores de rigidez y ganancia. Se aplican, sin embargo, los parámetros escogidos para adaptación de trayectorias, obteniendo en la Figura 34 un comportamiento flexible. En él se realizan dos subidas de la pierna hasta el límite angular establecido, en torno a  $40^\circ$ , cancelándose el control de admitancia para ayuda al llegar a esa posición. Para fuerzas de bajada el límite se establece en  $-5^\circ$ , dejando de funcionar el modo rígido una vez los ha superado ( $<-5^\circ$ ).

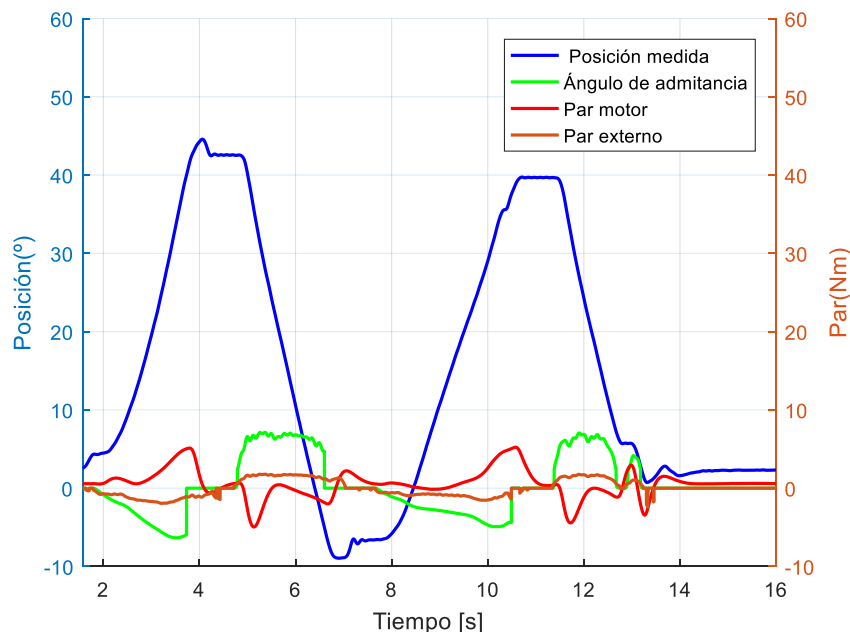


Figura 34 Control de admitancia en modo libre.

Cabe destacar que, en el modo libre, el sistema de medición de fuerzas ha dependido mayoritariamente de las mediciones de la galga extensiométrica, al no ser óptimo el sistema identificado para este rango de operación. Esto se debe a que las mediciones de par con identificación dependen de la consigna del PID de posición, la velocidad, y la aceleración, siendo las dos primeras nulas cuando está parado. Adicionalmente, para iniciar un movimiento hay que superar la fricción estática presente, no midiendo el sistema identificado fuerzas inferiores. La galga, en cambio, puede medir en dichos rangos de fuerzas, siendo esta la razón de su mayor utilidad

en el modo de control libre. En la Figura 35 se presenta la influencia de cada componente en el cálculo de par estimado para la simulación realizada en la Figura 34.

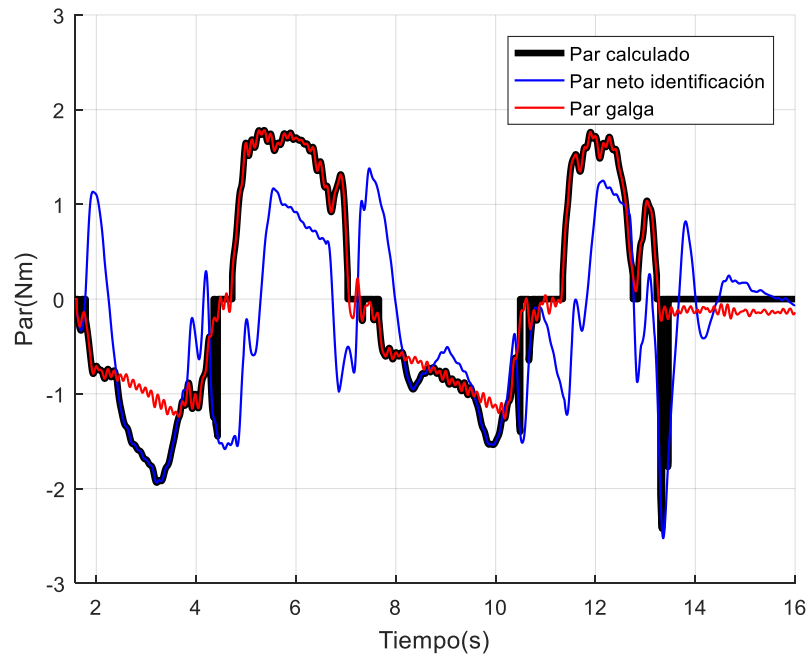


Figura 35 Análisis del medidor de par en modo libre.



### 3.5 Interacción con el entorno y rehabilitación. Análisis de resultados

En el apartado anterior se han mostrado los efectos del controlador de admitancia en simulación y experimentación, analizando en ambos la adaptación de trayectorias, además del control en modo libre. Aplicado a ejercicios de flexión-extensión, el control de media-baja rigidez ( $K < 1$ ) ha mostrado tanto en simulación como en experimentación flexibilidad frente a obstáculos, disminuyendo un promedio de  $15^\circ$  la posición máxima realizada en simulación, para fuerzas de baja magnitud (véase Figura 24 y Figura 33). Sin embargo, para controles rígidos puros ( $I=D=0$ ), un valor de rigidez pequeño puede provocar que, para pares bajos, se generen oscilaciones elevadas. Esta inestabilidad se debe a una sobre-amplificación de los efectos de dicha fuerza, debido a que, al actuar como un factor de ganancia proporcional, se puede generar un ángulo de admitancia de valor desproporcionado, tal y como se muestra en el anexo E.2.1, en la Figura 88 y en la Figura 89, para valores de rigidez inferiores a 0.2. Por lo tanto, al emplear un control de admitancia rígido flexible hay que emplear valores de rigidez intermedios ( $1 > K > 0.2$ ).

Desde el punto de vista de rehabilitación, la adaptación de trayectorias se puede aplicar a ejercicios de recuperación de fuerza muscular. En ellos, el fisioterapeuta ejercería una fuerza sobre el exoesqueleto, y por tanto en el usuario, modificando la trayectoria por defecto introducida. Entonces, el paciente debería anular dicha fuerza, para lograr completar la trayectoria correctamente. Para ello debe implantarse un sistema de medición que calcula exclusivamente la fuerza ejercida por el usuario, siendo el sistema de medición más común empleado el basado en electromiograma (EMG). Los parámetros del controlador de admitancia marcarían cuanto se amplifica la fuerza ejercida por el usuario. Si este presenta un bajo fortalecimiento muscular, el control de admitancia amplificaría en gran medida su fuerza, para que anulara la ejercida por el fisioterapeuta. Conforme la rehabilitación progresara se reduciría dicha amplificación, hasta llegar a un ángulo de admitancia nulo (el usuario ejerce la totalidad de la fuerza).

El modo de movimiento libre también se puede aplicar a rehabilitación. Si se seleccionan valores de alta flexibilidad, el esfuerzo ejercido por el paciente se amplifica, aportando el exoesqueleto el esfuerzo restante para ejercer el movimiento. Es decir, es el caso del exoesqueleto ingravido, el paciente no tiene que hacer esfuerzo por el peso del exoesqueleto, que es realizado por el sistema de control.

Otro aspecto a destacar es la aplicación del exoesqueleto a entornos irregulares, donde un control de posición puro (máxima rigidez) no actúa adecuadamente. El caso más común es la subida de escaleras. El apoyo de la pierna en un escalón sería considerado una fuerza de apoyo, adaptándose el sistema a dicho obstáculo externo, siendo la posición final mayor que la de referencia, manteniéndose por lo tanto el pie apoyado en dicho escalón.

Los resultados aquí obtenidos ofrecen la base para alcanzar dichos objetivos, al demostrar la flexibilidad que aporta el control de admitancia en este prototipo y su adecuación a ejercicios de rehabilitación y adaptación de trayectorias.

## 4 Conclusiones

En este proyecto se ha diseñado un controlador de admitancia variable, analizando su influencia sobre la posición del exoesqueleto para fuerzas de baja magnitud. Las pruebas realizadas han mostrado la flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema frente al control de posición puro, cumpliendo los objetivos establecidos en el apartado 2.1. Sin embargo, el sistema de medición, con el diseño actual, es susceptible a mejoras en su respuesta frente a fuerzas de ayuda.

Respecto al control de admitancia, con los resultados obtenidos se concluye que, en condiciones de medición estables y eficaces, como es el caso de la galga para obstáculos, el modelo más útil sería el rígido puro, por su rapidez y facilidad de configurar, al ser básicamente una constante de ganancia aplicada a la fuerza de entrada. En cambio, para mediciones oscilantes, se recomiendan controles amortiguados, de manera que se generen mediciones más estables.

Cabe destacar que el control de admitancia se ha diseñado para ser adaptable, y conmutar entre sus diferentes modos de operación (rígido, amortiguado e inercial) en función del sentido y tipo de fuerza externa. Por lo tanto, con el esquema actual, el control de admitancia puede ser dotado de mayor *inteligencia* para ofrecer un comportamiento más versátil ante diferentes situaciones. A continuación, se proponen una serie de modificaciones para el control de admitancia:

- Una mejora directa, que se ha implementado sin efectos visibles debido a la baja magnitud de los pares, es la dependencia de los parámetros del controlador en función de la fuerza realizada. Se propone tener parámetros de alta rigidez para fuerzas bajas, disminuyendo conforme estas aumentan. Su utilidad sería la omisión de perturbaciones y oscilaciones de baja amplitud, de manera que el exoesqueleto solo tenga en cuenta fuerzas medias y elevadas, como el apoyo del pie, la fuerza del usuario u objetos que obstaculicen la trayectoria.
- Ganancia variable para el control amortiguado, de manera que, a partir de un valor determinado, si hay oscilaciones estas tengan una ganancia menor y, por lo tanto, influyan en menor medida, obteniendo una medición de fuerza más constante.
- Limitar los efectos negativos de una rigidez baja, tales como la amplificación excesiva de las fuerzas detectadas.

Sin embargo, las pruebas se han realizado exclusivamente con la articulación superior (cadera), sin presencia de cargas adicionales y con un sistema de medición impreciso. A continuación, se proponen una serie de mejoras y líneas de investigación futuras:

- Análisis de una pierna completa del exoesqueleto y obtención de las ecuaciones dinámicas correspondientes, para poder sustraer correctamente las fuerzas externas a partir de la medición de la galga.

- Con el sistema actual, que no posee detectores de presión operativos en la planta de los pies, implementar un identificador de la fase de andar (despegue o inicio de paso, suspensión en el aire y avance de la pierna, y apoyo de la misma). La importancia del detector radica en el cálculo de las fuerzas presentes, debido a que, al estar la pierna apoyada, se generan pares adicionales debido al peso del usuario y el exoesqueleto, estando estos ausentes durante la suspensión de la pierna en el aire.
- Actualización de software y reparación del equipo, o rediseño global del mismo, diseñando un acondicionamiento de las galgas extensiométricas que permita realizar mediciones en ambos sentidos. Una alternativa al rediseño sería emplear el siguiente modelo del exoesqueleto (H2), que ya implementa un mayor número de sensores y corrige problemas mecánicos. Cabe destacar que, si se añaden los eslabones inferiores, y se coloca el peso equivalente a la pierna, es posible que la galga tenga mayor rango de medición para fuerzas de apoyo, debido al aumento del par detectado en la posición de equilibrio, y por lo tanto la galga extensiométrica podría emplearse exclusivamente para medición de pares.
- Diseño de un controlador de corrección de trayectorias basado en impedancia, de manera que el usuario sea el actuador que intenta realizar una trayectoria, y el exoesqueleto corrija los movimientos. Este esquema requeriría como primera fase el diseño de un control de par, aplicándose la modificación de impedancia a partir del error de posición. Un ejemplo de este tipo de control se puede encontrar en ALEX [14] [15].

## Anexos

### A Puesta en marcha del prototipo

Material necesario:

- Equipo con Matlab/Simulink R2011a, la toolbox xPC Target, VisualStudio y VisualC Compiler.
- Pendrive USB booteable con Ubuntu instalado (en nuestro caso la versión 11.10). Necesidad de tener la imagen en el mismo ("*imageDiscoDuro.img*").

Pasos (comandos de Ubuntu dependientes del directorio de la imagen a cargar):

- 1- **Ejecutar Matlab** (en HOST PC) -> Seleccionar el Path donde se va a trabajar.
- 2- **Encender PC 104 en TARGET PC**-> Activar interruptor de alimentación de la CPU, el de los motores se deja apagado.
- 3- Comandos en Ubuntu para copiar la imagen del disco duro bit a bit:
  - a. Ctrl + Alt + F1 (BIOS UBUNTU).
  - b. sudo mount /dev/sda1 /mnt
  - c. ls /mnt
  - d. cd /cdrom
  - e. ls
  - f. sudo dd if=/cdrom/imageDiscoDuro.img of=/dev/sda (**4 min**)
  - g. sudo reboot (si aparece interface azul está BIEN)
  - h. Quitar pendrive cuando lo indique
- 4- En nuestro caso se empleó un ordenador con un sistema operativo de 64 bits, con el cual la interfaz de la toolbox no funciona, teniendo que trabajar con comandos. Primero se configura el ambiente de trabajo, indicando la carpeta de instalación de VisualC (depende del usuario) y las características de red. Cabe destacar que hay que conectar con cable ethernet el ordenador con Matlab (Host PC) al ordenador del exoesqueleto (Target PC):

```

5- xpcsetCC('VISUALC', 'D:\Program Files\Microsoft Visual Studio 10.0')
6- setxpcenv('HostTargetComm','TcpIp','MulticoreSupport','off',...
7-   'TcpIpTargetAddress','255.255.255.0','TargetBoot','CDBoot',...
8-   'TargetMACAddress','F8:32:E4:FA:9E:17','TargetRAMSizeMB','Auto','TcpIpG
   ateway','255.255.255.255',...
9-   'TcpIpSubNetMask','255.255.255.0','TcpIpTargetAddress','192.168.1.10',.
   ..
10-   'TcpIpTargetBusType','PCI','TcpIpTargetDriver','I82559',...
11-   'TcpIpTargetPort','22222')
```

12- Además, en el Host PC hay que configurar la red. En Windows 10 sería:

- a. Ir a Control Panel\Network and Internet\Network and Sharing Centre.
- b. Change adapter settings

- c. Click derecho Ethernet->Properties->Internet Protocol Version 4(TCP /IPv4)->Properties.
- d. Configurarlos de acuerdo a la siguiente imagen.

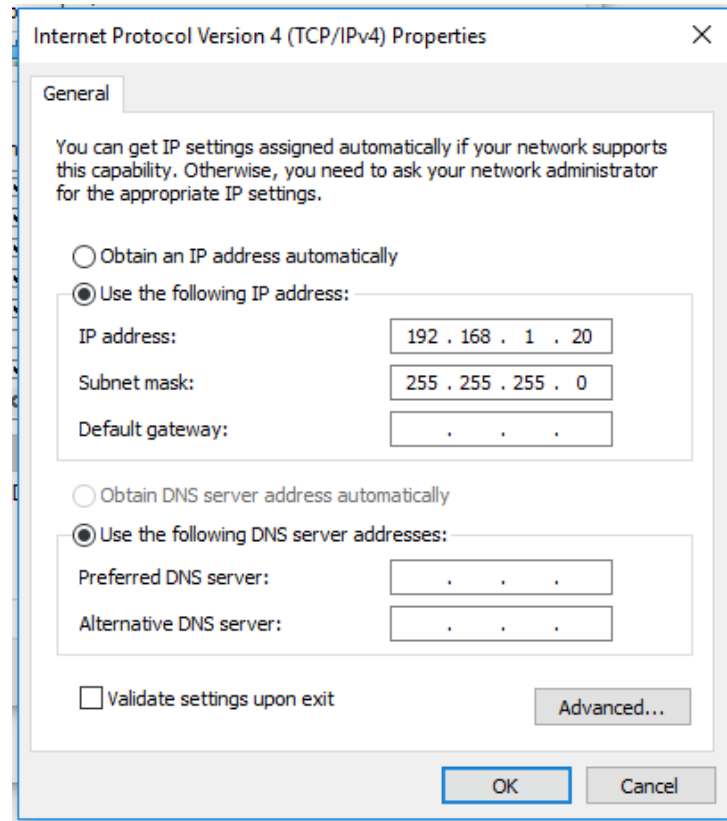


Figura 36 Configuración de red.

- 13- Conectar entonces Host y Target PC.
- 14- Ejecutar comando “*xpctest*” en Matlab, para comprobar si funciona correctamente. En caso de fallo, revisar la documentación de xPC Target en Matlab, donde se explican las posibles causas y soluciones.
- 15- Si el test ha finalizado con éxito, ya se pueden cargar los programas. Esto se realiza con el siguiente código:

```

16- %% Generación del .dml
17- app='HAL_PABLO'; % Nombre de la aplicación
18- rtwbuild(app); % Build and download
19-
20- % Configuración
21- tg = xpc; % Create an xPC Target Object
22- tg.SampleTime = 0.001; % Sample time to 1 ms
23- tg.StopTime = 10.6; % Tiempo de ejecución a 10 secs
24-
25- % Inicio del programa
26- sc = getscope(tg); % Si tenemos varios bloques de scopes, t
endremos en sc un array

```

```

27- start(tg)                                %start(tg) es lo mismo que +tg y que tg.
      start
28- start(sc)
29- Los datos se extraen una vez ha acabado la simulación. Por cada scope hay
      que ejecutar los comandos siguientes (excepto la primera línea, se ejecuta una
      sola vez):

30- % Attach to the target PC file system.
31- f=xpctarget.fs;
32-
33- % Open the file, read the data, close the file.
34- h1=fopen(f, 'data1.dat');
35- data1=fread(f,h1);
36- fclose(f,h1);
37-
38- % Unpack the data.
39- x1=readxpcfile(data1);
40-
41- t1=x1.data(:,2);
42- v1=x1.data(:,1);

```

## B Cálculos

### B.1 Parámetros de Denavit Hartenberg (D-H) del exoesqueleto (cadera)

El exoesqueleto está conformado por dos piernas, empleando en nuestro caso una, en concreto el motor de la cadera, sin los eslabones inferiores, exclusivamente el superior. El sistema, con sus diferentes medidas, se muestra en la Figura 37.

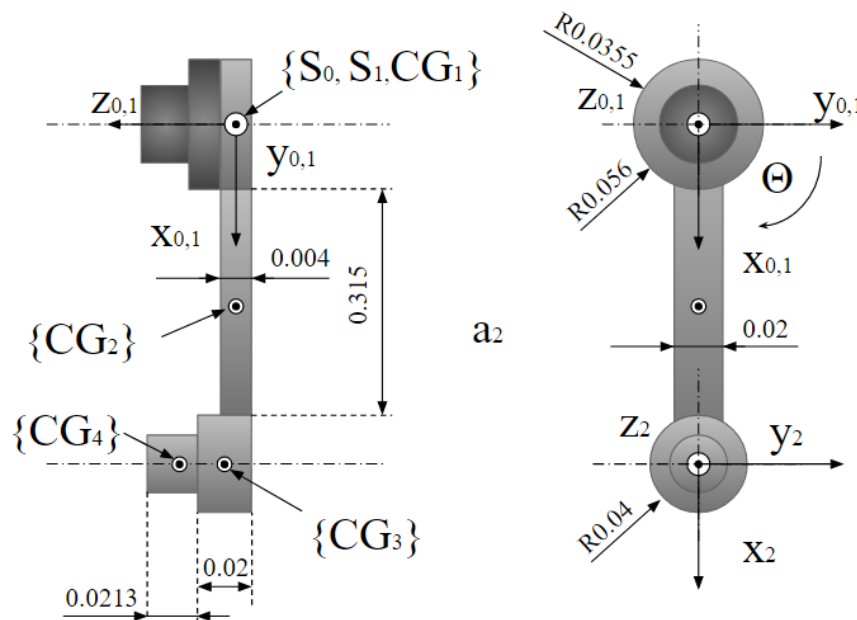


Figura 37 Dimensiones del sistema.

Los parámetros de Denavit-Hartenberg quedan entonces simplificados, al tener una sola articulación, siendo representados en la Tabla 5.

	$\theta$	$\mathbf{d}$	$\mathbf{a}$	$\alpha$
0-1	$\theta_1$	0	0	0

Tabla 5 Parámetros de Denavit-Hartenberg.

## B.2 Cálculo de pares mediante las ecuaciones de Newton-Euler

Para obtener los pares que soporta la articulación, y por lo tanto la ecuación del par que mide la galga extensiométrica, que es también aplicada en simulación con otros parámetros, se emplea la metodología de Newton-Euler, mostrada en las ecuaciones 16-24, extraídas de [23]. Las mostradas a continuación son aplicables solo exclusivamente a articulaciones rotacionales.

Iteraciones hacia fuerza  $i=0:n$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R \cdot {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (16)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R \cdot {}^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}R \cdot {}^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} \cdot {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (17)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R \cdot \left( {}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times \left( {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1} \right) + {}^i\dot{v}_i \right) \quad (18)$$

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \left( {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} \right) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (19)$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} \cdot {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (20)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} \cdot {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} \cdot {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (21)$$

Iteraciones hacia dentro  $i=n:0$

$${}^i f_i = {}^{i+1}R \cdot {}^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i \quad (22)$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}^{i+1}R \cdot {}^{i+1}n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^{i+1}R \cdot {}^{i+1}f_{i+1} \quad (23)$$

$${}^i \tau_i = {}^i n_i^T \cdot {}^i \hat{Z}_i \quad (24)$$

Siendo las variables:

$\theta_i$ : posición angular de la articulación  $i$

${}^i\omega_i$ : velocidad angular de la articulación  $i$

$\dot{\theta}_i = \frac{d\theta}{dt}$  Velocidad angular de la articulación  $i$

$\ddot{\theta}_i = \frac{d\dot{\theta}}{dt}$  Aceleración angular de la articulación  $i$

${}^i\dot{\omega}_i = \frac{d\omega}{dt}$  Aceleración angular de la articulación  $i$

${}^i\dot{v}_i$ : aceleración lineal de la articulación  $i$

${}^i\dot{v}_{C_i}$ : vector de aceleración lineal del centro de gravedad del eslabón  $i$

$m_i$ : masa del eslabón  $i$

${}^iP_{i+1}$ : vector de distancia entre la articulación  $i$  a la  $i+1$

${}^iP_{C_i}$ : vector de distancia de la articulación  $i$  a su centro de gravedad

$\hat{Z}$ : vector unitario de movimiento =  $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

${}^iN_i$ : vector de par del centro de gravedad del eslabón  $i$

${}^i n_i$  par aplicado en la articulación  $i$

$\tau_i$ : par ejercido por la articulación  $i$

${}^i f_i$ : fuerza aplicada en la articulación  $i$

${}^i F_i$ : fuerza aplicada en el centro de gravedad del eslabón  $i$

${}^C_i I_i$ : tensor de inercia en el centro del eslabón  $i$

$${}^{i+1}_i R: \text{matriz de rotación de } i \text{ a } i+1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i+1}) & -\sin(\theta_{i+1}) & 0 \\ \sin(\theta_{i+1}) & \cos(\theta_{i+1}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$${}^i_{i+1} R: \text{matriz de rotación de } i+1 \text{ a } i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i+1}) & \sin(\theta_{i+1}) & 0 \\ -\sin(\theta_{i+1}) & \cos(\theta_{i+1}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Se emplean unidades del sistema internacional.

Para poder resolver las ecuaciones se realizan diversos cálculos. Primero los centros de gravedad de las diferentes piezas básicas. Una vez obtenidas, se calcula el centro de gravedad del conjunto considerándolo una distribución discreta de masas<sup>8</sup>, obteniendo el centro de gravedad. Posteriormente, calcula el tensor de inercia<sup>9</sup> del

<sup>8</sup> [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Centro\\_de\\_masas&oldid=102216414](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Centro_de_masas&oldid=102216414)

<sup>9</sup> [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tensor\\_de\\_inercia&oldid=93846313](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tensor_de_inercia&oldid=93846313)



sistema, hallando primero los tensores individuales<sup>10</sup>, siendo las formas geométricas consideradas cilindros huecos (pieza 1), paralelepípedos (pieza 2) y cilindros macizos (piezas 3 y 4). Posteriormente se aplica el teorema de Ejes Paralelos o teorema de Steiner<sup>11</sup>. Obteniendo el tensor de inercia del conjunto. Las masas de cada pieza se obtienen a partir de la densidad del material de los eslabones, siendo considerado aluminio (2.7 gr/cm<sup>3</sup>) y el volumen de las piezas, empleando las mismas dimensiones que para la inercia. Para el motor EC45 incorporado se emplean la masa indicada en la documentación. Los datos calculados y las condiciones iniciales del sistema son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 w_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{rad} / \text{s}] & \dot{w}_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{rad} / \text{s}^2] & v_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{m} / \text{s}] & \dot{v}_0 &= \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{m} / \text{s}^2] \\
 {}^0P_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{m}] & {}^1P_{C_1} &= \begin{bmatrix} 0.33609 \\ 0 \\ 0.01145 \end{bmatrix} [\text{m}] & {}^0P_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\text{m}] & m &= 0.549 [\text{Kg}] \\
 I &= \begin{bmatrix} 2.8 \cdot 10^{-4} & 0 & -4.738 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0.01188 & 0 \\ -4.738 \cdot 10^{-4} & 0 & 0.012 \end{bmatrix} [\text{Kg} \cdot \text{m}^2]
 \end{aligned}$$

Resolviendo este sistema simbólicamente, se obtiene la ecuación 27.

$$\tau = CG_x \cdot g \cdot m \cdot \sin(\theta) - CG_y \cdot g \cdot m \cdot \cos(\theta) + ((CG_y^2 + CG_x^2) \cdot m + I_{zz}) \cdot \ddot{\theta} \quad (27)$$

Siendo el par resultante estimado para simulación el de la ecuación 28:

$$\tau = 1.81 \cdot \sin(\theta) + 0.074 \cdot \ddot{\theta} [\text{Nm}] \quad (28)$$

Siendo esta última la ecuación aplicada en simulación.

### B.3 Parámetros del controlador

Los parámetros de controlador y motor empleados en el simulador para lograr una respuesta similar al sistema real son:

- Tensión de alimentación
  - 24 VDC
- Inversor:
  - Resistencia snubber:  $10^{-5} \Omega$ .
  - Capacidad snubber: infinito.
  - Tecnología MOSFET/Diodos.
  - Resistencia  $0.1 \Omega$ .

<sup>10</sup>

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Anexo:Tensores\\_de\\_momento\\_de\\_inercia\\_3D&oldid=96887432](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Anexo:Tensores_de_momento_de_inercia_3D&oldid=96887432)

<sup>11</sup> [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teorema\\_de\\_Steiner&oldid=101698361](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teorema_de_Steiner&oldid=101698361)

- Controlador
  - Ancho de banda de histéresis: 0.001 A
  - 2500 rpm/s
  - Par máximo: 0.444 Nm
  - Tiempo de muestreo: 5  $\mu$ s
  - Máxima frecuencia de conmutación: 31 KHz.
- Controlador de velocidad
  - Coeficiente de conversión de PID (Volts) a rpm: 600
  - K proporcional: 0.15
  - K derivativo: 0.0005
  - K integral: 0.1
  - K prealimentación derivativa: 0.001
  - Filtro paso bajo, frecuencia de corte 200 Hz.
- Motor:
  - 12 pares de polos
  - 3 fases
  - Forma de onda trapezoidal de la fuerza contraelectromotriz.
  - Resistencia de fase: 0.1815  $\Omega$
  - Inductancia de fase: 0.000132 H
  - Constante de par: 0.0718 Nm/Apico
  - Inercia: 0.000306 Kg·m<sup>2</sup>
  - Coeficiente de viscosidad: 1.3722·10<sup>-06</sup> N·m·s
  - Fuerza de rozamiento estático: 0.02 Nm.

## C System identification toolbox

En el presente apartado se explican con mayor detalle los sistemas identificados mediante la Toolbox de identificación de sistemas de Matlab.

### C.1 Identificaciones base

A continuación, se muestran los sistemas identificados sin modificaciones para obtención de par motor.

#### C.1.1 PID

El sistema identificado para el PID del control de posición se basa en la dependencia directa del par generado con la consigna del PID de posición enviada, obteniendo la ecuación 29.

$$F(z^{-1}) = \frac{-0.0008717 + 0.0008885z^{-1}}{1 - 2.952z^{-1} + 2.905z^{-2} - 0.9526z^{-3}} \quad (29)$$

Se muestra a continuación el mapa de ceros y polos del sistema, y su respuesta en frecuencia en el diagrama bode. Los polos se encuentran dentro del círculo unitario, siendo estable el sistema, siendo dominantes al estar próximos al valor +1. Respecto a los ceros uno se encuentra próximo al origen, teniendo una influencia mínima. Respecto al diagrama bode, para bajas frecuencias se encuentra desfasado el

sistema  $360^\circ$ , disminuyendo dicho desfase para frecuencias comprendidas entre 1 y 100 Hz, aumentando de nuevo para 1000 Hz, que es la frecuencia de muestreo del sistema.

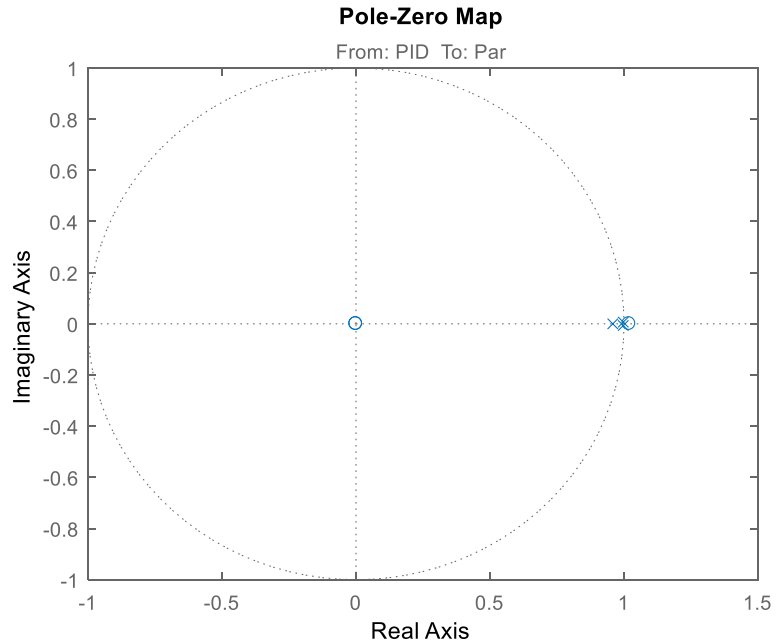


Figura 38 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID - Par.

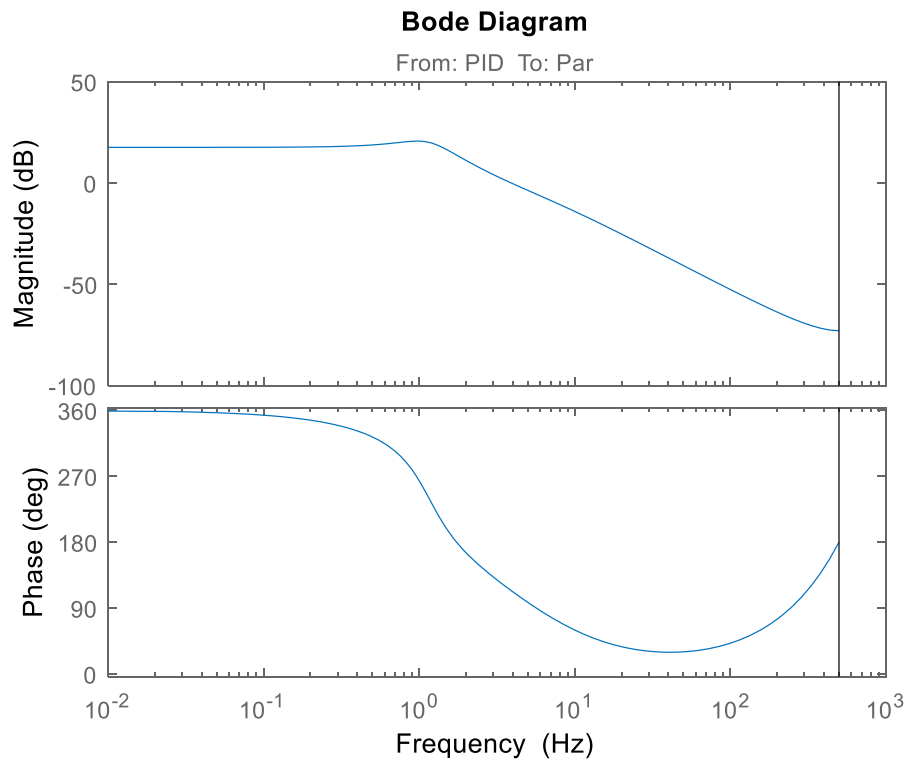


Figura 39 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID - Par.

### C.1.2 PID y Posición

Las funciones de transferencia identificadas empleando el PID del control de posición y la posición en grados ( $^{\circ}$ ) son:

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{-0.000269 + 0.0002762z^{-1}}{1 - 2.978z^{-1} + 2.955z^{-2} - 0.9778z^{-3}} \quad (30)$$

$$\frac{T(z)}{\theta(z)} = G_2(z) = \frac{0.00639z^{-1} - 0.01281z^{-2} + 0.00642z^{-3}}{1 - 2.983z^{-1} + 2.967z^{-2} - 0.9834z^{-3}} \quad (31)$$

Siendo la respuesta ante los datos de entrenamiento y de comprobación los de las figuras siguientes, mostrando un alto porcentaje de acierto para los primeros. Adicionalmente, para los datos de comprobación, aunque el porcentaje de acierto es menor, la forma de onda es similar.

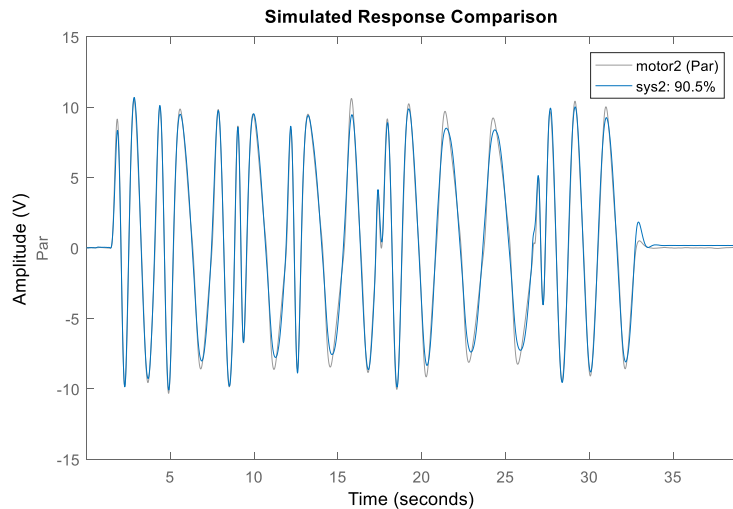


Figura 40 Respuesta de la identificación PID y posición ante los datos de entrenamiento.

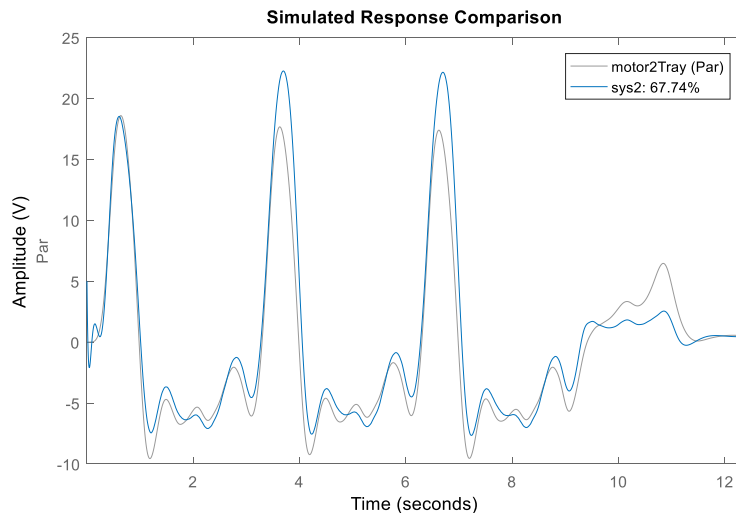


Figura 41 Respuesta de la identificación PID y posición ante los datos de comprobación.

Siendo el mapa de ceros y polos y la respuesta en frecuencia los siguientes. Para la función identificada con PID, se obtiene una respuesta similar al apartado anterior. Para posición, en cambio, los ceros y polos se encuentran muy próximos, pero no lo suficiente para anularse, debido a la mejor eficiencia del sistema respecto a la identificación exclusiva con PID. En cuanto al diagrama bode, la función identificada para PID se comporta similar al apartado anterior, siendo la principal componente del par calculado final, al tener una ganancia mayor que la respuesta generada por la función identificada de posición. Adicionalmente, esta segunda presenta una atenuación mayor para altas frecuencias.

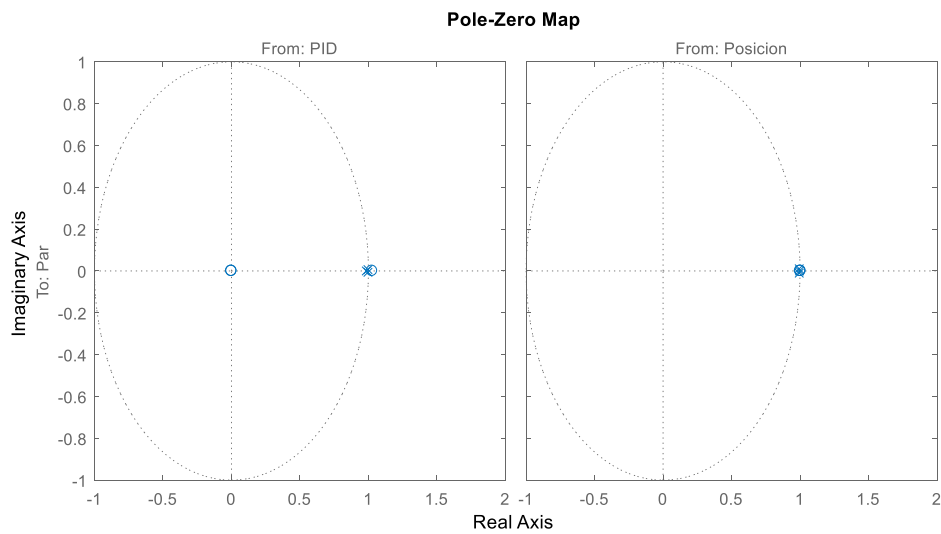


Figura 42 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y posición - Par.

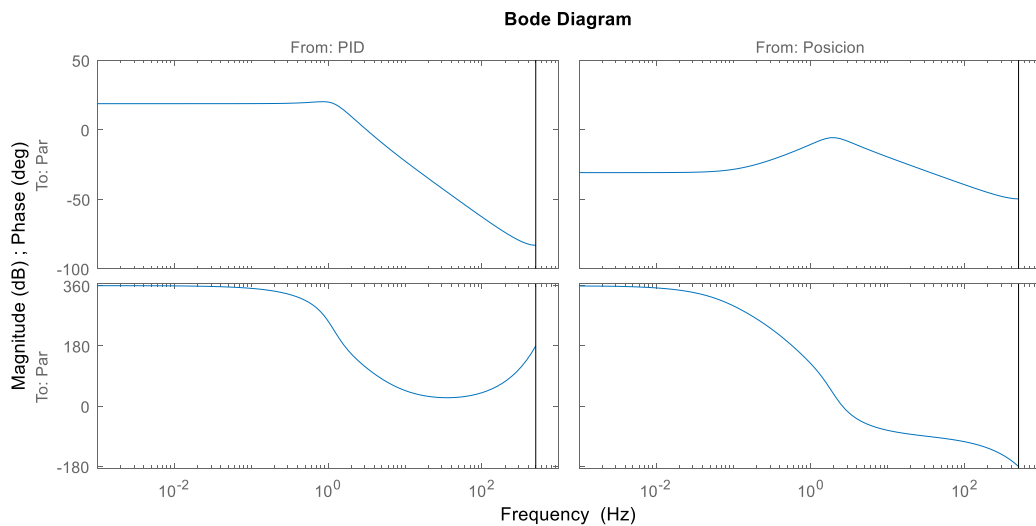


Figura 43 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Posición - Par.

### C.1.3 PID y Velocidad

Las funciones de transferencia identificadas empleando el PID del control de posición y la velocidad en grados por segundo ( $^{\circ}/s$ ) son:

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{0.01656 - 0.03375z^{-1} + 0.0172z^{-2}}{1 - 2.234z^{-1} + 0.73z^{-2} + 1.241z^{-3} - 0.7373z^{-4}} \quad (32)$$

$$\frac{T(z)}{\dot{\theta}(z)} = G_2(z) = \frac{0.001121z^{-1} - 0.001131z^{-2}}{1 - 1.805z^{-1} + 0.6184z^{-2} + 0.1863z^{-3}} \quad (33)$$

Siendo la respuesta ante los datos de entrenamiento y de comprobación los de las figuras siguientes. La eficiencia para datos de entrenamiento es parecida, sin embargo, la obtenida para datos de comprobación presenta un aumento.

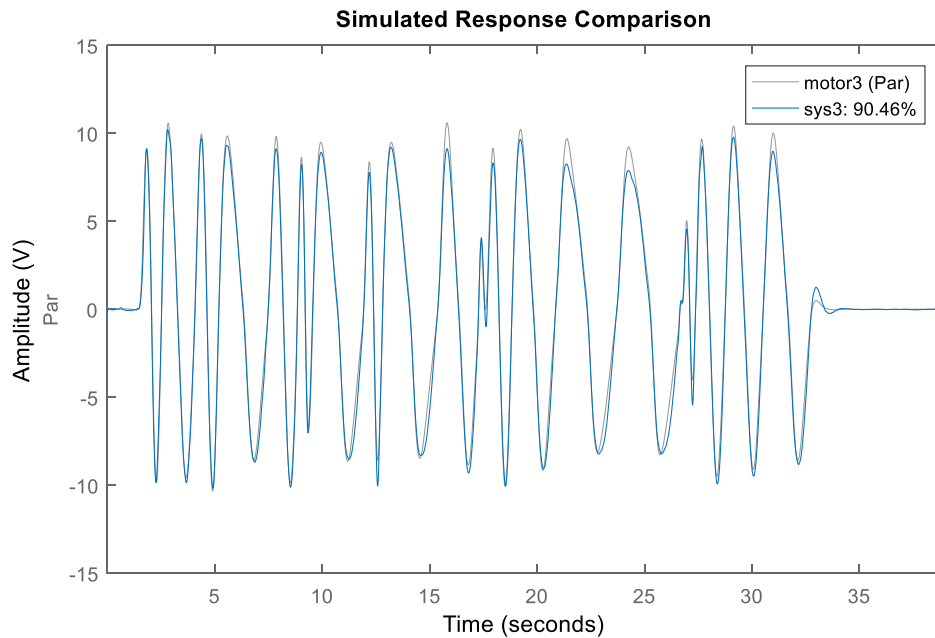


Figura 44 Respuesta de la identificación PID y velocidad ante los datos de entrenamiento.

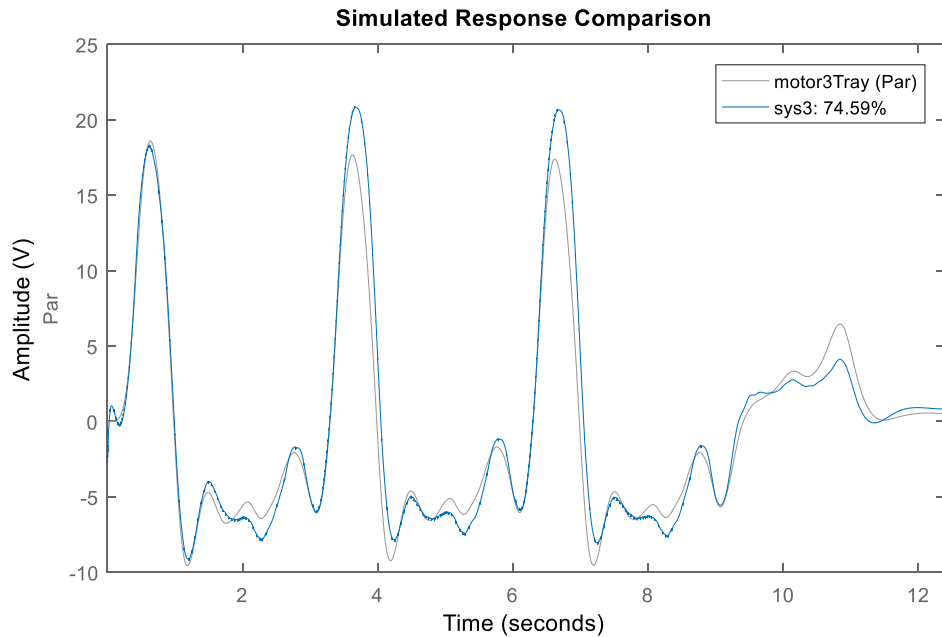


Figura 45 Respuesta de la identificación PID y velocidad ante los datos de comprobación.

El mapa de ceros y polos muestra que, como se ha añadido un polo respecto a los modelos anteriores, este aporta solo a altas frecuencias, siendo sus efectos mínimos. Con la función también encontramos un polo a la izquierda del origen, siendo su efecto similar. En ambos sistemas se encuentra un cero cerca del origen, con aportación mínima al resultado. El diagrama de bode obtenido para PID presenta un comportamiento similar al explicado en apartados anteriores. Respecto a la velocidad, esta presenta una atenuación general, aumentando con la frecuencia. Para frecuencias comprendidas en torno a 0 el desfase es mínimo.

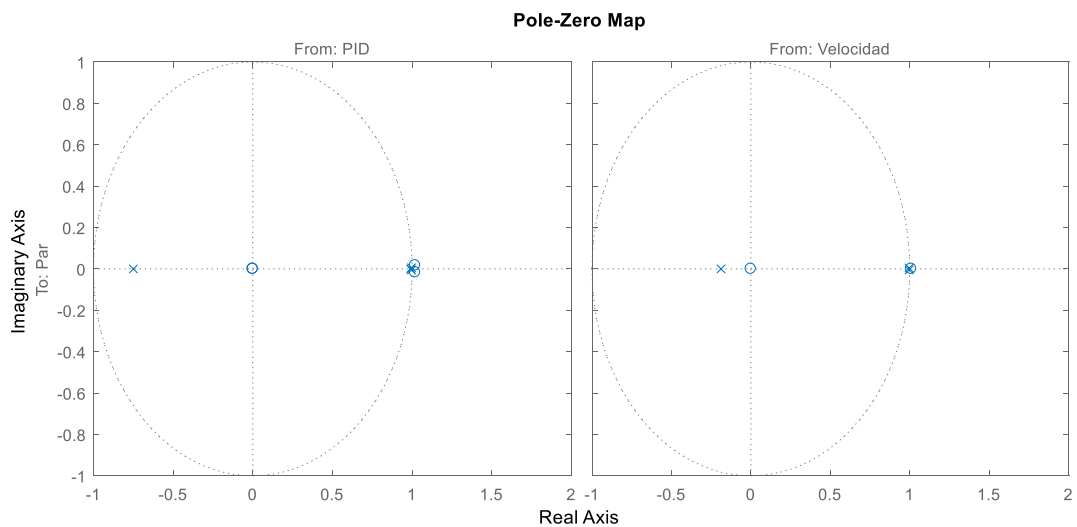


Figura 46 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y Velocidad - Par.

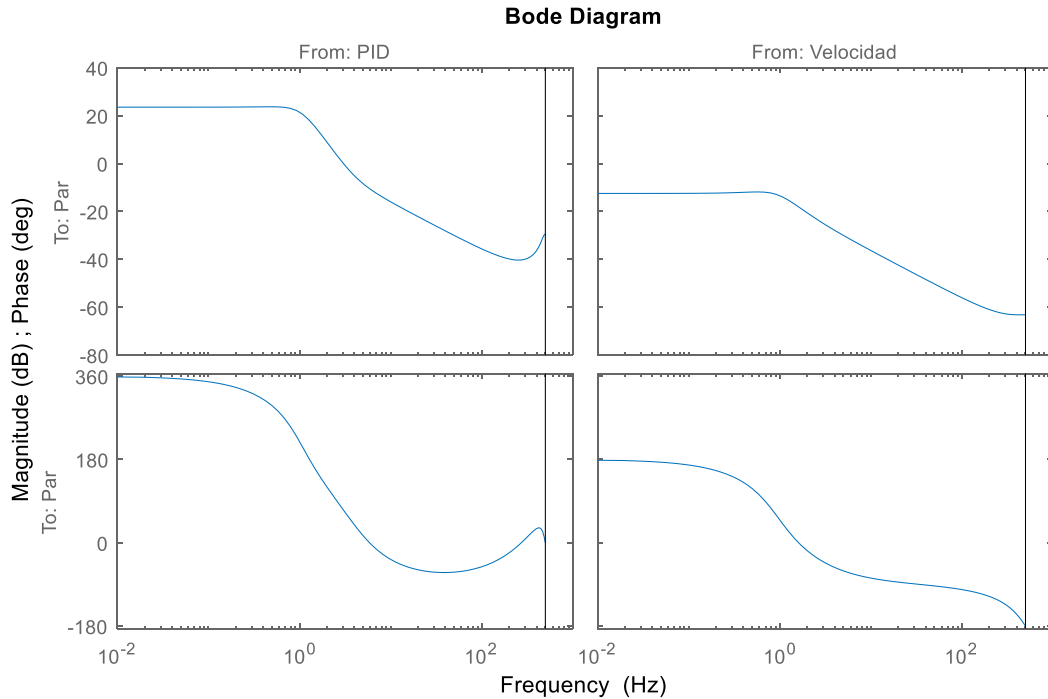


Figura 47 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Velocidad - Par.

#### C.1.4 PID y Galga

Las funciones de transferencia identificadas empleando el PID del control de posición y la galga en unidades de medición (uds) son:

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{-0.0003011 + 0.0006085z^{-1} - 0.0003074z^{-2}}{1 - 3.978z^{-1} + 5.934z^{-2} - 3.935z^{-3} + 0.9782z^{-4}} \quad (34)$$

$$\frac{T(z)}{Galga(z)} = G_2(z) = \frac{-0.004565 + 0.004714z^{-1}}{1 - 0.9916z^{-1}} \quad (35)$$

Las respuestas obtenidas, visibles en las siguientes figuras, presentan un rendimiento ligeramente superior con los datos de entrenamiento, sin embargo, la eficiencia con los datos de comprobación es inferior.



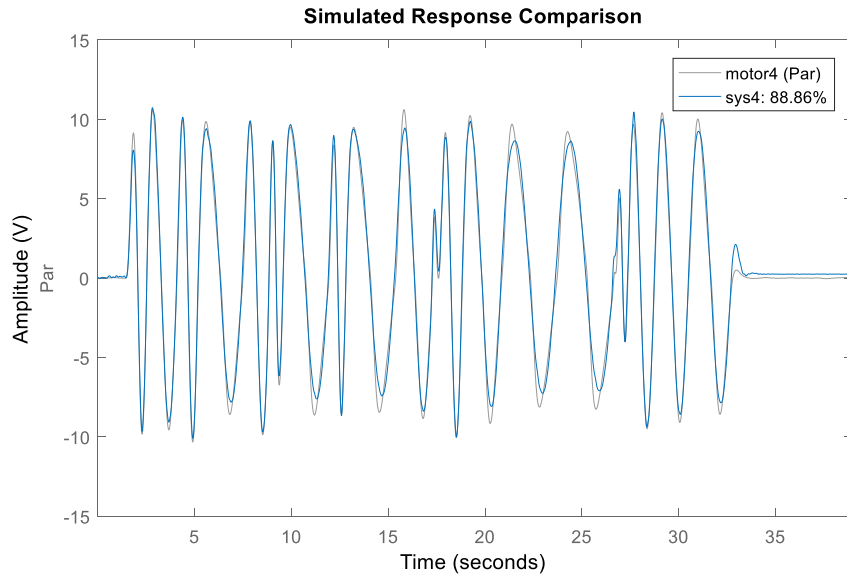


Figura 48 Respuesta de la identificación PID y galga ante los datos de entrenamiento.

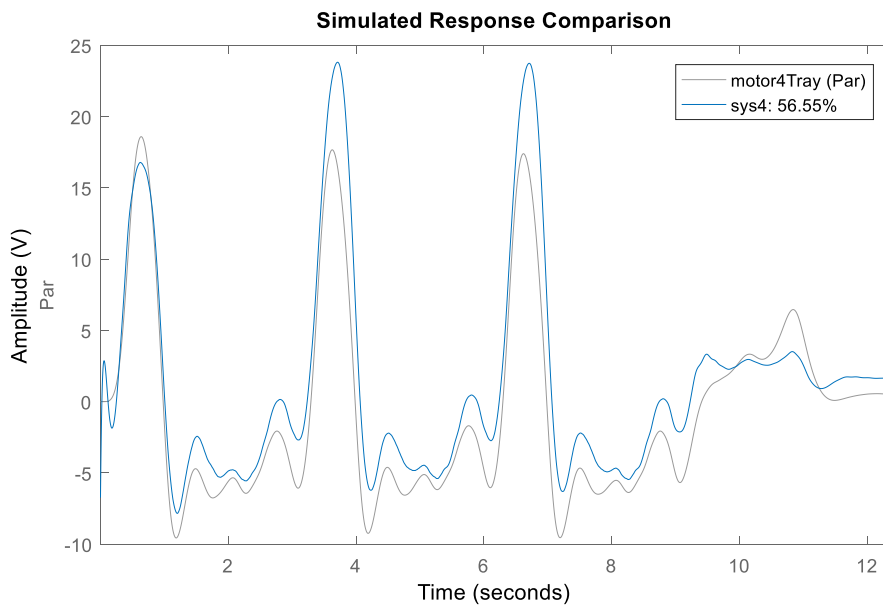


Figura 49 Respuesta de la identificación PID y galga ante los datos de comprobación.

Siendo el mapa de ceros y polos y la respuesta en frecuencia los mostrados a continuación. El PID presenta un mapa de ceros y polos, y un diagrama bode similares a los de apartados anteriores. La galga, con polos dominantes, muestra en el diagrama bode una alta atenuación, debida en parte a la amplitud de sus valores (sin procesar, con un valor de centenas de unidades de par). Por otra parte, se debe a que no mejora la eficiencia, por lo tanto, se minimiza el efecto de su salida.

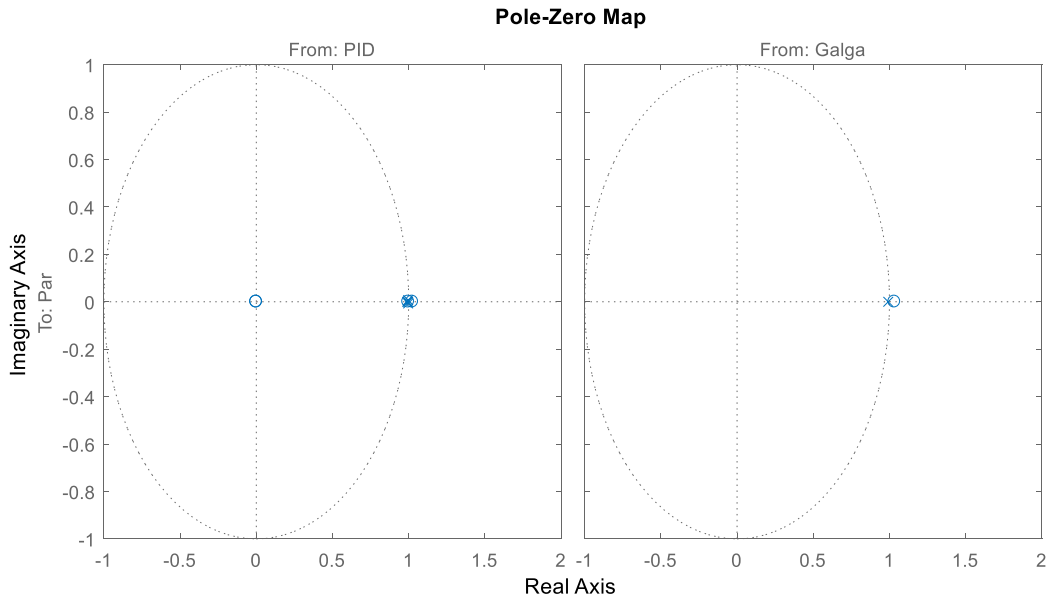


Figura 50 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID y Galga - Par.

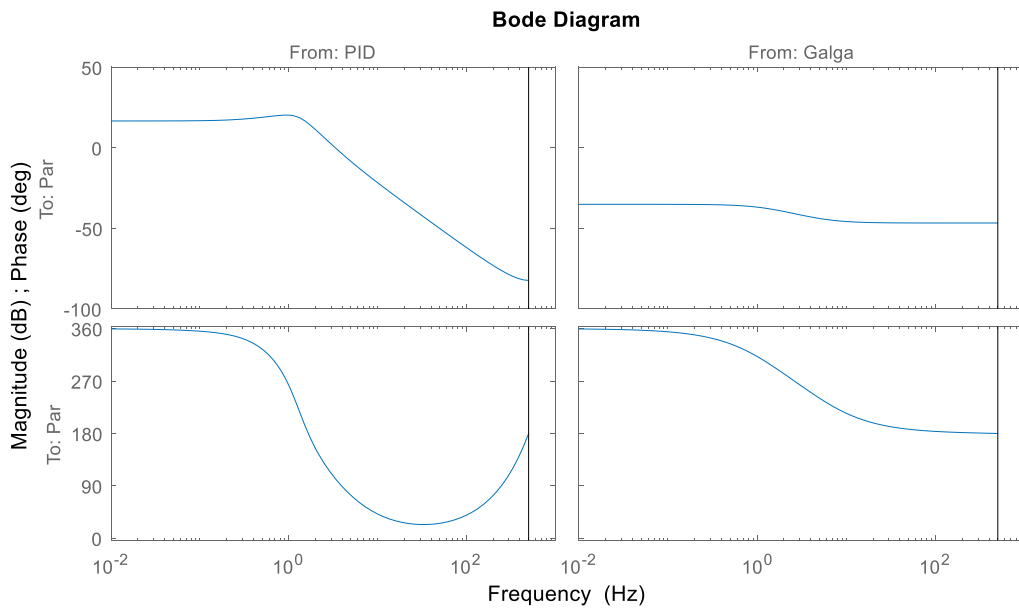


Figura 51 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID y Galga - Par.

### C.1.5 PID, Posición y Velocidad

Las funciones de transferencia identificadas para el PID del control de posición, la posición (°) y la velocidad angular (°/s), son:

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{-0.0003122 + 0.0003201z^{-1}}{1 - 2.238z^{-1} + 0.7357z^{-2} + 1.243z^{-3} - 0.7408z^{-4}} \quad (36)$$

$$\frac{T(z)}{\theta(z)} = G_2(z-18) = \frac{-0.0002093 + 0.002011z^{-1} - 0.003394z^{-2} + 0.001592z^{-3}}{1 - 2.984z^{-1} + 2.969z^{-2} - 0.9844z^{-3}} \quad (37)$$

$$\frac{T(z)}{\dot{\theta}(z)} = G_3(z-14) = \frac{0.0002592 + 0.0003032z^{-1} - 0.0005739z^{-2}}{1 - 2.238z^{-1} + 0.7357z^{-2} + 1.243z^{-3} - 0.7408z^{-4}} \quad (38)$$

El mapa de ceros y polos del sistema, y su respuesta en frecuencia en el diagrama bode son representados a continuación. Para PID tenemos una respuesta similar a los casos anteriores, en cambio para posición y velocidad se genera una alta atenuación y desfase para frecuencias altas.

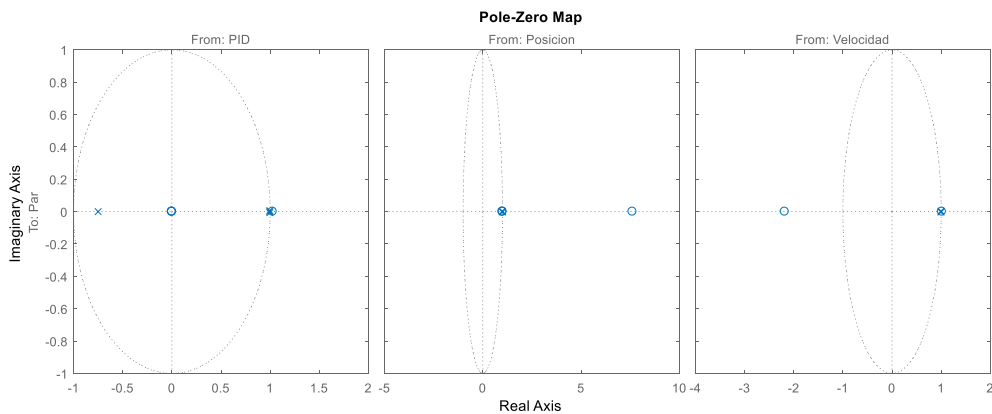


Figura 52 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID, posición y velocidad - Par.

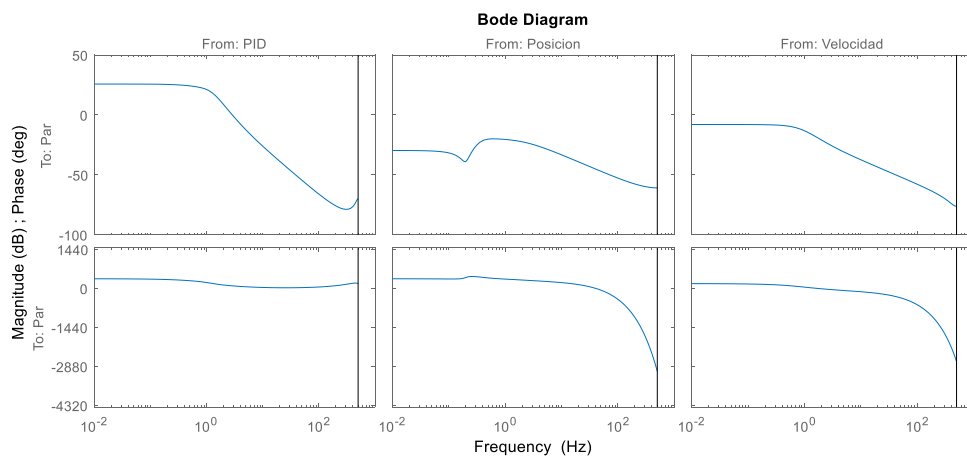


Figura 53 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID, posición y velocidad - Par.

### C.1.6 Modelo eléctrico

El modelado eléctrico consiste realizar la identificación del controlador exclusivamente, en vez del conjunto motor + controlador. Para ello se realiza una simplificación del modelo del motor explicada en [24], considerando dos fases en serie, omitiendo el efecto de las conmutaciones entre ellas. La ecuación de la tensión entre terminales se reduce, tal y como se menciona en dicho artículo, a la mostrada en la ecuación 39.

$$V_{AB} = 2 \cdot R_{fase} \cdot i + 2 \cdot (L_{fase} - M) \frac{di}{dt} + K_e \cdot \dot{\theta} \quad (39)$$

La inductancia mutua se omite, empleando exclusivamente la inductancia de fase. El objetivo es calcular el par bruto ejercido por el motor, es decir,  $K_t \cdot i$ . Y las entradas para ello son la fuerza contra electromotriz, calculada a partir de la velocidad  $\dot{\theta}$  y el voltaje  $V_{AB}$ . El voltaje de consigna es obtenido a partir de una función identificada, que relaciona la consigna del PID del control de posición y la velocidad medida, las cuales son las entradas reales del controlador, con el voltaje a ejercer en el motor.

Para realizar la identificación primero se calculan los valores del voltaje, empleando el esquema siguiente.

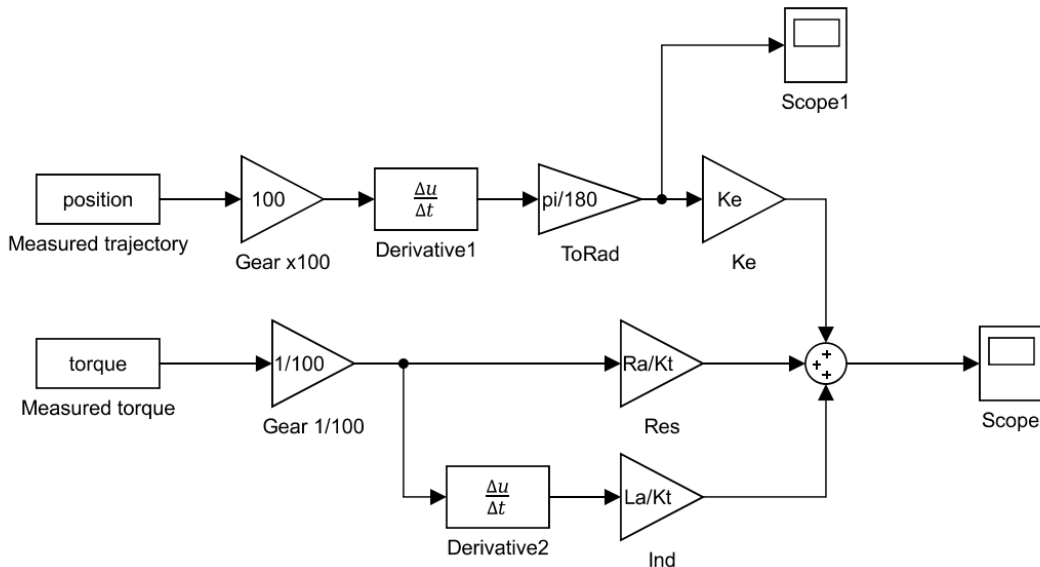


Figura 54 Esquema de obtención de la consigna de voltaje.

Siendo los parámetros introducidos calculados a partir del datasheet.

- $R_a = R_{fase} \cdot 2 = 0.363\Omega$
- $L_a = L_{fase} \cdot 2 = 0.264mH$

Obteniendo la señal de voltaje. Entonces se aplica identificación, obteniendo un mejor resultado con las siguientes funciones de transferencia.

$$\frac{VDC(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{1.118 \cdot 10^{-7} z^{-1}}{1 - 2.99z^{-1} + 2.98z^{-2} + 0.9901z^{-3}} \quad (40)$$

$$\frac{VDC(z)}{\dot{\theta}(z)} = G_2(z) = \frac{0.2428 - 0.7838z^{-1} + 1.022z^{-2} - 0.6625z^{-3} + 0.1818z^{-4}}{1 - 1.549z^{-1} + 0.3591z^{-2} - 0.0182z^{-3} + 0.1631z^{-4} + 0.04539z^{-5}} \quad (41)$$

Obteniendo la siguiente respuesta para la identificación, situándose el porcentaje de acierto en torno al 99%:

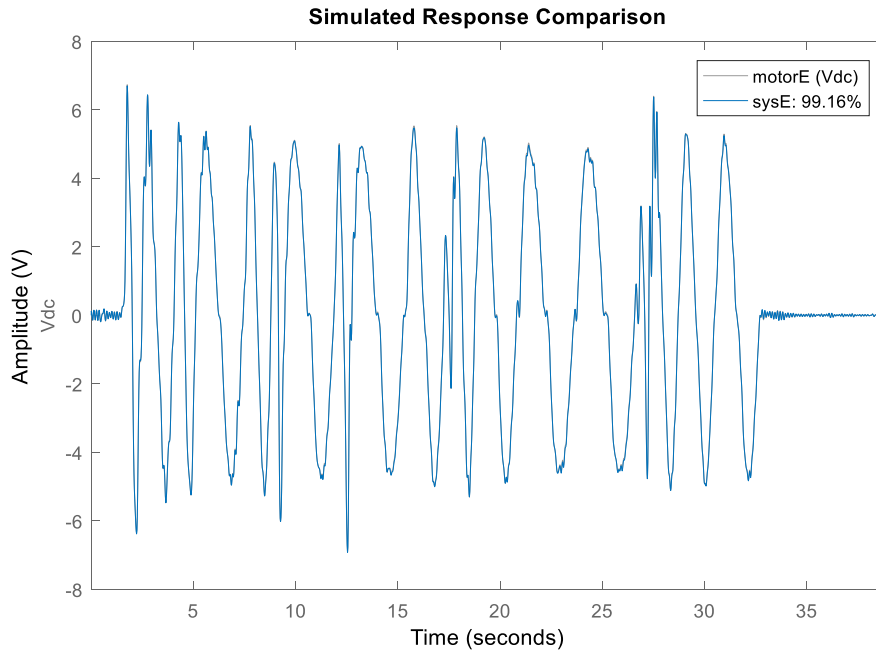


Figura 55 Comparación de voltaje del sistema identificado PID - Vdc.

Al mostrar una alta eficiencia, se diseña un esquema que incorpore dicha función de transferencia en combinación con la función de transferencia continua del motor eléctrico de una fase y la fuerza contra-electromotriz, calculada con la velocidad. Dicho esquema se muestra en la Figura 56.

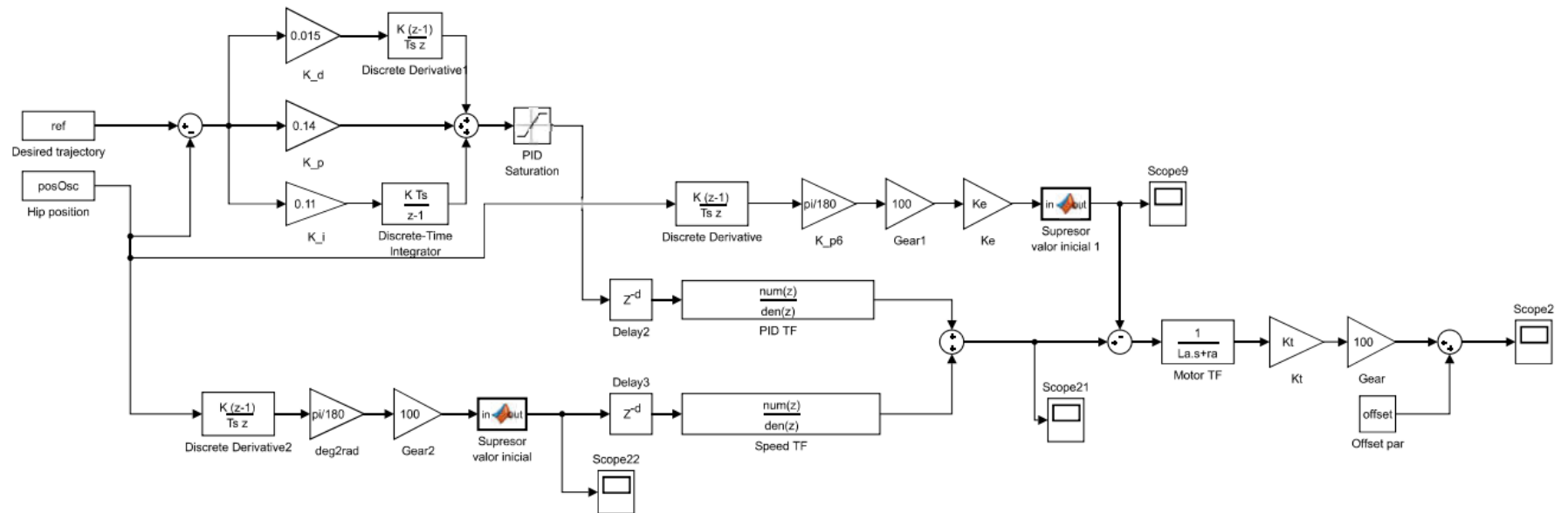


Figura 56 Esquema de medición usando el modelado eléctrico.

Con dicho esquema se calcula el par motor para datos de entrenamiento y comprobación, obteniendo una eficiencia similar a las otras identificaciones, pero sin superar a las más eficientes.

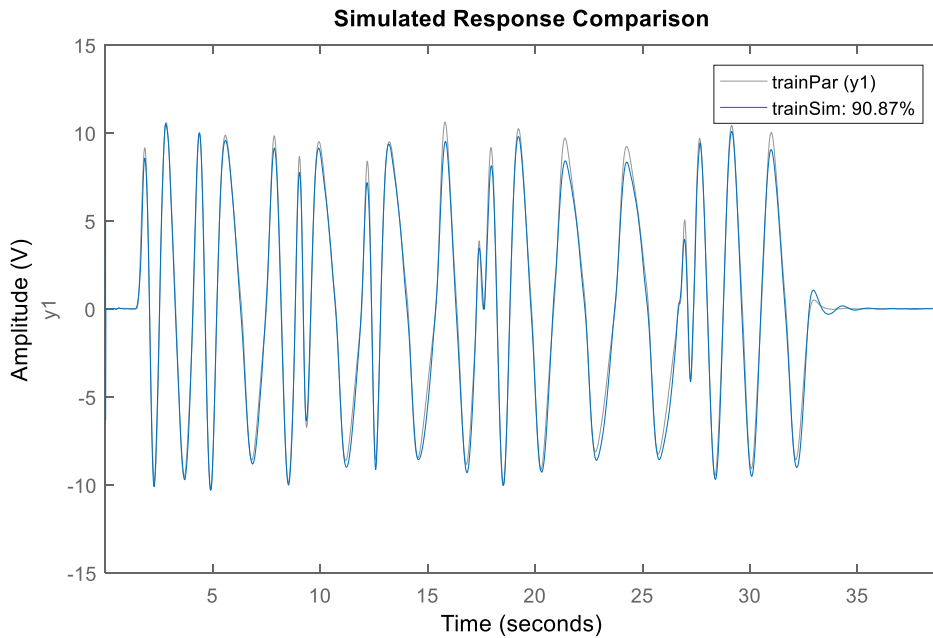


Figura 57 Respuesta del modelado eléctrico ante los datos de entrenamiento.

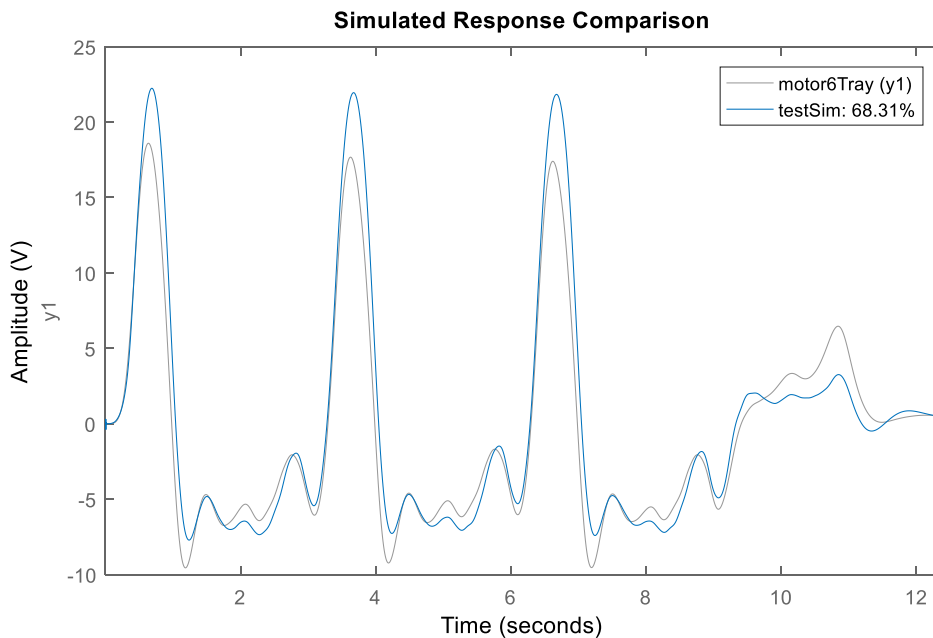


Figura 58 Respuesta del modelado eléctrico ante los datos de comprobación.

Siendo el mapa de ceros y polos y la respuesta en frecuencia los mostrados a continuación. Para PID presenta un ángulo de desfase en torno a  $-3\pi/2$  para

frecuencias superiores a 1 Hz, presentando una alta atenuación para dicho rango, incrementándose conforme aumenta la frecuencia. Respecto a la velocidad, hay un cero en el origen, con poca influencia en la salida, y tres polos en el hemisferio negativo. Estos polos aumentan la eficiencia del sistema al incorporar el ruido presente en los datos empleados. En el diagrama bode de la velocidad se puede observar que la velocidad se atenúa en todo el rango bajo de frecuencias, no estando atenuada a altas frecuencias, en las cuales presenta un incremento del desfase.

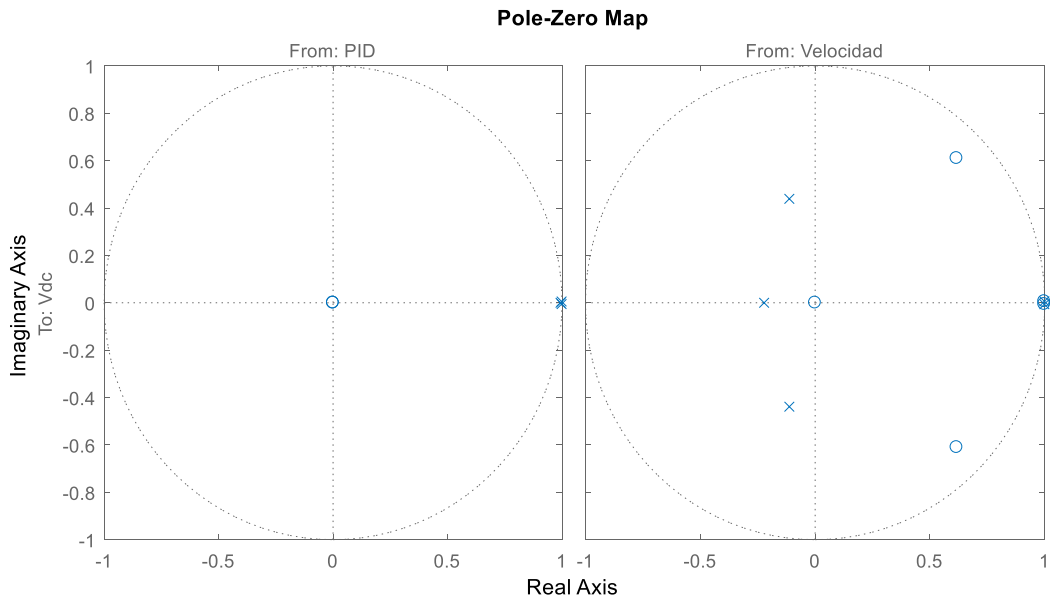


Figura 59 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID - Vdc.

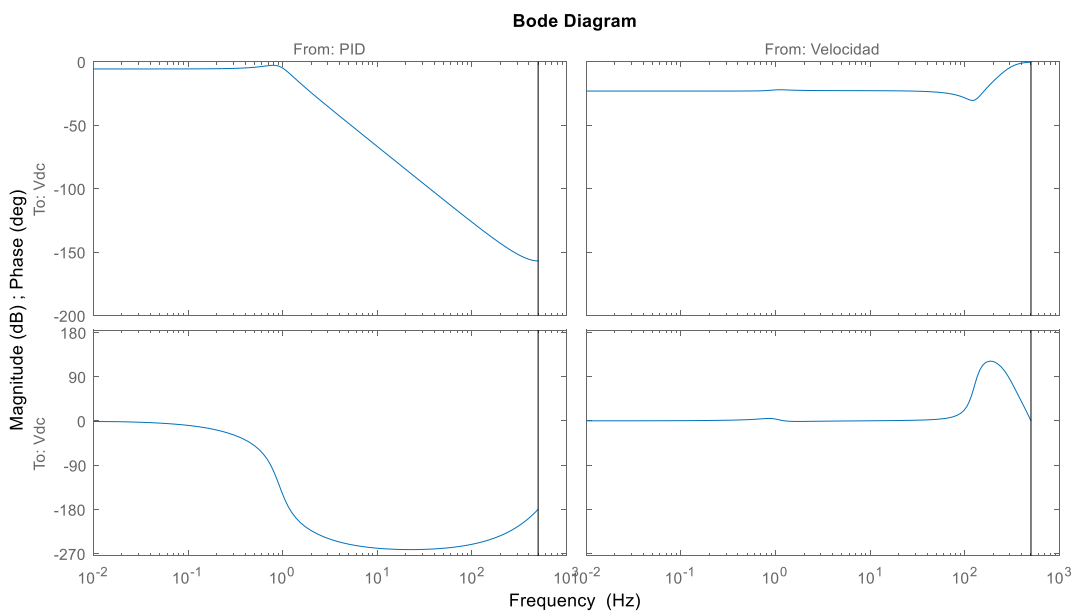


Figura 60 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID - Vdc.



### C.1.7 PID, Posición y Galga

Las funciones de transferencia identificadas empleando el PID del control de posición, la posición en grados ( $^{\circ}$ ) y la galga en unidades de medición (uds) son:

$$\frac{T(z)}{PID(z)} = G_1(z) = \frac{-0.0007524 + 0.000768z^{-1}}{1 - 2.956z^{-1} + 2.912z^{-2} - 0.9562z^{-3}} \quad (42)$$

$$\frac{T(z)}{\theta(z)} = G_2(z) = \frac{-2.181 \cdot 10^{-5} z^{-1}}{1 - 0.9994z^{-1}} \quad (43)$$

$$\frac{T(z)}{\text{Galga}(z)} = G_2(z) = \frac{-5.312 \cdot 10^{-6} z^{-1}}{1 - 0.9338z^{-1}} \quad (44)$$

Mostrándose la respuesta ante los datos de entrenamiento y de comprobación los en las figuras siguientes. Se puede ver que se genera un desfase de la señal una vez han terminado las oscilaciones, lo cual es un comportamiento no deseable.

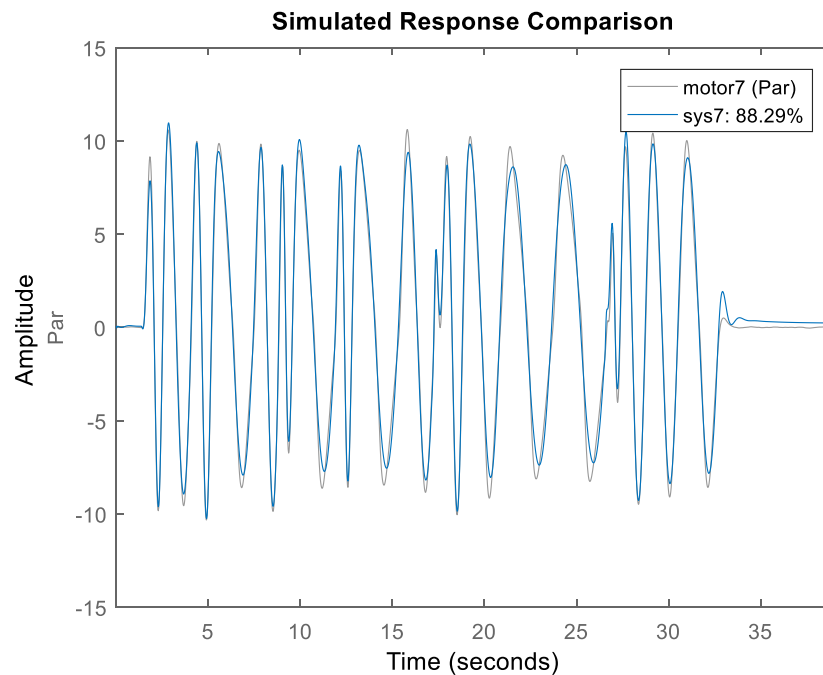


Figura 61 Respuesta de la identificación PID, posición y galga ante los datos de entrenamiento.

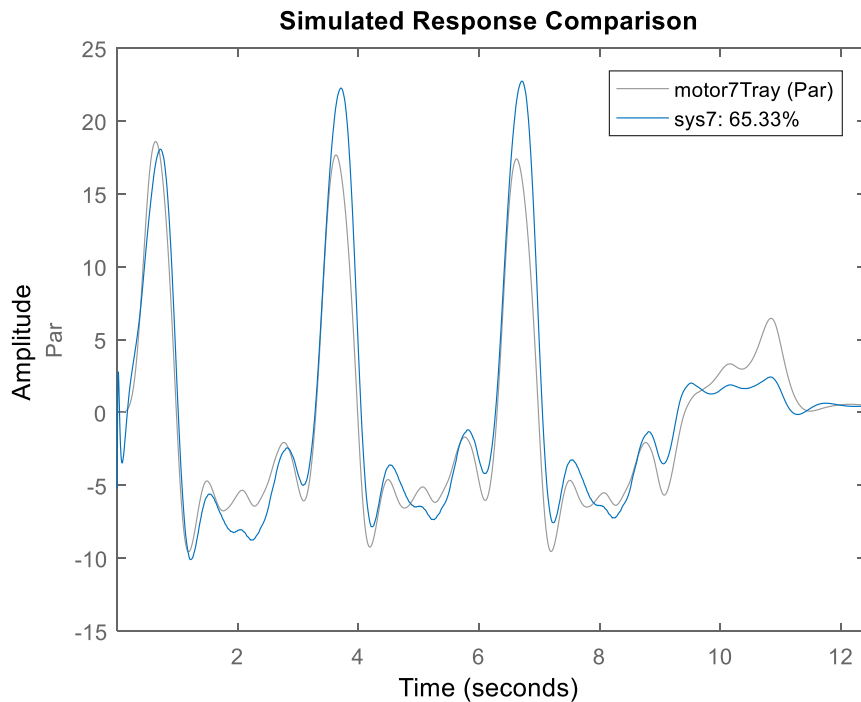


Figura 62 Respuesta de la identificación PID, posición y galga ante los datos de comprobación.

Siendo el mapa de ceros y polos y la respuesta en frecuencia los mostrados a continuación. Como se puede observar, todos presentan polos dominantes, cerca de +1, estando dentro del círculo unitario. La función identificada para PID se comporta como en casos anteriores. Respecto al diagrama bode, se evidencia que la galga no aporta mejoras significativas al sistema, al presentar una atenuación alta para todo el rango de frecuencias. La posición también presenta una alta atenuación, teniendo una mayor ganancia para frecuencias bajas, donde además su desfase es próximo a cero.

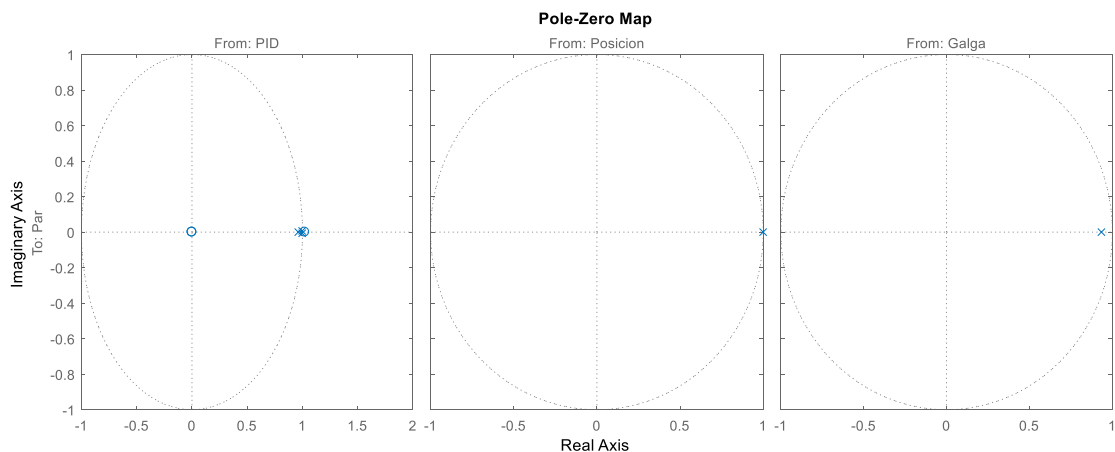


Figura 63 Mapa de ceros y polos del sistema identificado PID, posición y galga - Par.

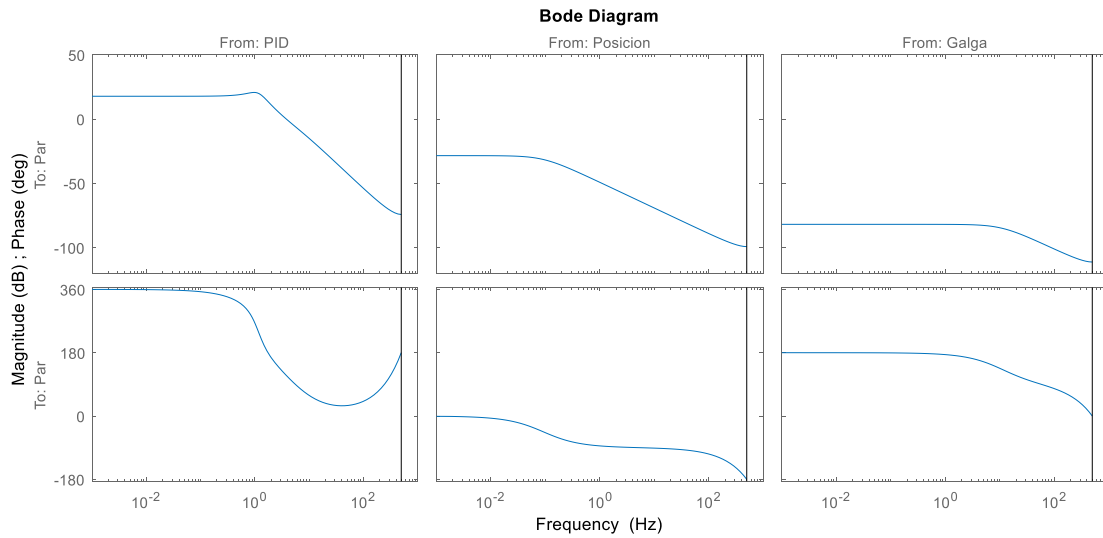


Figura 64 Análisis de frecuencia y fase por medio del diagrama bode del sistema identificado PID, posición y galga - Par.

### C.1.8 Modelo mecánico

El modelo mecánico parte de la ecuación 45, que relaciona el par electromagnético  $T_{Elect}$  ejercido por el motor con la velocidad y aceleración.

$$T_{Elect} - T_{Load} = J\ddot{\theta} + B_v\dot{\theta} \quad (45)$$

Este método se basa en calcular el par ejercido por el motor a partir de las mediciones de velocidad y aceleración, usando la relación mostrada en la ecuación 45. Sin embargo, presenta como inconvenientes desconocer la inercia y amortiguamiento reales del sistema, ya que esta ecuación relaciona en realidad el par neto con la velocidad, no el par bruto, que es el ejercido por el motor. Por ello, se hace la suposición de que durante la trayectoria normal no hay pares externos, existiendo una combinación de inercia y amortiguamiento que relaciona el par electromagnético con la velocidad. En base a eso, para obtener el valor de la inercia y amortiguamiento, se realiza la identificación de la función de transferencia continua que relaciona el par con la velocidad, estableciéndose de 1 polo y ningún cero debido a que esa es la forma de la función de transferencia normal, de acuerdo a la ecuación 46.

$$\dot{\theta}(s) = \frac{1}{J \cdot s + B} T(s) \quad (46)$$

Se realiza bajo dichas premisas la identificación, usando como unidades %/s en velocidad y Nm en par, obteniendo la función de transferencia mostrada en la ecuación 47.

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{T(s)} = G_1(s) = \frac{4.19}{s + 16.29} \quad (47)$$

Siendo entonces la inercia y el amortiguamiento:

$$J = \frac{1}{4.19} = 0.2387 \quad B = \frac{16.29}{4.19} = 3.8878$$

Se comprueba entonces la exactitud el sistema con los datos de entrenamiento y los experimentales, obteniendo para los segundos un rendimiento bajo, de 41.93%. Por lo tanto, no se considera válido este modelo para identificación.

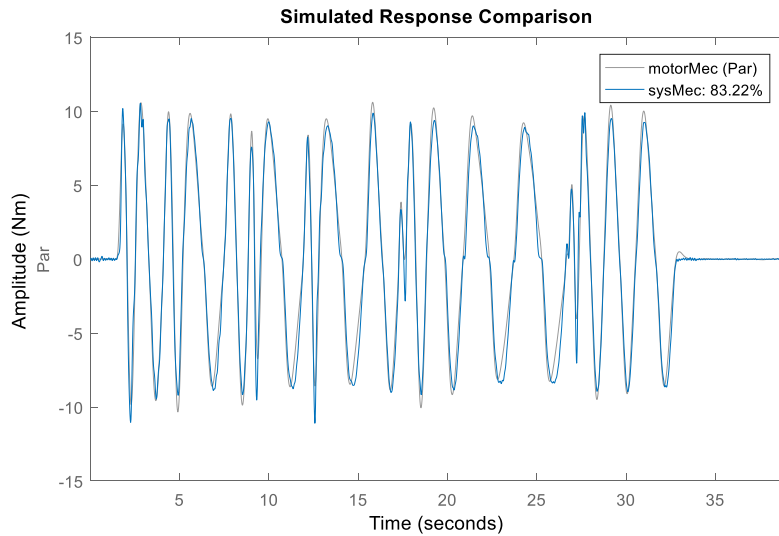


Figura 65 Respuesta del modelado mecánico ante los datos de entrenamiento.

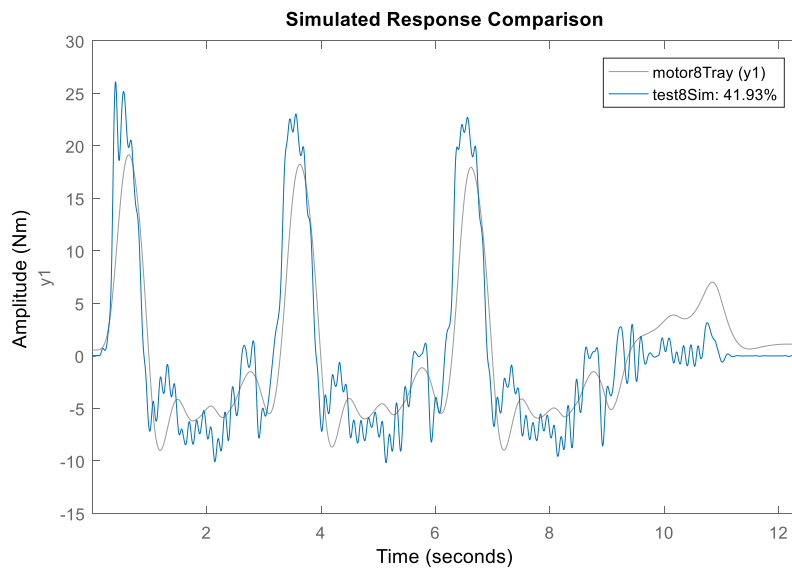


Figura 66 Respuesta del modelado mecánico ante datos experimentales.

## C.2 Respuestas con corrección de ganancia

En este apartado se presentan los pares calculados con los sistemas identificados anteriores, tras aplicar una corrección de ganancia para valores positivos. Dicha ganancia es el coeficiente obtenido tras dividir el par máximo del sistema identificado por el del medido. Se muestran las respuestas tanto en condiciones normales como con pares de obstáculo y ayuda.

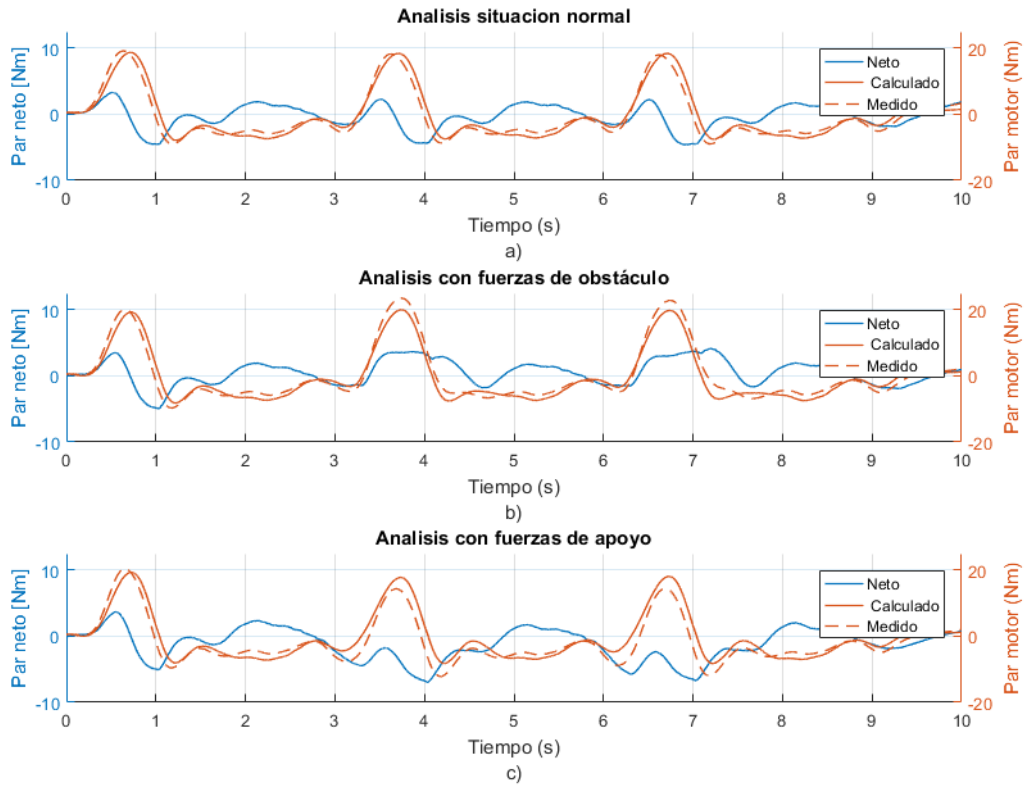


Figura 67 Identificación PID con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

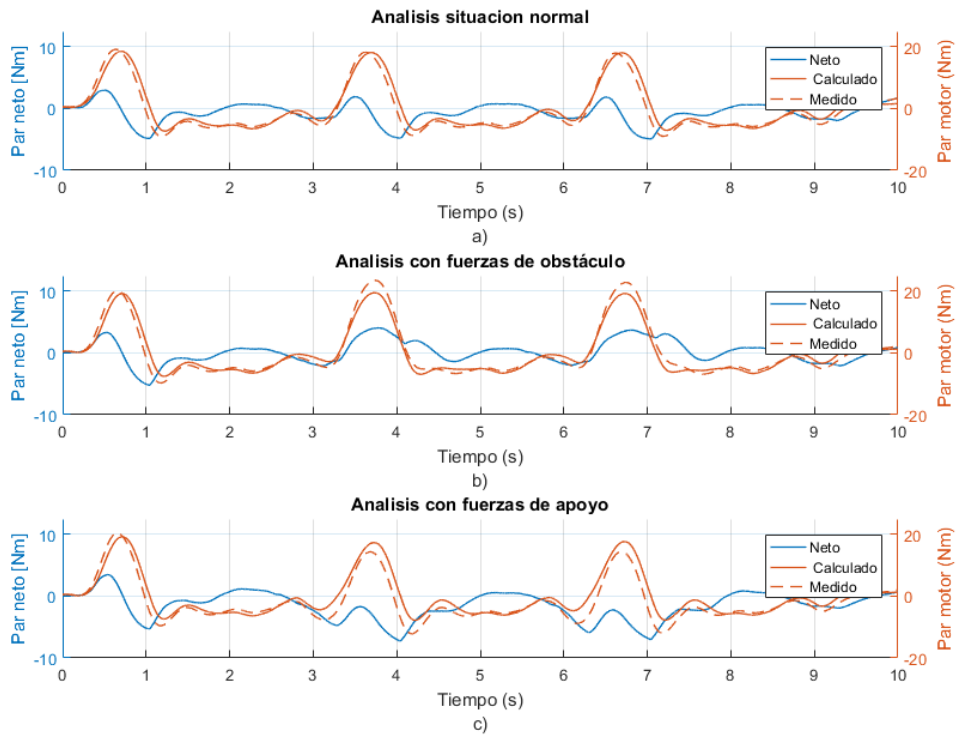


Figura 68 Identificación PID y posición con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

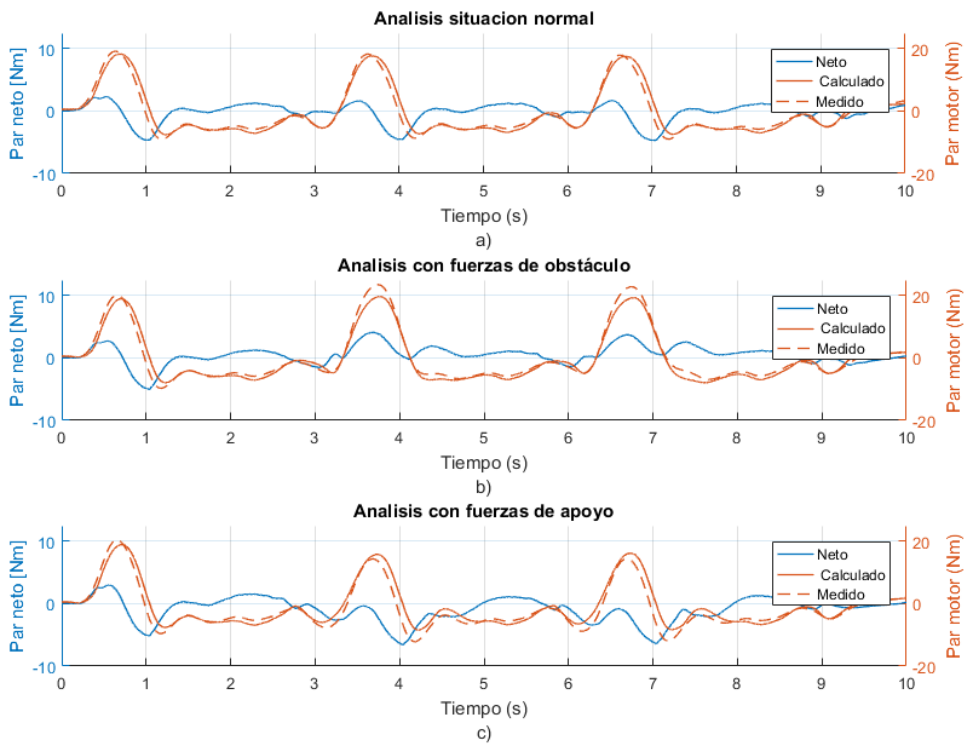


Figura 69 Identificación PID y velocidad con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

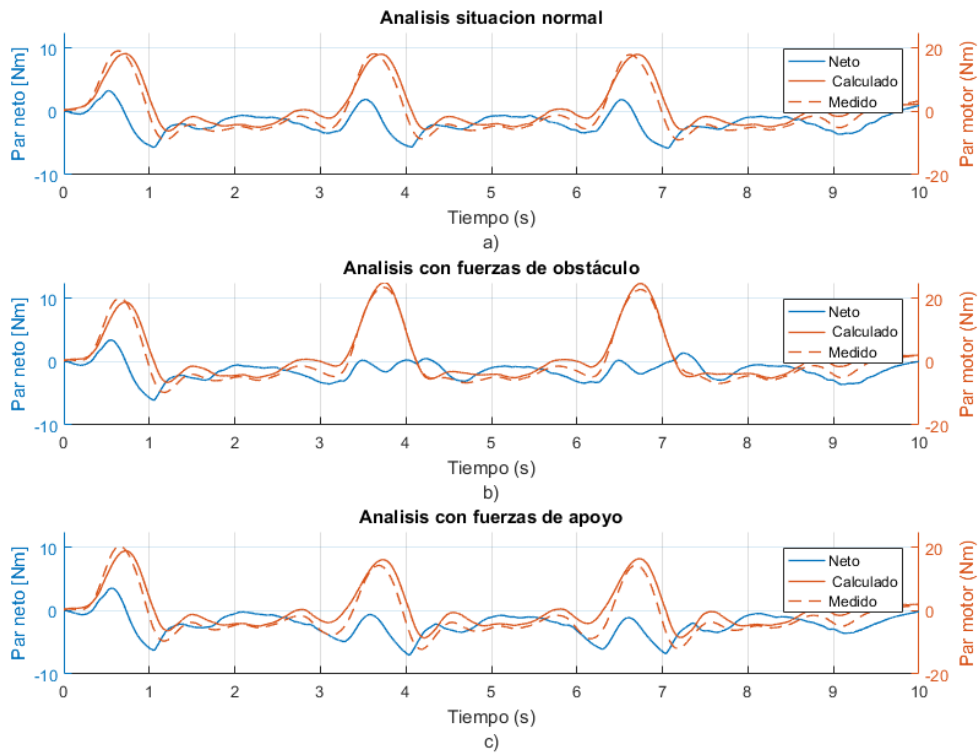


Figura 70 Identificación PID y galga con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

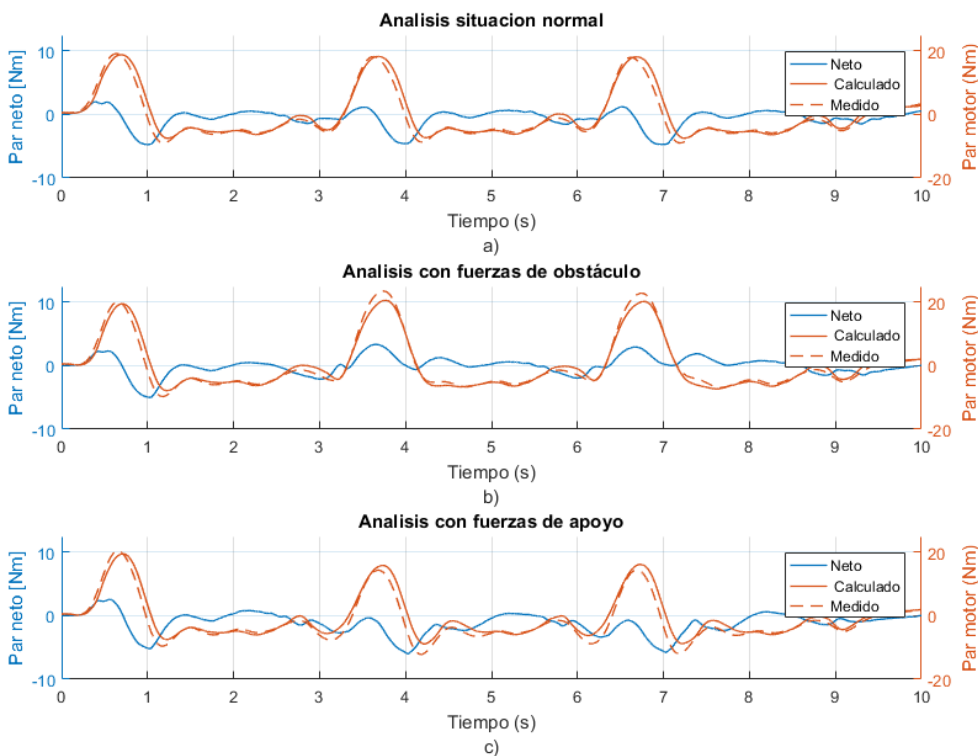


Figura 71 Identificación PID, posición y velocidad con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

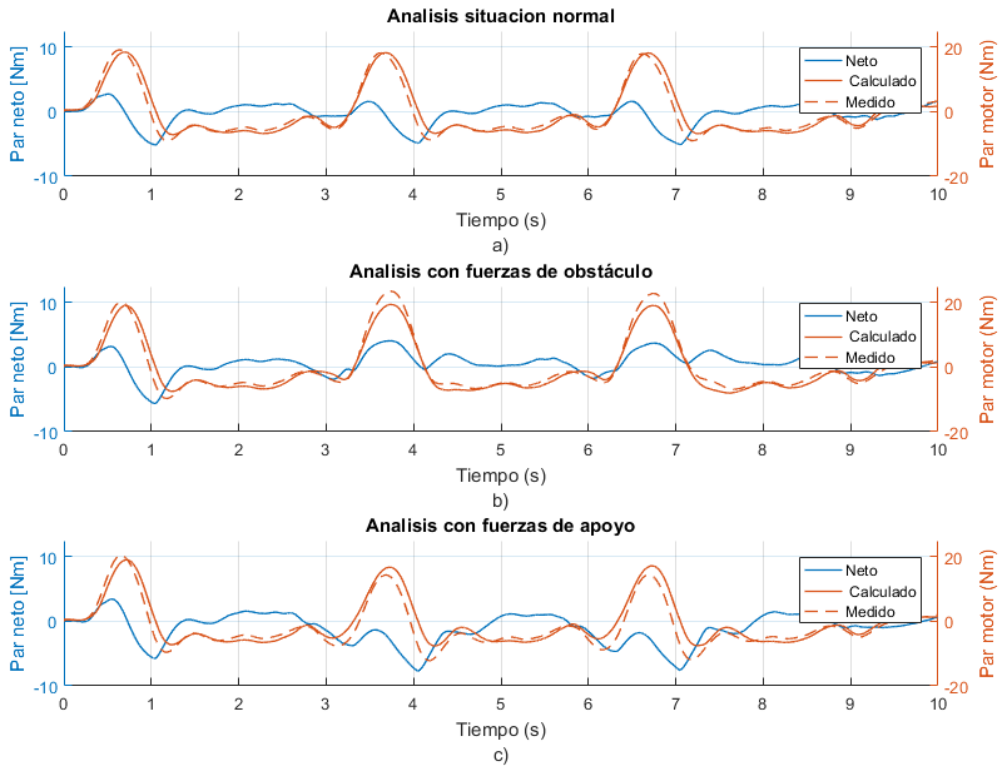


Figura 72 Identificación eléctrica con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

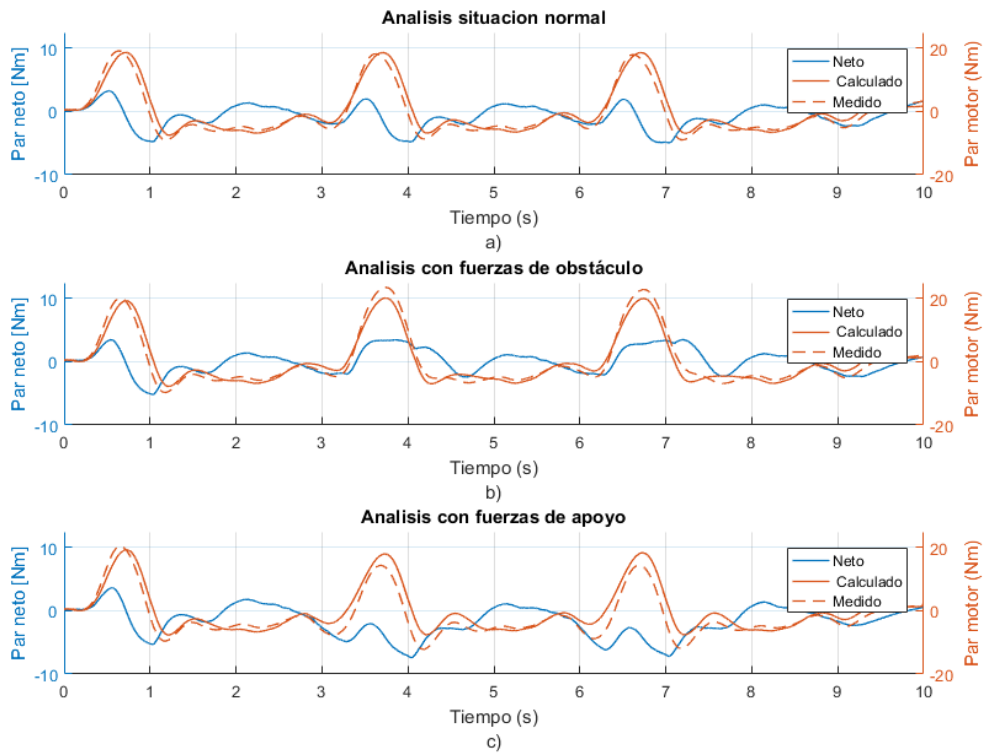


Figura 73 Identificación PID, posición y galga con corrección de ganancia aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo



### C.3 Respuestas con corrección de ganancia y desfase (delay)

En este apartado se presentan los pares calculados con los sistemas identificados anteriores, tras aplicar la anterior corrección de ganancia junto a un delay o retraso al par medido, de manera que el par neto presente un error menor.

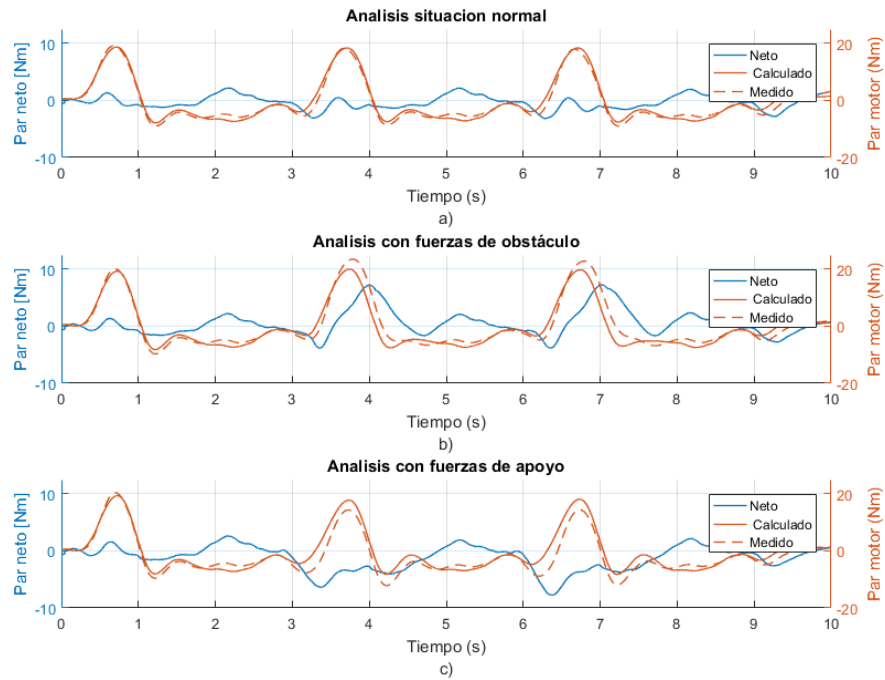


Figura 74 Identificación PID con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

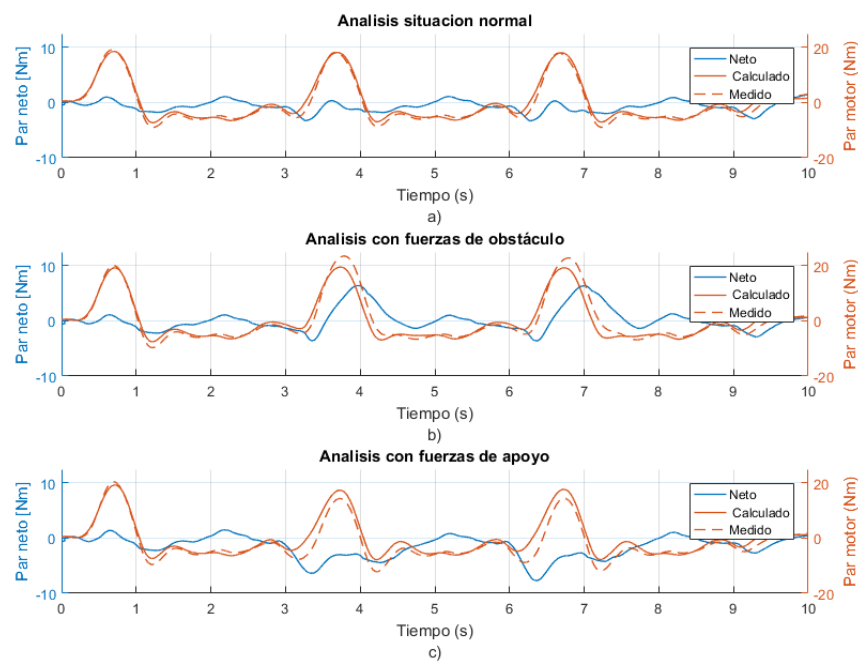


Figura 75 Identificación PID y posición con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

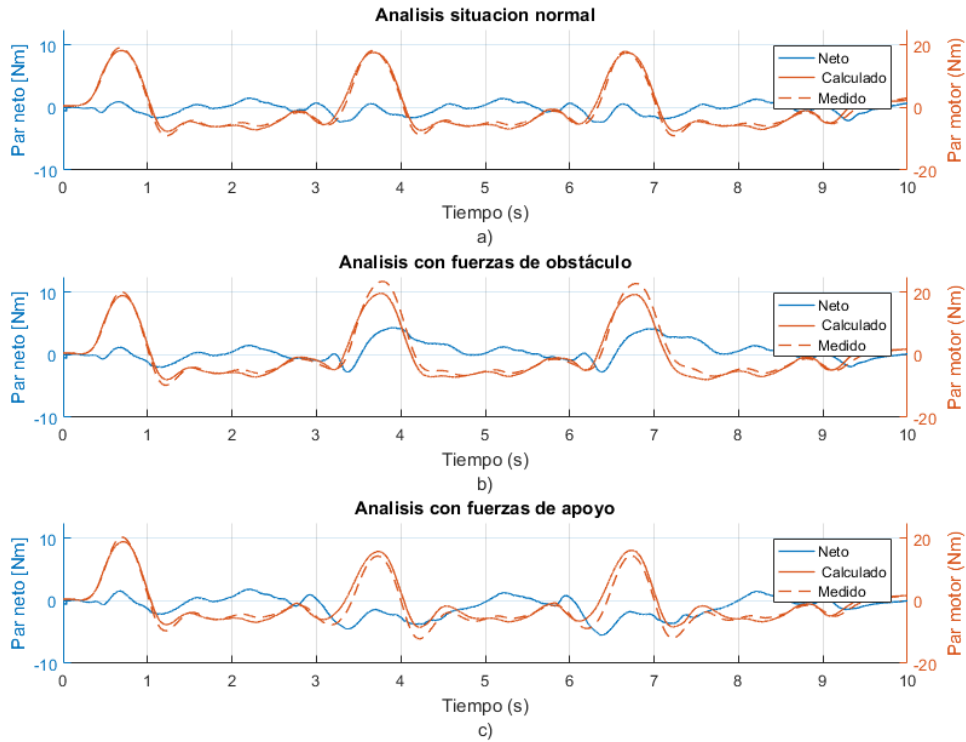


Figura 76 Identificación PID y velocidad con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

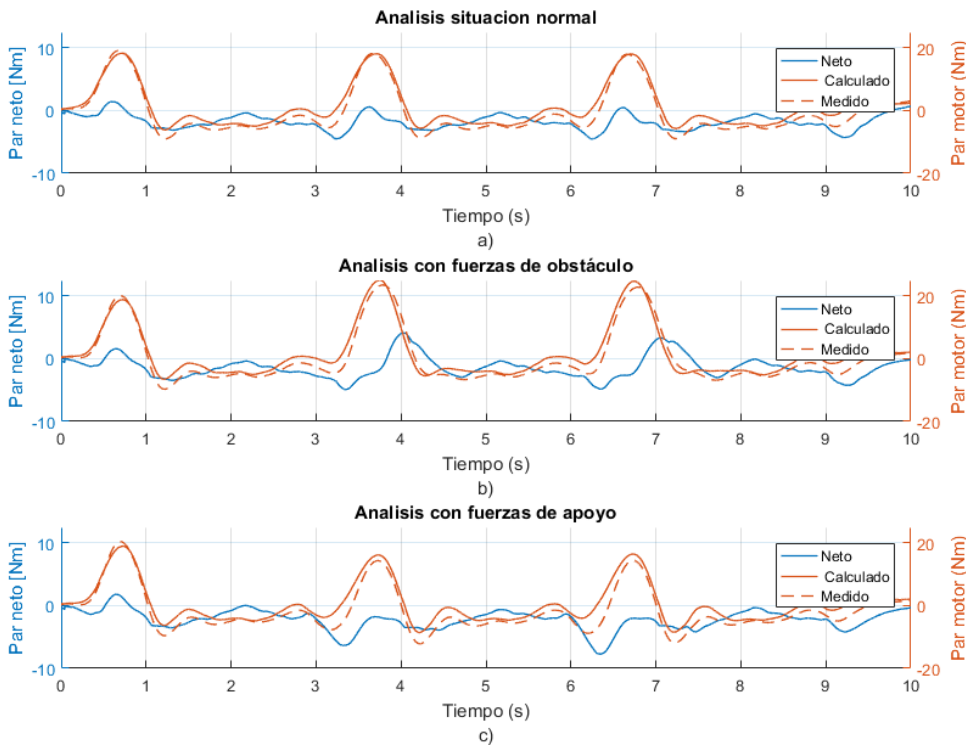


Figura 77 Identificación PID y galga con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

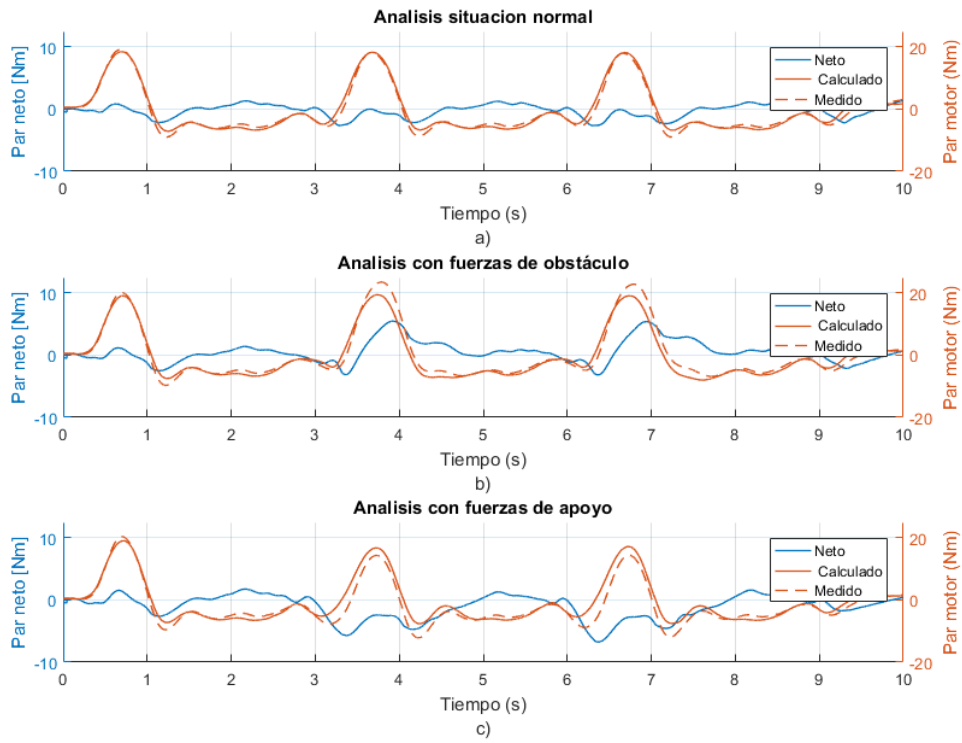


Figura 78 Identificación eléctrica con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

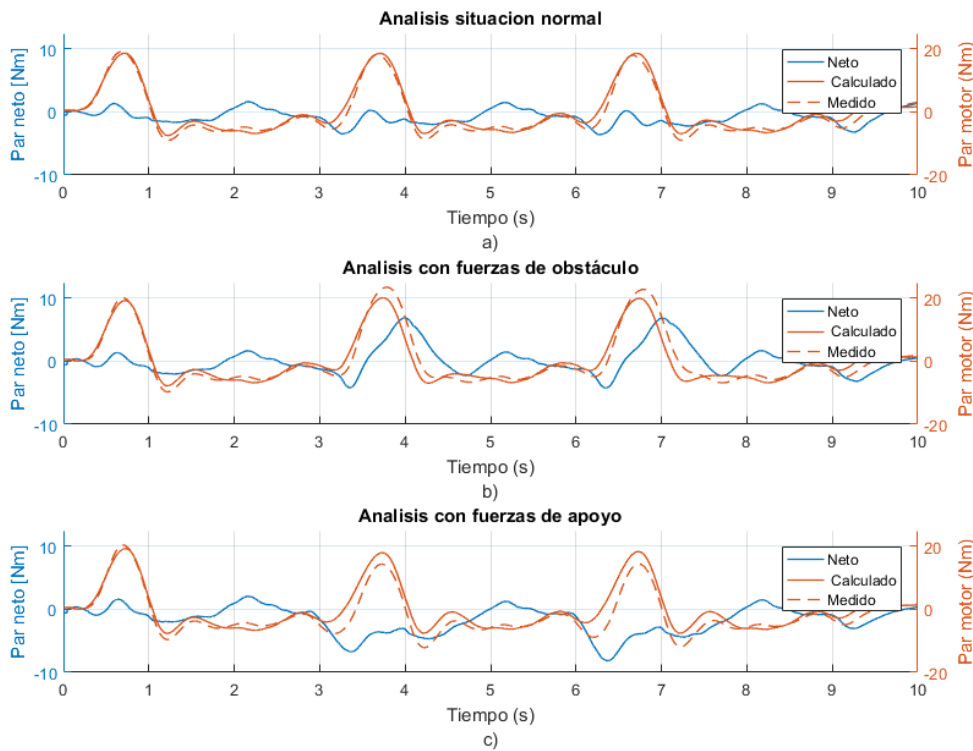


Figura 79 Identificación PID, posición y galga con corrección de ganancia y retraso aplicada a a) Trayectorias normales b) Trayectoria con obstáculo c) Trayectoria con apoyo

## D Simulador del exoesqueleto - Subsistemas

Se muestra a continuación el subsistema de admitancia implementado en el simulador.

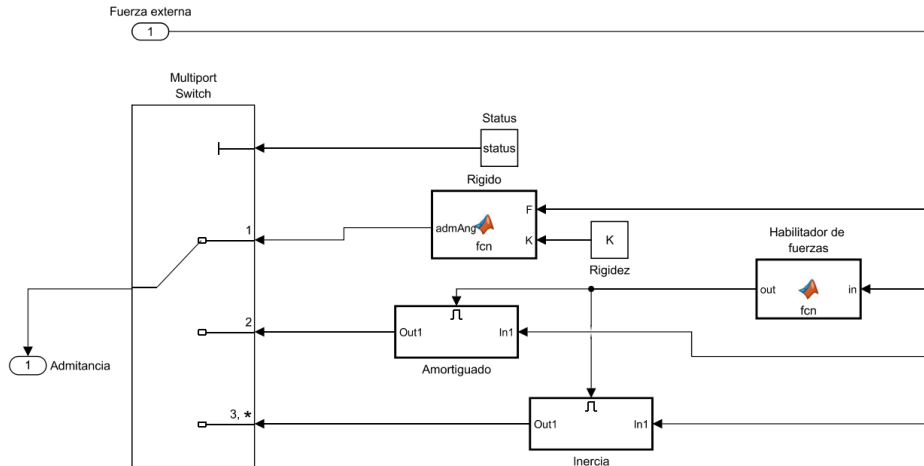


Figura 80 Subsistema de admitancia empleado en simulación.

El filtrado de la señal de aceleración obtenida en simulación, empleada para el cálculo de la carga soportada por el motor, se realiza con filtros paso bajo y notch, empleando un calculador de coeficientes para ello<sup>12</sup>. Las frecuencias de corte aparecen indicadas en Hercios (Hz) en la Figura 81. Lp significa low pass (paso bajo), empleándose adicionalmente filtros notch, para eliminar frecuencias concretas. Adicionalmente se aplica un cambio de frecuencia a la señal de 1MHz a 1 KHz, debido a que la aceleración es medida cada microsegundo ( $\mu s$ ), tiempo de muestreo (sample time) empleado en controlador y motor. Entonces, la señal de aceleración es procesada con un filtro paso bajo a 100 Hz y uno notch a 67 Hz. Adicionalmente otro paso bajo a 50 Hz para suprimir en mayor medida las frecuencias superiores. Posteriormente, se cambia de frecuencia mediante un bloque de retención de orden cero (Zero-Order-Hold, ZOH) y se aplica a la nueva señal un filtro paso bajo con frecuencia de corte 5 Hz.



Figura 81 Filtrado de la señal de aceleración tomada en simulación.

## E Experimentación

### E.1 Esquemas

<sup>12</sup> <http://www.earlevel.com/main/2013/10/13/biquad-calculator-v2/>

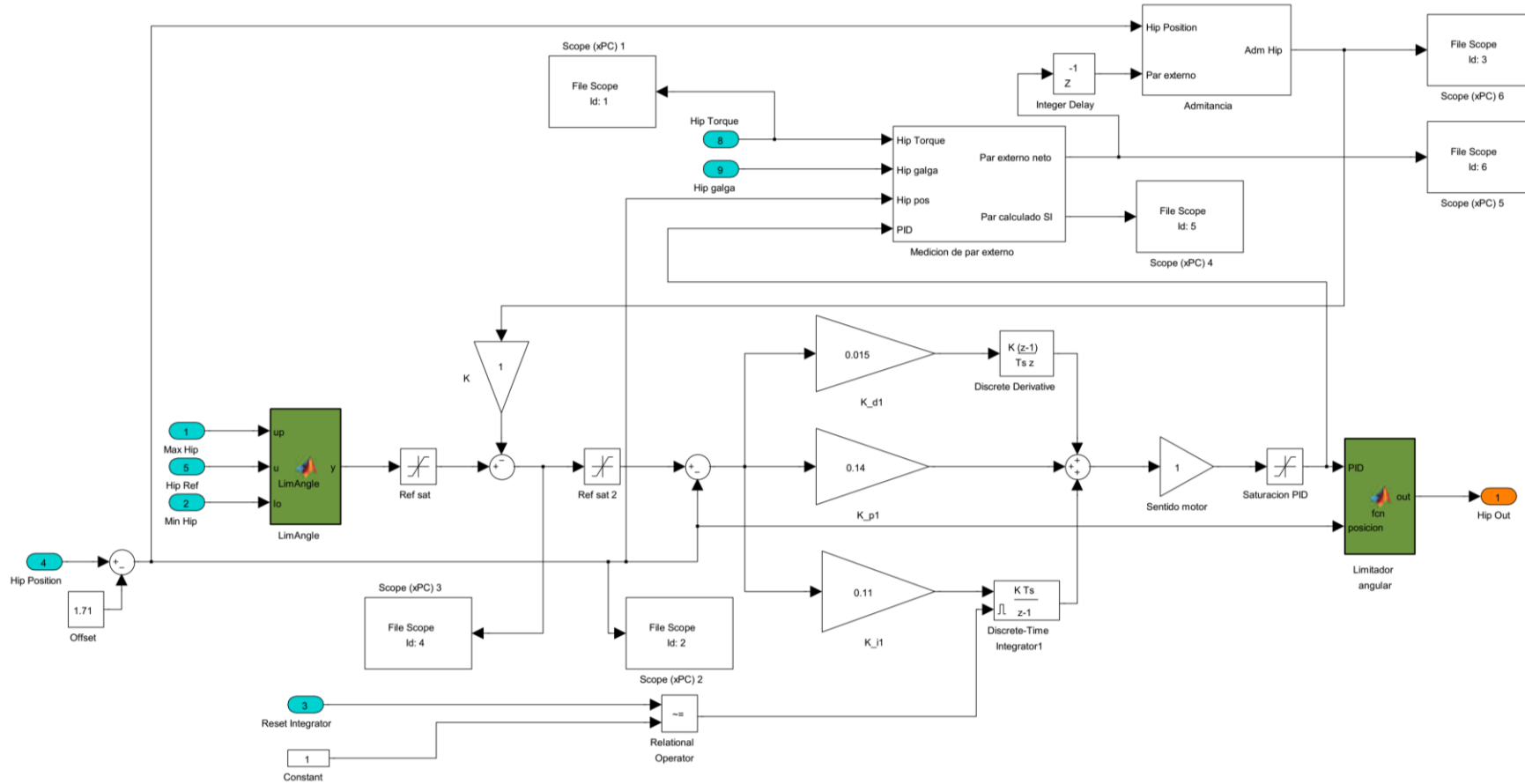


Figura 82 Esquema de control de posición con medidor de pares externos y admitancia.

## E.2 Resultados

A continuación, se muestran resultados para diferentes controladores y coeficientes experimentales, donde las fuerzas aplicadas difieren de una prueba a otra, debido al carácter manual y humano de las mismas.

### E.2.1 Obstáculos con control rígido

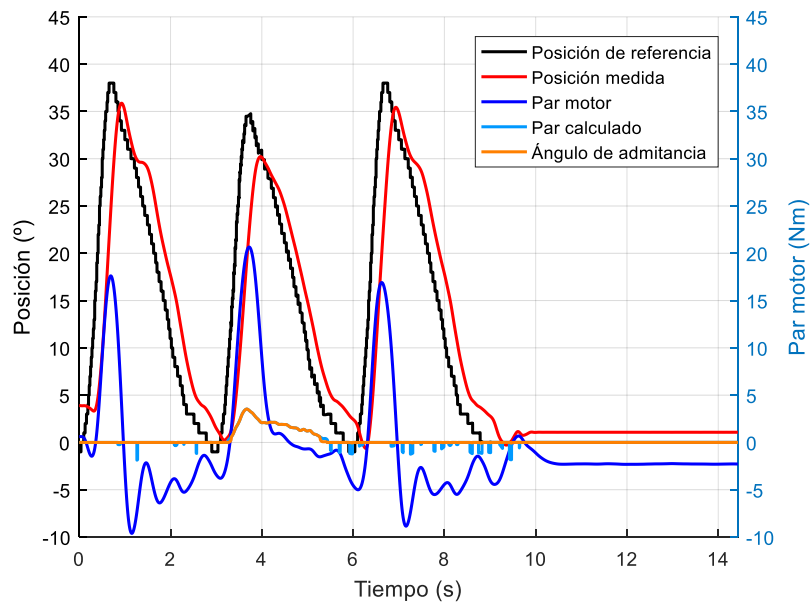


Figura 83 Control rígido  $K=1$  ante obstáculo.

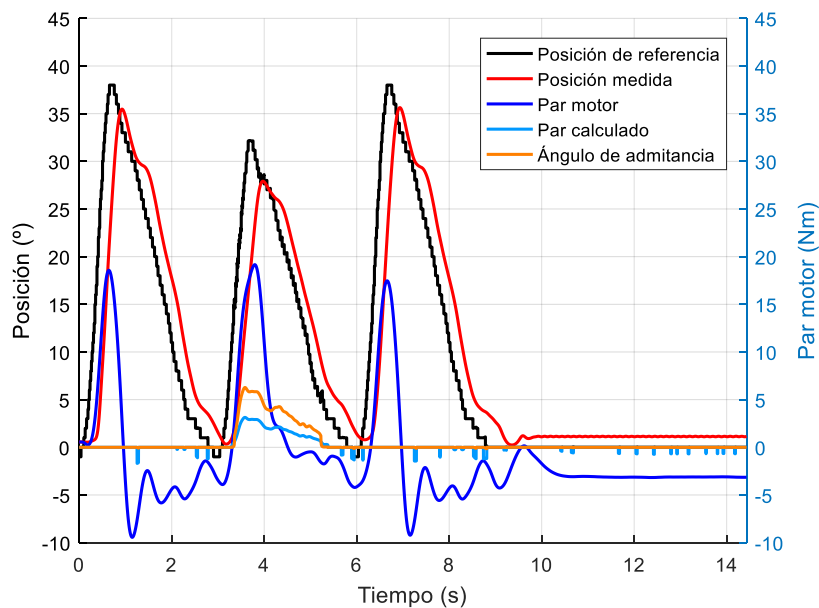


Figura 84 Control rígido  $K=0.5$  ante obstáculo.

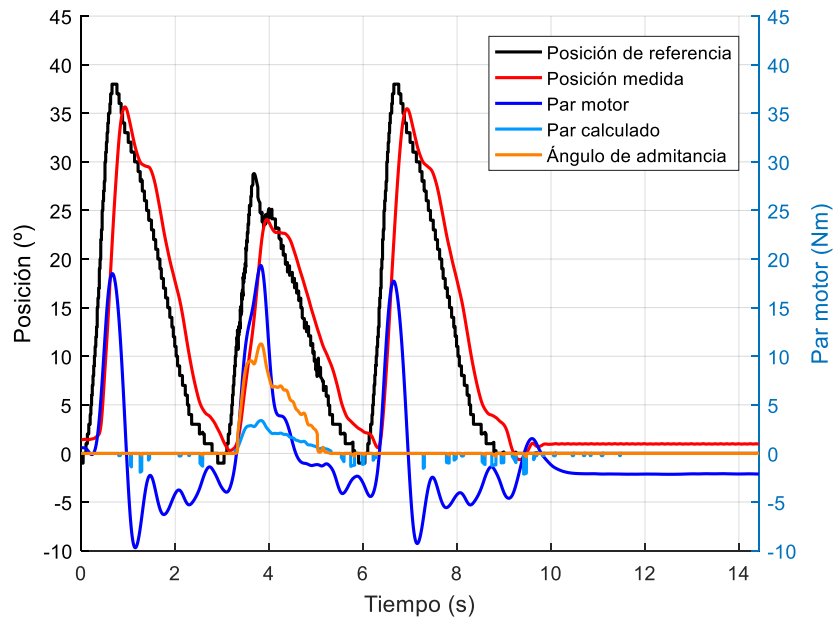


Figura 85 Control rígido  $K=0.3$  ante obstáculo.

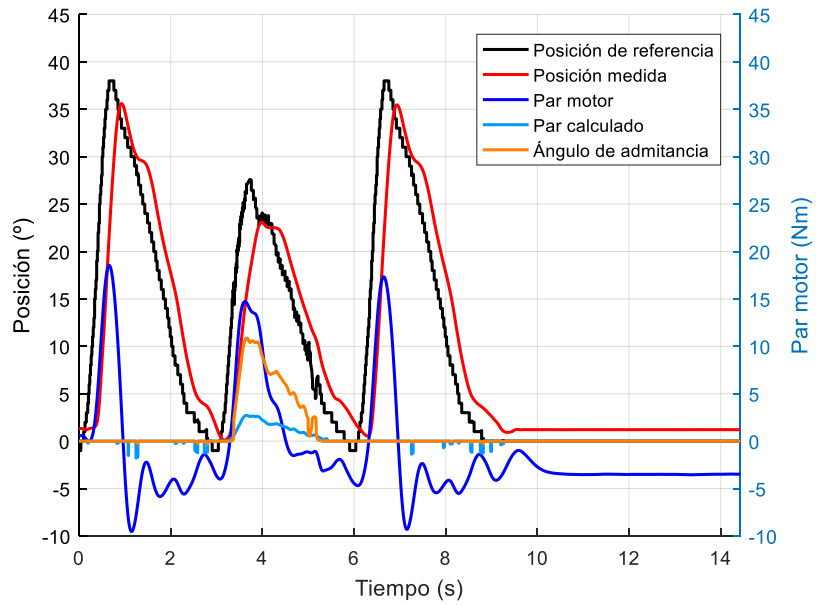


Figura 86 Control rígido  $K=0.25$  ante obstáculo.

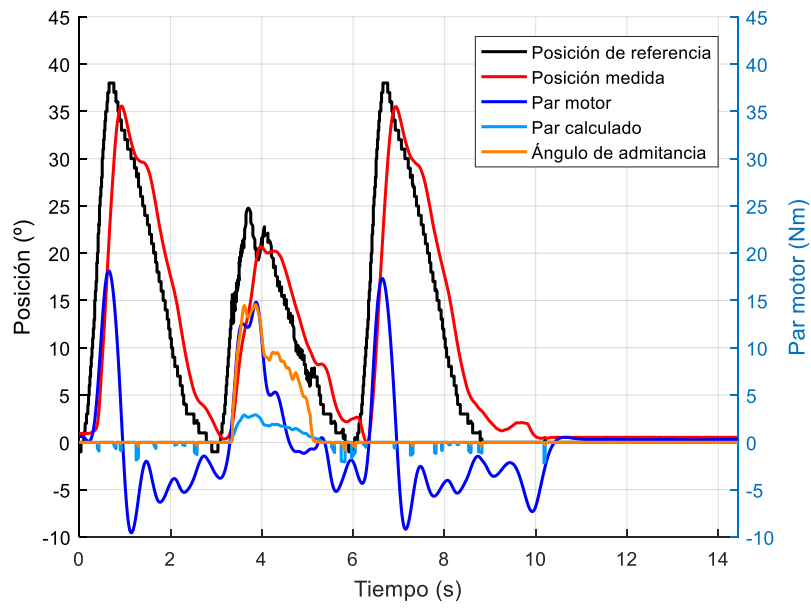


Figura 87 Control rígido  $K=0.2$  ante obstáculo.

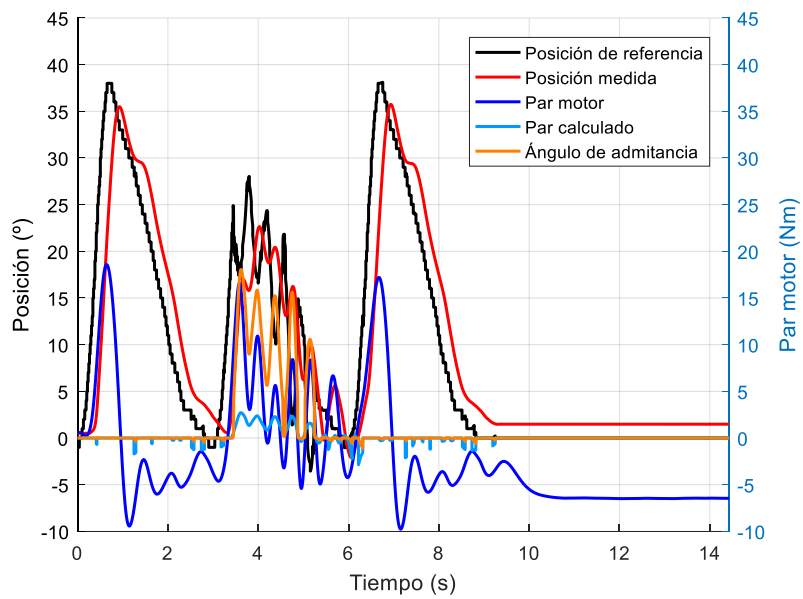


Figura 88 Control rígido  $K=0.15$  ante obstáculo.



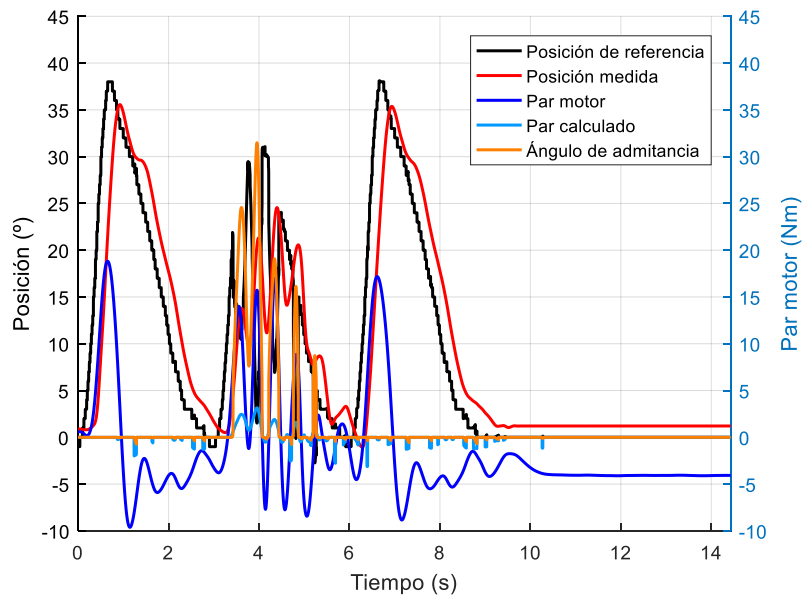


Figura 89 Control rígido  $K=0.1$  ante obstáculo.

E.2.2 Ayuda con control amortiguado

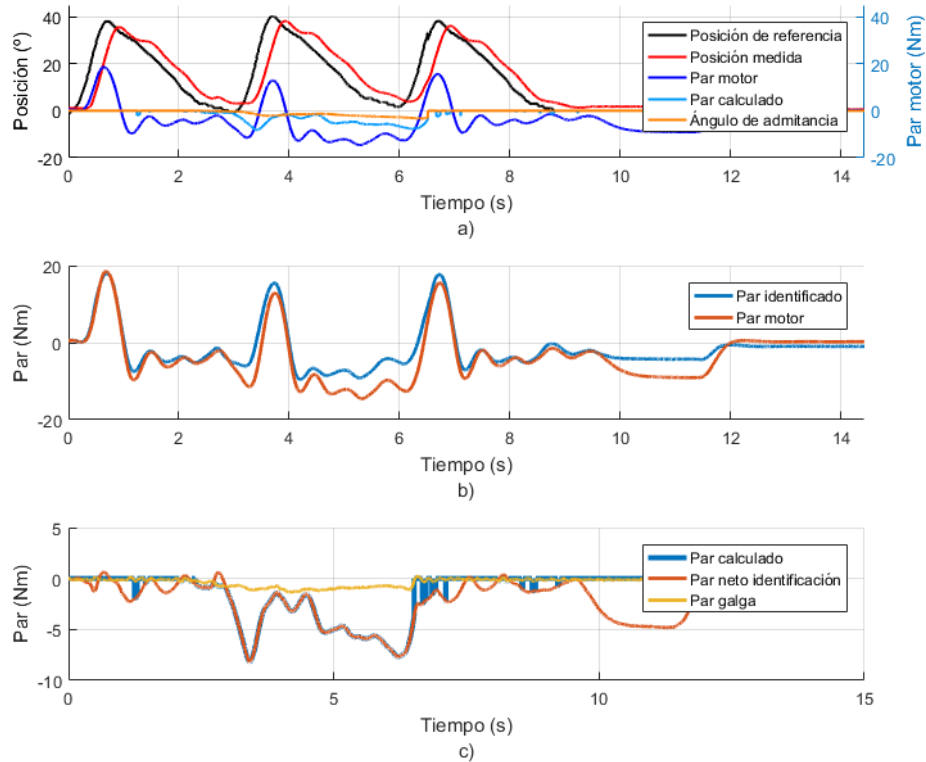


Figura 90 Control amortiguado con  $\text{Gain}=1$   $D=1$   $K=2$  ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

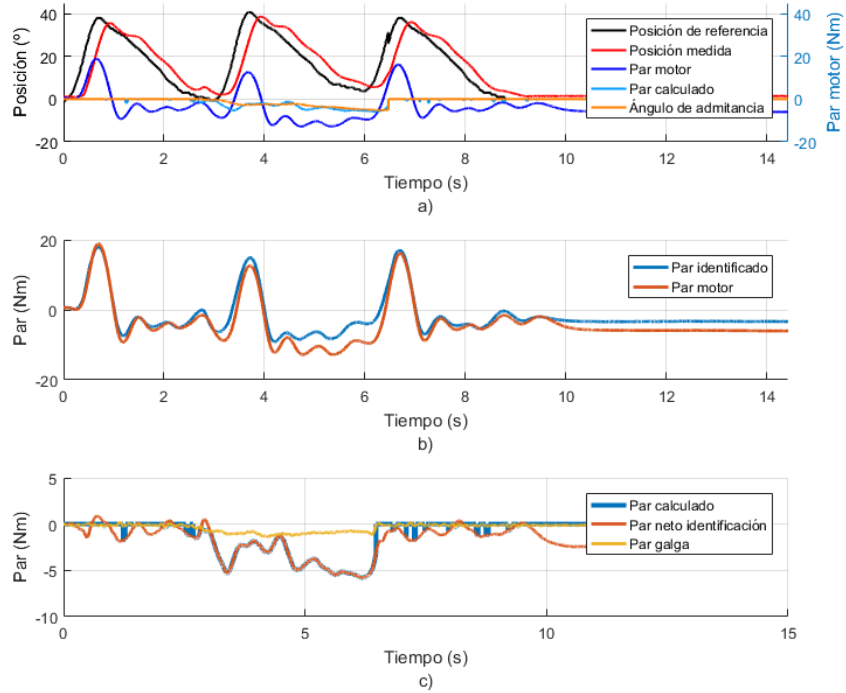


Figura 91 Control amortiguado con Gain=2 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

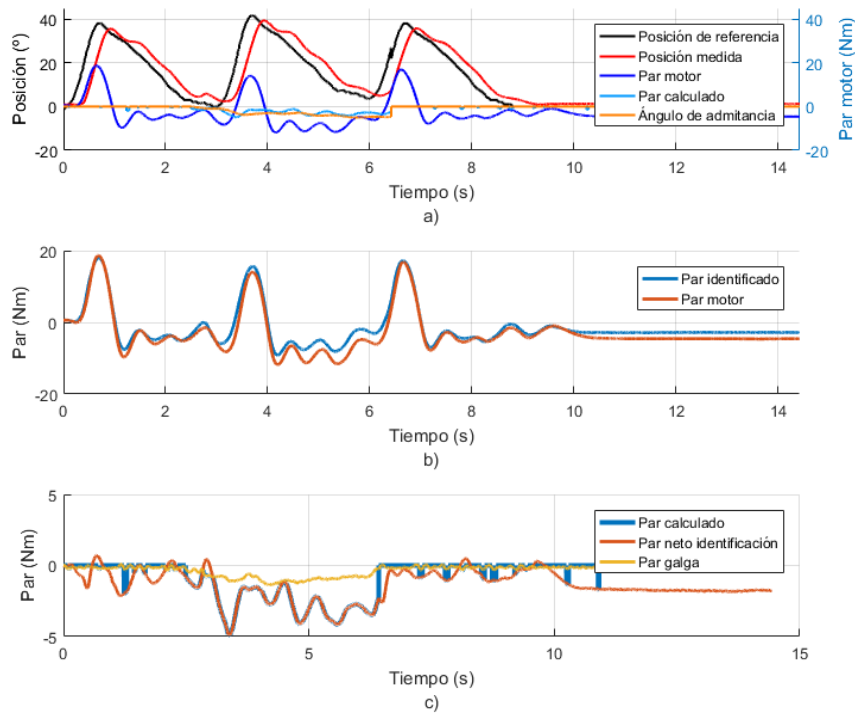


Figura 92 Control amortiguado con Gain=3 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

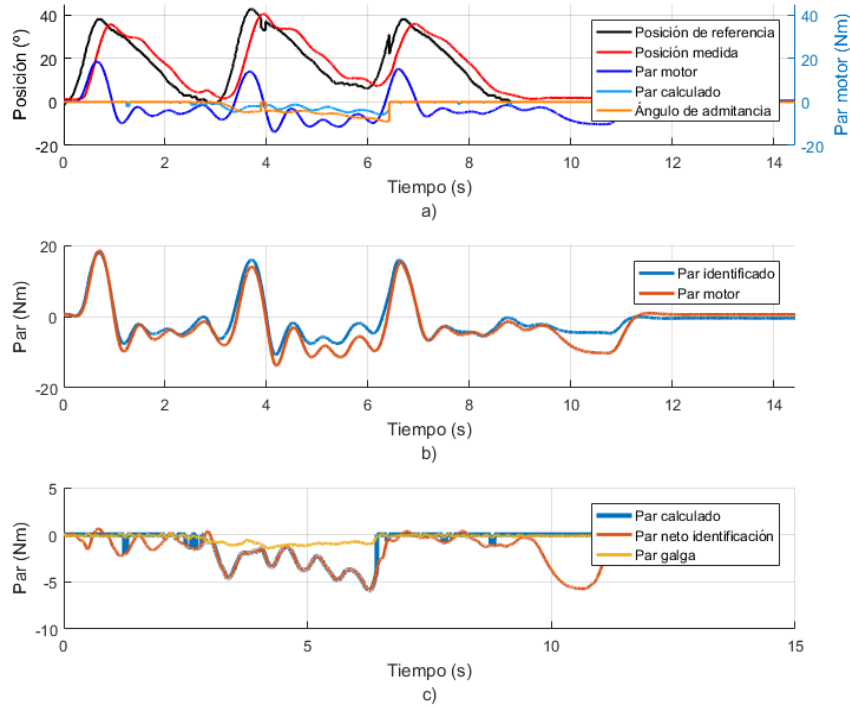


Figura 93 Control amortiguado con Gain=4 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

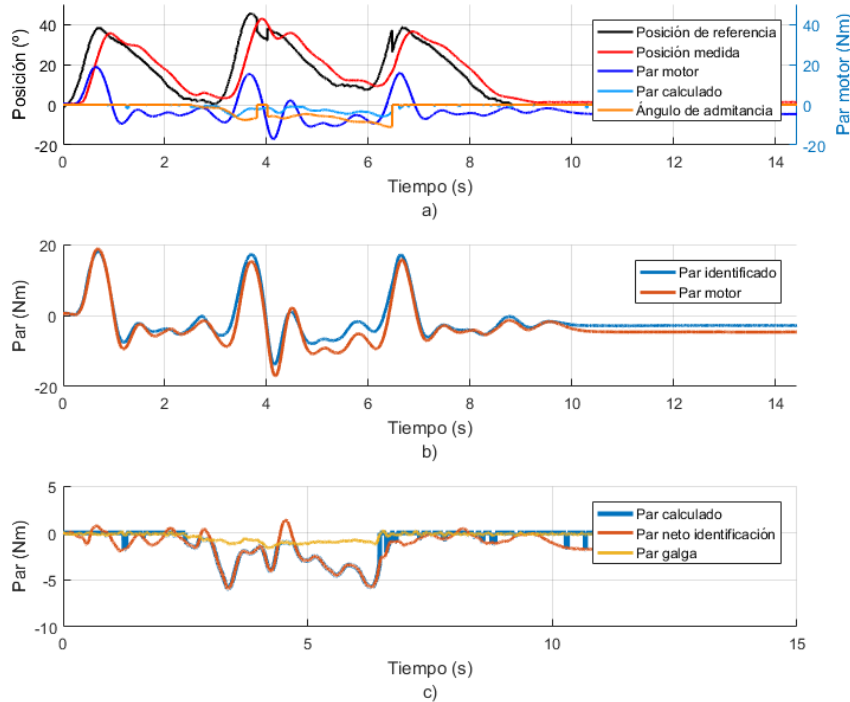


Figura 94 Control amortiguado con Gain=5 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

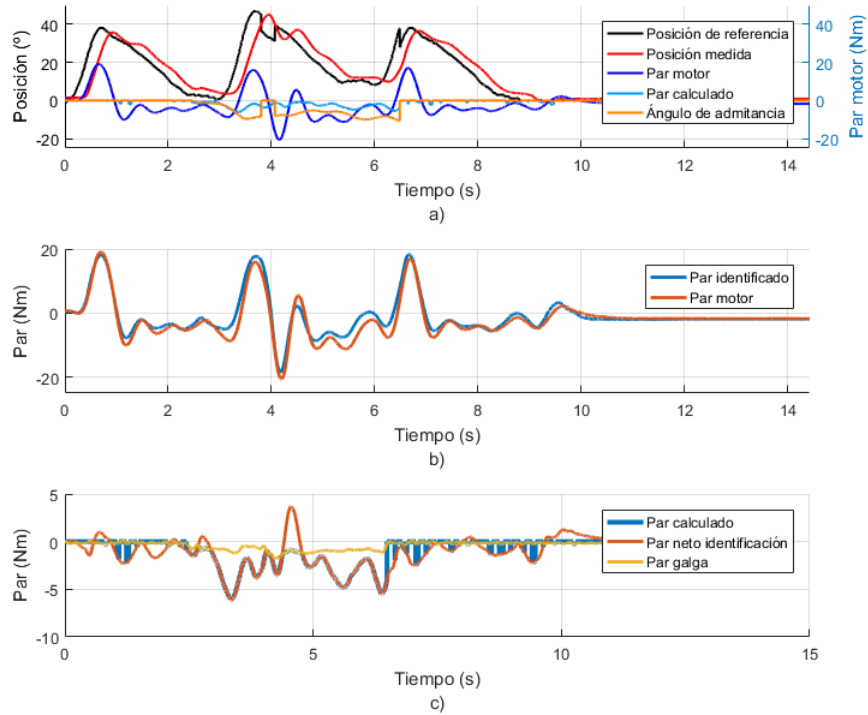


Figura 95 Control amortiguado con Gain=6 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

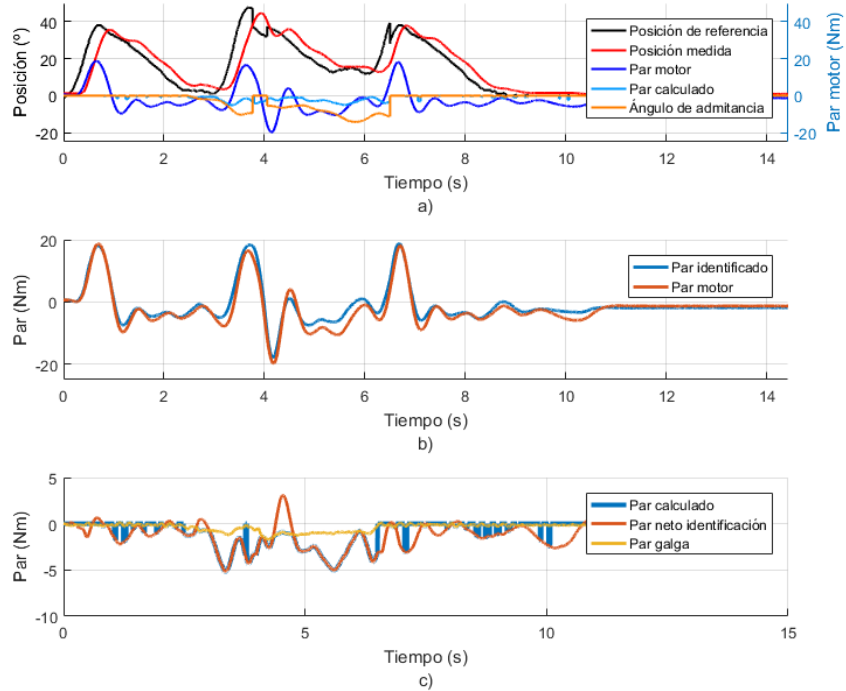


Figura 96 Control amortiguado con Gain=8 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

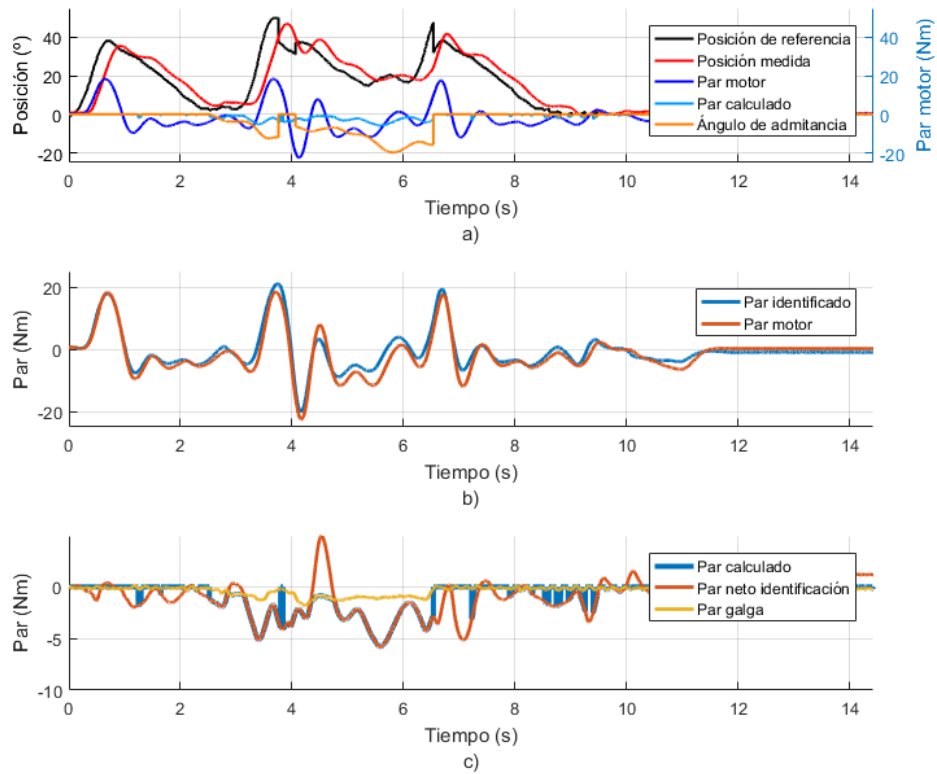


Figura 97 Control amortiguado con Gain=10 D=1 K=2 ante obstáculo. a) Influencia en la trayectoria. b) Comparación de par real e identificado. c) Influencia de cada sistema de medición en el par calculado.

### E.2.3 Modo de movimiento libre

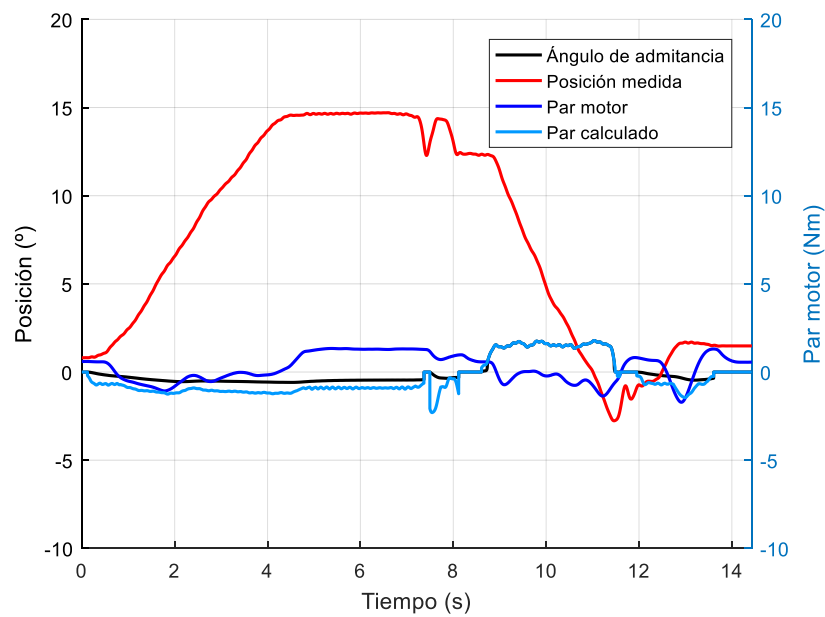


Figura 98 Control rígido con K=1 y amortiguado con Gain=1 D=1 K=2 en modo libre.

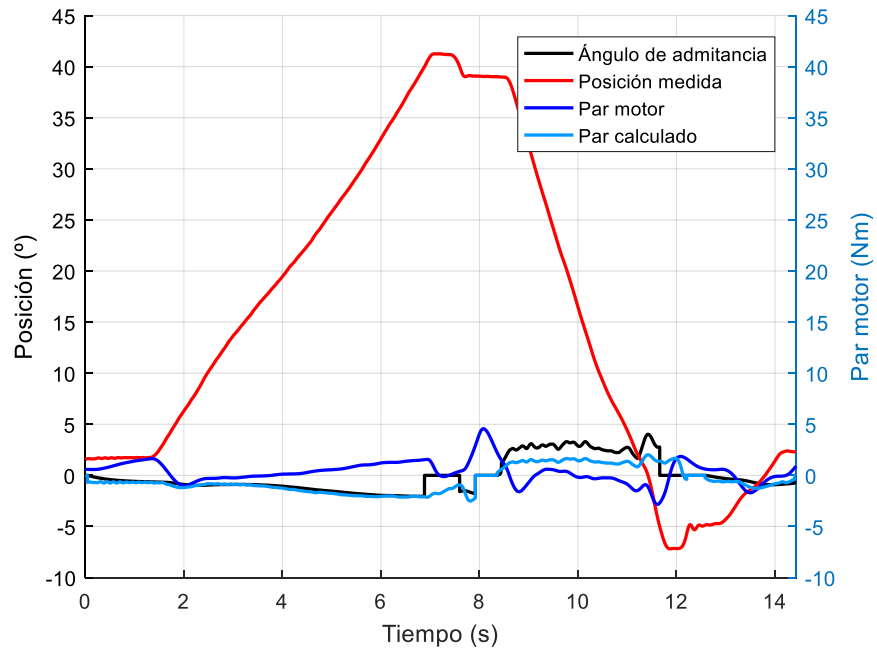


Figura 99 Control rígido con  $K=0.5$  y amortiguado con  $\text{Gain}=2$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.

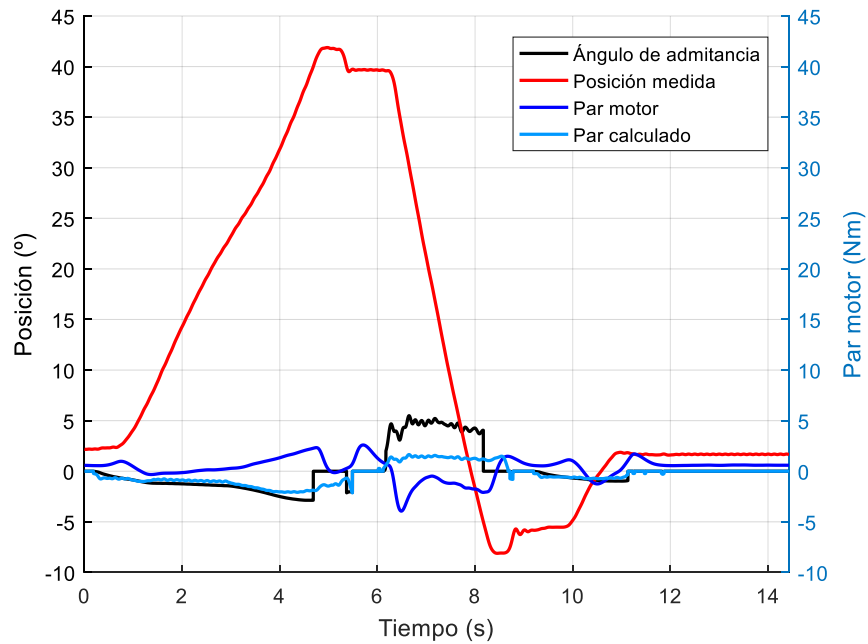


Figura 100 Control rígido con  $K=0.3$  y amortiguado con  $\text{Gain}=3$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.

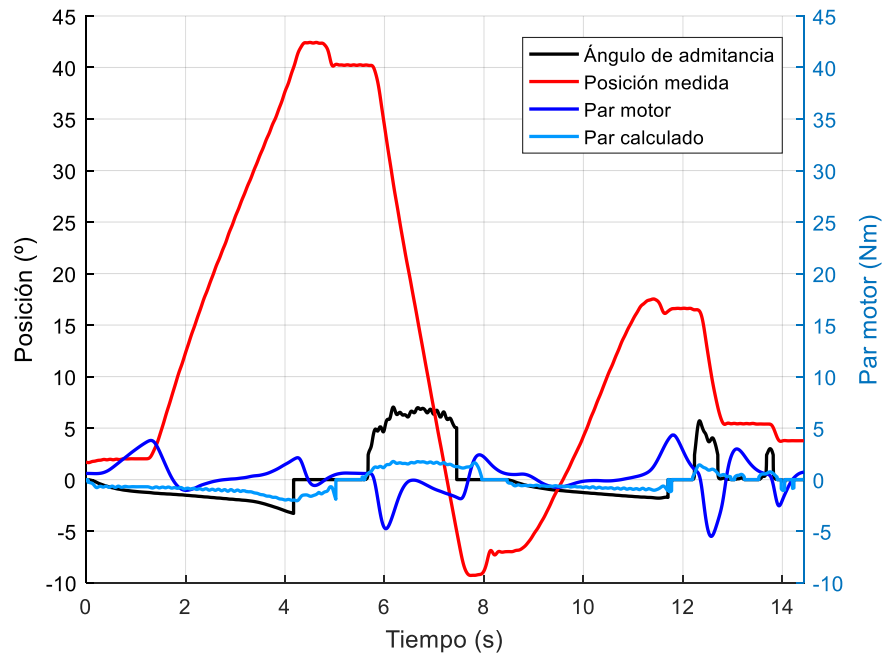


Figura 101 Control rígido con  $K=0.25$  y amortiguado con  $\text{Gain}=4$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.

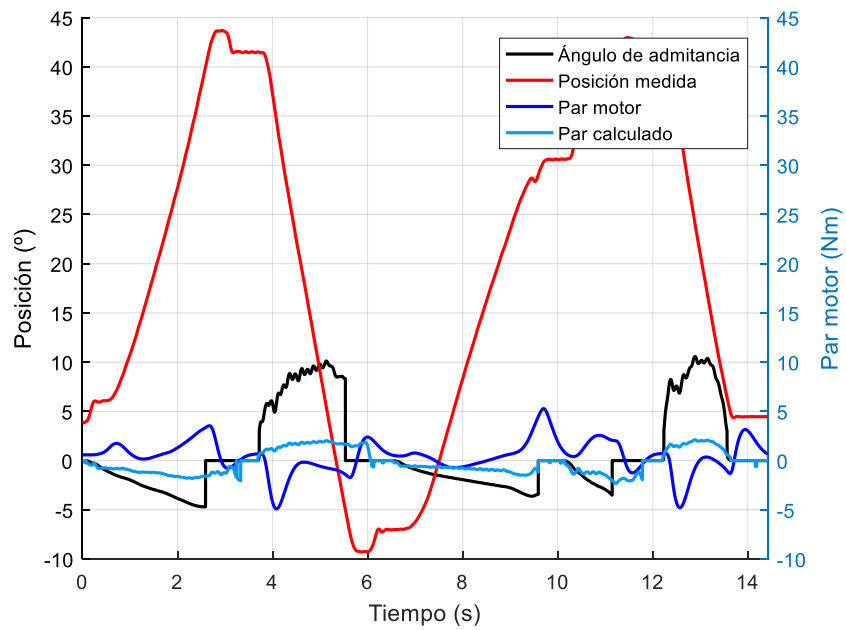


Figura 102 Control rígido con  $K=0.2$  y amortiguado con  $\text{Gain}=6$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.

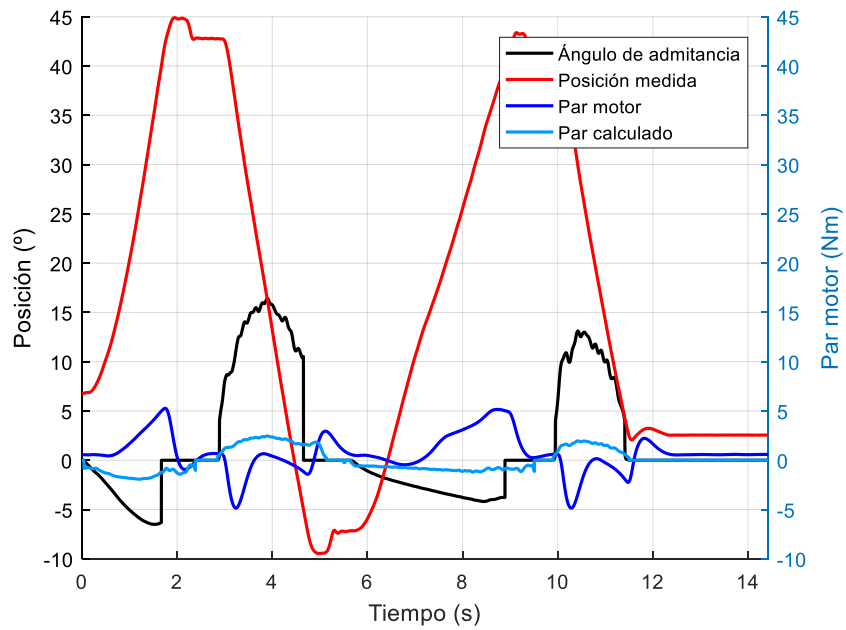


Figura 103 Control rígido con  $K=0.15$  y amortiguado con  $\text{Gain}=8$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.

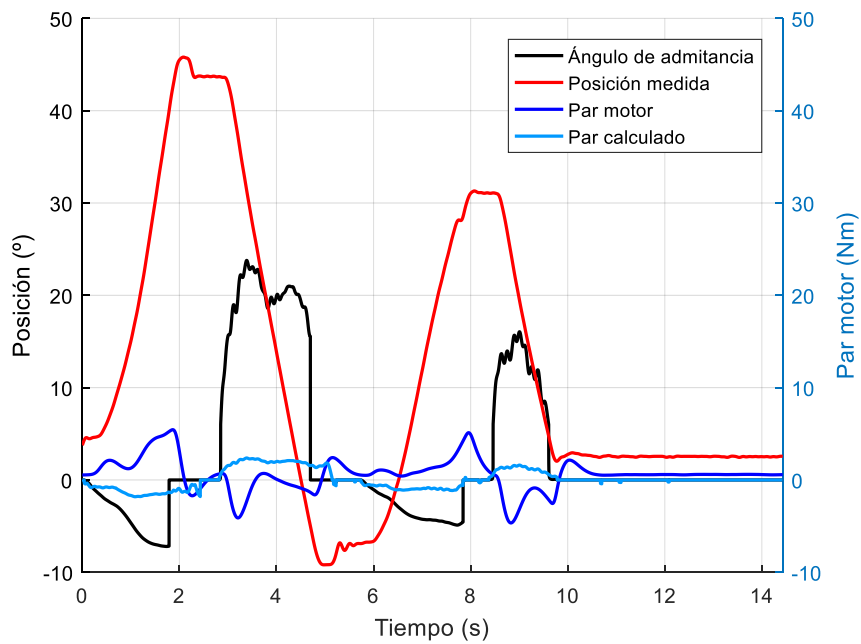


Figura 104 Control rígido con  $K=0.1$  y amortiguado con  $\text{Gain}=10$   $D=1$   $K=2$  en modo libre.



## 5 Bibliografía

- [1] N. Hogan, «Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I—Theory», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 107, n.º 1, pp. 1-7, mar. 1985.
- [2] N. Hogan, «Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II—Implementation», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 107, n.º 1, pp. 8-16, mar. 1985.
- [3] N. Hogan, «Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part III—Applications», *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 107, n.º 1, pp. 17-24, mar. 1985.
- [4] S. Lee y Y. Sankai, «Power assist control for leg with HAL-3 based on virtual torque and impedance adjustment», en *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2002, vol. 4, p. 6 pp. vol.4-.
- [5] K. Suzuki, G. Mito, H. Kawamoto, Y. Hasegawa, y Y. Sankai, «Intention-based walking support for paraplegia patients with Robot Suit HAL», *Adv. Robot.*, vol. 21, n.º 12, pp. 1441-1469, ene. 2007.
- [6] A. Tsukahara, Y. Hasegawa, y Y. Sankai, «Gait support for complete spinal cord injury patient by synchronized leg-swing with HAL», en *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 1737-1742.
- [7] S. Krut, M. Benoit, E. Dombre, y F. Pierrot, «MoonWalker, a lower limb exoskeleton able to sustain bodyweight using a passive force balancer», en *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 2215-2220.
- [8] S. Wang *et al.*, «Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 23, n.º 2, pp. 277-286, mar. 2015.
- [9] G. Aguirre-Ollinger, J. E. Colgate, M. A. Peshkin, y A. Goswami, «A 1-DOF assistive exoskeleton with virtual negative damping: effects on the kinematic response of the lower limbs», en *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 1938-1944.
- [10] T. H. Huang, C. A. Cheng, y H. P. Huang, «Self-learning assistive exoskeleton with sliding mode admittance control», en *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 698-703.
- [11] K. Kong y D. Jeon, «Design and control of an exoskeleton for the elderly and patients», *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 11, n.º 4, pp. 428-432, ago. 2006.
- [12] P. D. Neuhaus, J. H. Noorden, T. J. Craig, T. Torres, J. Kirschbaum, y J. E. Pratt, «Design and evaluation of Mina: A robotic orthosis for paraplegics», en *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011, pp. 1-8.
- [13] D. Aoyagi, W. E. Ichinose, S. J. Harkema, D. J. Reinkensmeyer, y J. E. Bobrow, «A Robot and Control Algorithm That Can Synchronously Assist in Naturalistic Motion During Body-Weight-Supported Gait Training Following Neurologic Injury», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 15, n.º 3, pp. 387-400, sep. 2007.
- [14] S. Jezernik, G. Colombo, y M. Morari, «Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-DOF robotic orthosis», *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, n.º 3, pp. 574-582, jun. 2004.

- [15] S. Jezernik, G. Colombo, T. Keller, H. Frueh, y M. Morari, «Robotic Orthosis Lokomat: A Rehabilitation and Research Tool», *Neuromodulation Technol. Neural Interface*, vol. 6, n.º 2, pp. 108-115, abr. 2003.
- [16] M. Bernhardt, M. Frey, G. Colombo, y R. Riener, «Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot LOKOMAT», en *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005.*, 2005, pp. 536-539.
- [17] S. K. Banala, S. K. Agrawal, y J. P. Scholz, «Active Leg Exoskeleton (ALEX) for Gait Rehabilitation of Motor-Impaired Patients», en *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2007*, pp. 401-407.
- [18] S. K. Banala, S. H. Kim, S. K. Agrawal, y J. P. Scholz, «Robot Assisted Gait Training With Active Leg Exoskeleton (ALEX)», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 17, n.º 1, pp. 2-8, feb. 2009.
- [19] J. F. Veneman, R. Kruidhof, E. E. G. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. F. V. Asseldonk, y H. van der Kooij, «Design and Evaluation of the LOPES Exoskeleton Robot for Interactive Gait Rehabilitation», *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 15, n.º 3, pp. 379-386, sep. 2007.
- [20] H. Vallery, J. Veneman, E. van Asseldonk, R. Ekkelenkamp, M. Buss, y H. van D. Kooij, «Compliant actuation of rehabilitation robots», *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 15, n.º 3, pp. 60-69, sep. 2008.
- [21] O. Unluhisarcikli, M. Pietrusinski, B. Weinberg, P. Bonato, y C. Mavroidis, «Design and control of a robotic lower extremity exoskeleton for gait rehabilitation», en *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011*, pp. 4893-4898.
- [22] M. Bortole, «Design and control of a robotic exoskeleton for gait rehabilitation», Universidad carlos III de Madrid, Madrid, 2013.
- [23] J. J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control*, 3. ed., International ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, Prentice Hall, 2005.
- [24] M. A. Shamseldin y A. A. EL-Samahy, «Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller», 2014, pp. 1-9.