



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Modelado y control de un motor de imanes permanentes aplicado a un vehículo de movilidad personal

Modelling and control of a permanent magnet motor applied to a personal mobility vehicle

Autora

María Lobato Téllez

Directores

Jesús Sergio Artal Sevil

Víctor Ballestín Bernad

Máster en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2022

Resumen

El presente documento tiene por objeto el desarrollo de diferentes algoritmos de control aplicados al sistema de tracción de un vehículo de movilidad personal.

Con el fin de justificar la aportación de este trabajo fin de máster, se realizó una investigación acerca de los avances que se han llevado a cabo en el control de vehículos eléctricos, tanto con técnicas de control difuso como con técnicas de control basadas en redes neuronales.

Debido a la dificultad de encontrar una hoja de datos en la que se especificaran todos los parámetros del motor, se realiza un diseño preliminar partiendo de las especificaciones generales del patín analizado. El modelo del sistema de tracción del patín se desarrolla usando la herramienta Matlab-Simulink y los controles que se van a analizar y comparar son los siguientes: control PI (usado como técnica de control de referencia), control *fuzzy* y control *neural*. Para los tres controles desarrollados se lleva a cabo un análisis y una comparación de la respuesta dinámica obtenida, en la que se comparan tres datos objetivos como son el tiempo de respuesta, la sobreoscilación y el error de velocidad.

ÍNDICE

Resumen	3
1. Introducción	14
2. Estado del arte	17
3. Breve descripción del vehículo de movilidad personal	20
4. Diseño preliminar de un motor síncrono de imanes permanentes trifásico	21
4.1 <i>Parámetros de la máquina</i>	22
4.1.1 Flujo máximo por el imán permanente	22
4.1.2 Resistencia	22
4.1.3 Inductancia	22
4.2 <i>Comprobación del par motor</i>	23
5. Modelado de la planta	25
5.1 <i>Segunda ley de Newton</i>	25
5.2 <i>Representación de la planta</i>	26
6. Control PI	28
6.1 <i>Representación de la respuesta ante un escalón</i>	33
6.1.1 Respuesta ante escalón positivo	34
6.1.2 Respuesta ante escalón negativo	35
7. Fuzzy control	36
7.1 <i>Resultados del control fuzzy</i>	38
7.1.1 Triángulos iguales	38
7.1.2 Triángulos centrales más pequeños	39
7.1.3 Triángulos centrales muy pequeños	39
7.2 <i>Control fuzzy con integrador</i>	41
8. Neural control	43
8.1 <i>Resultados</i>	48

9. Conclusiones	49
Anexo I Introducción al vehículo de movilidad personal	50
<i>A.I.1 Contexto histórico del vehículo de movilidad personal</i>	50
<i>A.I.2 Estudio de mercado</i>	50
Anexo II: Datasheet del patín eléctrico Smartgyro y descripción detallada de cada una de las partes del patín seleccionado	53
<i>All.1 Cuadro</i>	55
<i>All.2 Base</i>	55
<i>All.3 Batería</i>	56
<i>All.4 Ruedas</i>	56
<i>All.5 Frenos</i>	57
<i>All.6 Motor</i>	58
<i>All.7 Acelerador</i>	59
Anexo III Diseño preliminar de un PMSM trifásico	60
<i>A.III.1 Voltaje máximo por fase</i>	60
<i>A.III.2 Dimensionamiento del imán permanente (PM) y de la bobina</i>	60
<i>A.III.3 Dimensionado del tamaño de la ranura del estátor</i>	62
<i>A.III.4 Parámetros de la máquina</i>	62
A.III.4.1 Resistencia	62
A.III.4.2 Pérdidas en el cobre	63
A.III.4.3 Eficiencia	63
A.III.4.4 Inductancia	63
A.III.4.5 Número de vueltas por bobina	64
Anexo IV: Planta en Matlab	66
<i>A.IV.1 Transformada de Park o D-Q</i>	70
<i>A.IV.2 Transformada de Clarke</i>	72
<i>A.IV.3 Cálculo de la inercia del sistema</i>	76

Anexo V: Resolución del 12 de enero de 2022 de la dirección general de Tráfico por la que se aprueba el manual de características de los vehículos de movilidad personal	78
Anexo VI: Control <i>fuzzy</i>	79
<i>A.VI.1 Etapas del control difuso</i>	80
A.VI.1.1 Etapa de entrada	80
A.VI.1.2 Etapa de procesamiento (fuzzificación)	80
A.VI.1.3 Etapa de salida (defuzzificación)	81
Referencias	87

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Parámetros calculados del motor síncrono de imanes permanentes _____	23
<i>Figura 2</i> Planta del patín en Maltab (con control PI) _____	27
<i>Figura 3</i> Relación del margen de fase y la sobreoscilación [1] _____	29
<i>Figura 4</i> Relación del margen de fase y la relación de ganancias [1] _____	29
<i>Figura 5</i> Relación del margen de fase y el coeficiente ξ [1] _____	30
<i>Figura 6</i> Margen de fase cuando $K_c=1$ [1] _____	31
<i>Figura 7</i> Subida de ganancia a frecuencia de corte en bucle abierto _____	32
<i>Figura 8</i> Diagrama de Bode de la planta con el control PI _____	33
<i>Figura 9</i> Respuesta velocidad planta con el control PI _____	34
<i>Figura 10</i> Respuesta velocidad planta con control PI ante un escalón positivo _____	35
<i>Figura 11</i> Respuesta velocidad planta con control PI ante un escalón negativo _____	35
<i>Figura 12</i> Etapas del control difuso [18] _____	37
<i>Figura 13</i> Error de velocidad (izda.) e integral del error de velocidad (dcha.) del control fuzzy _____	38
<i>Figura 14</i> Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulos iguales _____	38
<i>Figura 15</i> Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulos pequeños _____	39
<i>Figura 16</i> Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulo central muy pequeño _____	40
<i>Figura 17</i> Control difuso con integrador en Matlab _____	41
<i>Figura 18</i> Control fuzzy con integrador _____	42
<i>Figura 19</i> NN predictive controller _____	44
<i>Figura 20</i> Parámetros del NN Predictive Control _____	45
<i>Figura 21</i> Plant Identification _____	45
<i>Figura 22</i> Modelo de la red entrenada. Motor de corriente continua _____	47
<i>Figura 23</i> Validación de la red neuronal _____	48
<i>Figura 24</i> Velocidad del patín con una red neuronal _____	48
<i>Figura 25</i> Hoja 1 Ficha técnica _____	53
<i>Figura 26</i> Hoja 2 Ficha técnica _____	54
<i>Figura 27</i> Mástil inferior (izda.). Unión mástil inferior con mástil superior (dcha.) _____	55

Figura 28 Base del Patín (izda). Pata de cabra (dcha.)	56
Figura 29 Batería del patín [22]	56
Figura 30 Batería del patín [22]	56
Figura 31 Rueda lisa del patín Smartgyro Speedway (izda.). Rueda todoterreno (dcha.) [23]	57
Figura 32 Freno de disco del patín Speedway (izda. y centro) Freno de tambor (dcha.) [24]	58
Figura 33 Acelerador marcado con un círculo amarillo (izda.)	59
Figura 34 Display marcando la tensión de la batería (dcha.). Display marcando la distancia total (centro). Display marcando la distancia del viaje actual (izda.)	59
Figura 35 PMSM con 6 slot y 4 polos [17]	61
Figura 36 a) Diagrama fasorial a velocidad base (control de I_q , $I_d=0$); b) Diagrama fasorial a velocidad máxima ($i_d < 0$) [17]	64
Figura 37 Velocidad consigna, velocidad final, error de velocidad	66
Figura 38 Planta en Matlab con control proporcional integral	67
Figura 39 Planta en Matlab con control fuzzy con integral	68
Figura 40 Planta en Matlab con control neural	69
Figura 41 Par, corrientes, $dq0$ to Alpha-beta-zero to abc y bloque de histéresis	70
Figura 42 Transformada de Park (izda) Transformada de Park inversa (dcha.)	71
Figura 43 Transformada de Park en Matlab	71
Figura 44 Transformada de Clarke (izda). Transformada de Clarke inversa (dcha.)	72
Figura 45 Transformada de Clarke	72
Figura 46 Esquema general del bloque de histéresis	73
Figura 47 Función de transferencia (izda) y Comparación por histéresis (dcha.)	73
Figura 48 Bloque de potencia, motor síncrono de imanes permanente y estado final de la planta	74
Figura 49 Etapa de conversión de potencia	75
Figura 50 Motor y acciones externas	76
Figura 51 Tabla momentos de inercias [29]	76
Figura 52 Método del centroide para defuzzificación usando interferencias max-min [32]	81
Figura 53 Llamada a la función Fuzzy.fis (izda.) Función de membresía del error de velocidad (dcha.)	82

<i>Figura 54 Función de membresía de la tasa de error de velocidad (izda.) Función de membresía de la acción o salida del control difuso (dcha.)</i>	82
<i>Figura 55 Programación reglas control difuso</i>	83
<i>Figura 56 Visualización reglas control difuso</i>	84
<i>Figura 57 Aplicación del método del centroide del caso estudiado</i>	85
<i>Figura 58 Método del centroide del caso estudiado</i>	85
<i>Figura 59 Visualización 3D reglas control difuso</i>	86

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Especificaciones del PMSM trifásico</i>	21
<i>Tabla 2 Momentos sobre el VMP</i>	24
<i>Tabla 3 Parámetros de diseño</i>	28
<i>Tabla 4 Respuesta del sistema variando la entrada del control fuzzy</i>	40
<i>Tabla 5 Comparativa patines eléctricos</i>	51
<i>Tabla 6 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor</i>	51
<i>Tabla 7 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor y autonomía</i>	52
<i>Tabla 8 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor, autonomía y potencia</i>	52
<i>Tabla 9 Cálculo de momentos de inercia</i>	77
<i>Tabla 10 Parámetros exigibles en los VMP de transporte personal [25]</i>	78
<i>Tabla 11 Combinación de entradas con la respuesta requerida del control difuso</i>	83

NOMENCLATURA

Abertura de la ranura del imán permanente	b_{os}
Anchura del imán permanente	τ_s
Área activa de la ranura del estátor	A_{co}
Área enfrentada a la corriente de aire	A_w
Coefficiente aerodinámico de resistencia	C_x
Constante del control proporcional	K_p
Constante del control integral	T_i
Corriente base por cada fase	I_b
Corriente para alcanzar el par máximo	$I_{q_{max}}$
Diámetro interior del estátor	D_{is}
Densidad del estátor	j_{cob}
Densidad del cobre	ρ_{co}
Densidad del cobre	j_{co}
Densidad de flujo magnético	B_r
Eficiencia a potencia	η_b
Espacio de entrehierro (aire)	g
Espesor del imán permanente	h_{pm}
Factor de corrección teorema de Steiner	$A d^2$
Factor de llenado de la ranura	k_{fill}
Factor de potencia	$\cos \varphi$
Factor marginal	k_{fringe}
Flujo máximo por el imán permanente	Ψ_{max}
Frecuencia a la velocidad base	f_b
Frecuencia de corte en bucle abierto	ω_g^{BA}

Frecuencia de corte en bucle cerrado	ω_g^{BC}
Fuerza tangencial específica	f_t
Ganancia del control PI	G
Inducción remanente de los imanes	B_{gPM}
Inductancia de acoplamiento	L_{12}
Inductancia de fuga	L_{s1}
Inductancia principal	L_m
Inercia del motor	J
Inercia del patín con el usuario montado	I
Intensidad para alcanzar el par necesario	I_d
Intervalo de imán permanente	b_{PM}
Longitud axial de la máquina	l_{stack}
Longitud de giro	l_{turn}
Momento de inercia	I_0
Número de vueltas por bobina	n_c
Velocidad base	N_b
Velocidad lineal máxima	V_{linmax}
Velocidad máxima	N_{max}
Voltaje a velocidad máxima	V_s
Par a velocidad máxima	P_{max}/N_{max}
Par base	P_b/N_b
Par base del motor	T_{eb}
Número de pares de polos	p
Par motor del patín eléctrico	$T^*(s)$
Par motor	M_{motor}

Par de resistencia aerodinámica	M_{aerod}
Par de resistencia a la rodadura	M_{rod}
Par de resistencia debido a la pendiente	M_{pend}
Paso de ranura del estátor	τ
Pérdidas de cobre para el par base	P_{cob}
Permeabilidad magnética del cobre en el vacío	μ_0
Potencia aparente	S_n
Potencia base	P_b
Potencia máxima	P_{max}
Potencia máxima requerida	Te_{max}
Relación D_{is} y l_{stack}	λ
Resistencia	R_s
Tensión alimentación batería	V_{dc}
Tensión máxima por fase	V_{ph}
Tiempo de respuesta	t_r

1. Introducción

El impacto negativo del ser humano sobre los ecosistemas se ha acentuado en los últimos años, teniendo en cuenta que la población crece de forma exponencial. Es por ello por lo que, ahora más que nunca, debe apostarse por tecnologías que sean respetuosas con el medio ambiente. En esta apuesta por las energías renovables surge el *boom* de los vehículos de movilidad personal (VMP), los cuales pueden tener un papel fundamental en el objetivo de reducir las emisiones de dióxido de carbono y de otros gases que contribuyen a aumentar la temperatura del planeta.

El uso de los VMP para moverse por la ciudad es una forma de transporte rápida y respetuosa con el medio ambiente, es por eso que decidí comprar uno en octubre de 2021. A raíz de esta compra, surgió la idea de realizar este trabajo fin de máster acerca del modelado y control de un motor de imanes permanentes aplicado a un VMP. Concretamente, el objeto de este trabajo fin de máster es el desarrollo de diferentes algoritmos de control aplicados al sistema de tracción de un VMP.

El alcance del siguiente trabajo fin de máster comienza por el diseño preliminar partiendo de las especificaciones generales de un patín eléctrico, hasta el posterior desarrollo de diferentes algoritmos de control aplicados al sistema de tracción de un vehículo de movilidad personal. De este modo se desarrolla el modelado del sistema de tracción mediante Matlab-Simulink aplicando un control PI simple como técnica de control de referencia. Asimismo, se lleva a cabo una comparación del modelo de control básico con otras técnicas de control avanzado, como podrían ser Fuzzy Control y Neural Network, analizando la respuesta dinámica del sistema.

En el capítulo 2 se realiza una investigación acerca de los avances que se han llevado a cabo en el control de vehículos eléctricos, tanto con técnicas de control difuso como con técnicas de control basadas en redes neuronales. En este capítulo también se expone cuál es la aportación de este trabajo al ámbito del control de vehículos eléctricos.

En el capítulo 3 se realiza una descripción del modelo estudiado, en el que se describen las diferentes partes del patín y se realiza un cálculo de la inercia total del patín con el usuario.

En capítulo 4 se explica que, debido a la dificultad de encontrar una hoja de datos en la que se especificaran todos los parámetros necesarios para caracterizar el motor, se decidió hacer un diseño preliminar partiendo de las especificaciones que tiene el patín.

Por otro lado, también en este capítulo se calcula el par resistente teniendo en cuenta el conductor del patín, para así poder caracterizar la dinámica del motor de la forma más parecida a la realidad.

En el capítulo 5 el objetivo es realizar una breve descripción del modelo de Matlab. Para la realización del trabajo, se desarrolla el modelado del sistema de tracción de un vehículo de movilidad personal mediante Matlab y Simulink.

En el capítulo 6 se realiza el control de la planta mediante el control proporcional integral. Este control es el que se usa como técnica de control de referencia y se comparará con otras técnicas de control avanzado que se realizar en los siguientes apartados.

En el capítulo 7 se realiza el control de la planta mediante el método de control difuso (*fuzzy control*) y se analiza la respuesta dinámica de la planta.

En el capítulo 8 también se analiza la respuesta dinámica de la planta cuando se realiza el control de la planta mediante una red neuronal.

De los tres controles usados, se muestra cómo reacciona la planta ante un escalón positivo en el que se pida más par (por ejemplo, cuando el usuario del VMP intenta adelantar a otro usuario del VMP) y ante un escalón negativo en el que se pide menos par (por ejemplo, cuando te dispones a bajar una cuesta, el motor tiene que disminuir el par para mantener la velocidad).

Para completar la memoria, se han elaborado VI anexos complementarios a esta, en los cuales se explica de una forma más amplia contenidos que previamente se explican en la memoria.

En el anexo I se realiza una introducción a los vehículos de movilidad personal, aportando unas pinceladas de su historia y de por qué pasaron de ser unos vehículos con poca aplicación a tener un gran recorrido. Además, aparece una tabla comparativa de los parámetros analizados a la hora de la elección del patín eléctrico.

En el anexo II se adjunta el *datasheet* del patín eléctrico Smartgyro, en el que aparecen datos como la potencia, capacidad de la batería, dimensiones de las ruedas, etc. Además, también aparece una descripción detallada de cada una de las partes del patín seleccionado.

En el anexo III se calculan los parámetros del diseño preliminar realizado de un *permanant magnet synchronous motor* (PMSM) trifásico, en el que se incluyen las fórmulas y la explicación de cómo se han obtenido los parámetros del motor, partiendo de las especificaciones de potencia del motor, velocidad angular, tensión de alimentación y número de pares de polos. Además, se realiza la comprobación del par motor, en la que se demuestra que el par motor es superior al par de las fuerzas resistivas que actúan sobre el patín eléctrico.

En el anexo IV se hace una descripción de cómo se ha realizado el diseño de la planta en Matlab, explicando cada uno de los bloques que se usan en este diseño. Se incluye también una explicación detallada de las transformadas de Park y de Clarke. En este anexo se explica cómo se ha realizado la caracterización de los parámetros de diseño del controlador proporcional-integral partiendo de unos parámetros que se han definido por diseño, los cuales son el margen de fase de 40° y el tiempo de respuesta de 3 segundos.

En el anexo V se incluye una referencia al BOE del 21 de enero de 2022 por el cual se fijan las aprueba el manual de características de los vehículos de movilidad personal.

En el Anexo VI: Control *fuzzy* se realiza una explicación detallada del control *fuzzy* (o difuso), en el que se explica en qué consiste este control, así como qué es la lógica difusa, y las ventajas y desventajas que tiene su aplicación en los sistemas. Además, se incluye una explicación de cómo se ha realizado este control en Matlab, incluyendo imágenes del modelado y la lógica difusa que se ha usado.

2. Estado del arte

En este capítulo se hace un resumen de las investigaciones más relevantes que se han encontrado acerca de los controles avanzados aplicados en este trabajo (control *fuzzy* y red neuronal). Los *papers* seleccionados tienen como tema común el control de vehículos eléctricos mediante métodos avanzados de control, pero no se ha encontrado ninguna investigación que trate sobre el control de un patín eléctrico mediante las técnicas de control citadas, por lo que la aportación de este trabajo es el uso de técnicas de control avanzadas para el control de un patín eléctrico.

Los investigadores Z. Abidin, T. H. Soesilo y R. Ambarwati [2] estudiaron la posibilidad de controlar el **controlador electrónico de carga** (ESC: *electric speed controller*) a través de un **control fuzzy** y que además posee células de carga. El objetivo era controlar (mediante un control *fuzzy*) la velocidad del monopatín en función del peso. Comprobaron que el controlador electrónico de carga podía funcionar de forma precisa, obteniendo valores de velocidad y frenado dependientes de la entrada de los sensores de la celda de carga delantera y trasera. En los valores obtenidos mediante el control difuso no se apreciaba un cambio repentino de velocidad, obteniendo un tiempo de aceleración de 22,55 segundos (mediante el PWM fue de 6,877 s) y un tiempo de frenado de 9,863 segundos (mediante el PWM fue de 5,832 s). Estos resultados eran más seguros para el usuario, ya que la frenada y la aceleración eran más lentas.

Los integrantes del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Taiwan (Chih-Hong Lin, Po-Hwa Chiang y Chi-Shin Tseng) [3] investigaron acerca de la implementación de un novedoso enfoque para el control de aprendizaje para la **reducción de la ondulación del par de torsión de un motor síncrono de imanes permanentes** (PMSM) de un *scooter* eléctrico, utilizando para ello una **red neuronal difusa recurrente híbrida** (HRFNN). Para reducir la ondulación, se implementó una red neuronal difusa recurrente híbrida (HRFNN) que combinaba el control de supervisión, RFNN y un control compensado.

Los investigadores Lv, De-gang & Zhang, Zheng-yang & Bian, Wen-yue, de la Universidad Tecnológica de Harbin [4], implementaron un control **PID difuso** en un **motor de corriente continua sin escobillas**, que tradicionalmente se había controlado con un control PID, debido a la sencillez del algoritmo de control, seguro y de fácil implantación. Sin embargo, el control PID convencional no puede adaptarse a condiciones de trabajo adversas y es difícil de controlar con alta precisión, es por ello

que implementaron este control con el objetivo de **ajustar los parámetros del PID en tiempo real**. De esta forma se quería mejorar la precisión del control y la estabilidad del sistema (lo que implica un funcionamiento más estable y fiable). Los datos que se obtuvieron mostraban que, efectivamente, el control PID difuso puede ajustar los parámetros en tiempo real, reducir el exceso de velocidad de rotación del motor, y mejorar el rendimiento y la precisión del control.

La estrategia de control de par directo que se ha usado tradicionalmente en los motores síncronos de imanes permanentes presenta grandes variaciones del par electromagnético y de los enlaces de flujo. Además, el inversor tiene una frecuencia de conmutación variable. Con el fin de reducir estos parámetros, los investigadores de Shenyang propusieron varios métodos, pero todos ellos coincidían en su complicada implementación [5]. En sus investigaciones, implementaron un **control difuso de torque**, obteniendo resultados experimentales positivos, ya que consiguieron reducir en gran medida tanto el enlace de flujo como el par electromagnético. También consiguieron una respuesta dinámica del sistema rápida y mantener la frecuencia de conmutación del inversor constante.

Los investigadores de la universidad de Bani Waleed [6] usaron dos tipos de controles avanzados como son el control de **red neuronal y el control PID difuso (fuzzy)** para mejorar la estabilidad de un motor eléctrico de 14 grados de libertad cuyos parámetros físicos eran conocidos inicialmente. Los resultados de la investigación muestran que el manejo y la estabilidad del vehículo eran mejores usando esos controles. Además, los resultados obtenidos en la simulación muestran que mediante el control PID difuso la tasa de *yaw* (guiñada) es óptima que cuando se usa un control de red neuronal.

Los investigadores de la Universidad de Beijing [7] diseñaron una estrategia de **control difuso** basada en una distribución razonable del par demandado por el motor de un vehículo "híbrido paralelo". Teniendo en cuenta la economía de combustible y las emisiones como un objetivo múltiple, se realiza un control difuso optimizado con un algoritmo genético. Se usa una función de membresía avalada por la experiencia de otros investigadores y, como no se puede garantizar un control óptimo, se usa un algoritmo genético. Los resultados obtenidos son muy favorables, consiguiendo una reducción de un 1,67 % de consumo de combustible, una reducción de un 1,45 % de emisión de hidrocarburos, una reducción de un 0,62 % de emisión de CO y una reducción de un 5,06 % de emisión de NOx.

Los investigadores de la universidad de BML Munja [8], en la India, propusieron un controlador de entrada múltiple (dual) y un modelo robusto de control de velocidad del vehículo eléctrico. El motor proporciona potencia adicional combinada con un mayor rendimiento del motor. Mediante un **controlador difuso de entrada múltiple** se obtuvieron unos resultados de estabilidad más amplios con respecto a la estabilidad obtenida mediante el controlador difuso de entrada única. Además, se obtuvieron resultados mejores de la velocidad del rotor y la corriente del estátor. En cambio, el par electromagnético se mantuvo constante.

Los investigadores de la Escuela de Ingeniería de Beijing [9] propusieron un **controlador difuso híbrido** para el sistema de control de un vehículo eléctrico, ya que un controlador difuso carece de capacidad de autoaprendizaje, a diferencia del propuesto. Demostraron que un control difuso de dos términos (**PI+PD**) puede lograr un rendimiento similar al de un controlador difuso de tres términos y además tener menos carga computacional. El controlador difuso híbrido del vehículo eléctrico obtuvo unos resultados excelentes de aceleración y de velocidad de crucero.

Los investigadores de la Universidad de Berlín [10] mostraron en dos simulaciones la efectividad de un **controlador PID neuronal** único basado en ganancia de autoajuste difuso. Este control combina una red neuronal RBF (*radial basis function*) de identificador con un controlador PID simple de neuronas. Concluyeron que el control adaptativo estudiado tenía un control más efectivo sobre objetos no lineales y con retardo de tiempo menor que el control PID tradicional. Demostraron que este control tenía un excelente rendimiento y precisión.

Los investigadores de la universidad de los Andes [11] propusieron un esquema de **autoajuste del control PID utilizando redes neuronales**. El esquema de autoajuste que propusieron se puede usar para controlar sistemas que presentan variaciones de parámetros y sistemas no lineales con dinámica lenta. Esto es debido a que el esquema presentado era muy simple de aplicar.

3. Breve descripción del vehículo de movilidad personal

En este capítulo se va a hacer una breve descripción del vehículo estudiado en este trabajo. En el anexo I se explica de forma resumida la historia de los patines y cómo han pasado a ser unos vehículos tan populares.

El patín analizado es de la marca Smartgyro y el modelo es el Xtreme Speedway. En el anexo II se pueden ver las características principales del patín y la descripción detallada de cada una de las partes del modelo seleccionado.

A continuación, se explican de forma concisa las partes de un patín eléctrico y las soluciones constructivas que se han tomado para la fabricación de este.

- Cuadro: está formado por la unión de un mástil a la base (donde se acoplan las dos ruedas). El mástil está compuesto por dos partes, el mástil inferior y el mástil superior. El material usado para la fabricación del mástil es el aluminio.
- Base: es la parte del patín donde el usuario de este se sube y puede apoyar los pies para una conducción cómoda. Tiene una longitud de 55 cm y un ancho de 23 cm.
- Batería: está fabricada con la tecnología de ion-litio, esta es sin duda la tecnología que mejores prestaciones ofrece (muy superiores a las baterías con tecnología de gel y las de plomo). Estas baterías se emplean en patines de gama media-alta debido a su alto coste asociado. La batería que lleva incorporada el patín es de 13 Ah y de 48 V.
- Ruedas: las dimensiones suelen estar entre siete y diez pulgadas, siendo este último valor el diámetro del patín analizado.
- Frenos: se pueden encontrar dos tipos, frenos de tambor y frenos de disco (son los más seguros y los que se encuentran en el patín seleccionado).
- Motor: las potencias pueden variar desde los 250-300 W (gama baja) hasta los 1000 W (gama alta). Los motores eléctricos se pueden clasificar en dos tipos: motores con escobilla (*brushed*) y motores sin escobilla (*brushless*). El motor que se estudia en este trabajo es un motor síncrono de imanes permanentes (*brushless*) y de una potencia de 800 W.
- Acelerador: el acelerador es un elemento de control de potencia (cuanto más se pulse, mayor potencia se está requiriendo al motor). El acelerador es un variador de frecuencia electrónico.

4. Diseño preliminar de un motor síncrono de imanes permanentes trifásico

Debido a la dificultad de encontrar una hoja de datos en la que se especificaran todos los parámetros necesarios para caracterizar el motor, se ha realizado el diseño preliminar partiendo de las especificaciones técnicas que se han obtenido de la hoja de datos del patín eléctrico.

En este capítulo se van a calcular los parámetros de un motor síncrono de imanes permanentes reproduciendo el método propuesto en [12]. Se va a realizar la explicación del cálculo del flujo máximo por el imán permanente, la resistencia y la inductancia, ya que son los parámetros que se van a incluir en Matlab. El cálculo del resto de los parámetros que se han obtenido se adjuntan en el anexo III.

Para realizar el diseño preliminar se debe partir de unas especificaciones generales, que son las que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1 Especificaciones del PMSM trifásico

Descripción	Nomenclatura (Unidades)	Dato
Potencia base	P_b (W)	800
Velocidad base	N_b (rpm)	2100
Par base	P_b/N_b	3,638
Potencia máxima	P_{max} (W)	800
Velocidad máxima	N_{max} (rpm)	3500
Par a velocidad máxima	P_{max}/N_{max}	2,183
Tensión alimentación batería	V_{dc} (V)	48
Pares de polos	p	4

Las especificaciones de potencia base y potencia máxima que se adjuntan se han obtenido de la hoja de características del patín [22]. El número de pares de polos se ha elegido como 4 pares de polos. La velocidad base se ha calculado a partir de la velocidad máxima admisible por normativa (

Anexo V: Resolución del 12 de enero de 2022 de la dirección general de Tráfico por la que se aprueba el manual de características de los vehículos de movilidad personal), que es de 25 km/h, mediante la Ecuación (1) expresada en revoluciones por minuto.

$$N_b = v \frac{p}{r} \frac{60}{2\pi} = 25 \frac{1000}{3600} \frac{4}{0,125} \frac{60}{2\pi} \rightarrow N_b = 2100 \text{ rpm} \quad (1)$$

La velocidad máxima se ha calculado usando la velocidad máxima que alcanza el VMP cuando va montado un usuario encima, y esta es de 42 km/h.

4.1 Parámetros de la máquina

A continuación se van a mostrar como se han obtenido los parámetros fundamentales que se han introducido en Matlab para determinar el motor. El resto de parámetros se realiza el cálculo en el anexo III, donde se incluye una explicación más detallada de como se han obtenido estos parámetros.

4.1.1 Flujo máximo por el imán permanente

El flujo máximo por el imán permanente se calcula mediante (2):

$$\Psi_{max} = B_{gPM} b_{PM} l_{stack} 2n_c \rightarrow \Psi_{max} = \mathbf{0,03216 \text{ Wb}} \quad (2)$$

4.1.2 Resistencia

La resistencia se calcula mediante (3):

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_{turn} 2 n_c^2}{(n_c l_b / j_{co})} \rightarrow R_s = \mathbf{0,0638 \Omega} \quad (3)$$

4.1.3 Inductancia

La inductancia de fase comprende la inductancia principal (L_m), la inductancia de fuga (L_{s1}) y la inductancia de acoplamiento (L_{12}) y se calcula de acuerdo con (4):

$$L_m = 2 n_c^2 \mu_0 \frac{\tau_s - b_{os}}{h_{pm} + g} l_{stack} = 1,861 \cdot 10^{-6} \cdot n_c^2 \rightarrow L_m = \mathbf{3,647 \cdot 10^{-4} \text{ H}} \quad (4)$$

En la Figura 1 se muestra una imagen con los parámetros calculados del motor síncrono de imanes permanentes que se ha usado:

Block Parameters: Permanent Magnet Synchronous Machine

Permanent Magnet Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase or a five-phase permanent magnet synchronous machine. The stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

The three-phase machine can have sinusoidal or trapezoidal back EMF waveform. The rotor can be round or salient-pole for the sinusoidal machine, it is round when the machine is trapezoidal. Preset models are available for the Sinusoidal back EMF machine.

The five-phase machine has a sinusoidal back EMF waveform and round rotor. Preset models are not available for this type of machine.

Configuration Parameters Advanced

Stator phase resistance Rs (ohm):
0.0638

Armature inductance (H):
3.647e-4

Machine constant
Specify: Flux linkage established by magnets (Vs)
Flux linkage: 0.03216

Inertia, viscous damping, pole pairs, static friction [J(kg.m²) F(N.m.s) p() Tf(N.m)]:
[0.03125 0 4 0]

Initial conditions [wm(rad/s) thetam(deg) ia,ib(A)]:
[0,0, 0,0]

Figura 1 Parámetros calculados del motor síncrono de imanes permanentes

4.2 Comprobación del par motor

Para que se produzca el movimiento del patín, el par motor tiene que ser superior al par de las fuerzas resistentes (5).

$$M_{motor} - M_{aerod} - M_{rod} - M_{pend} > 0 \quad (5)$$

Siendo:

$$M_{aerod} = \frac{1}{2} \rho C_x A_w v^2 r = \frac{1}{2} 1,29 \cdot 0,2 \cdot (0,4 \cdot 1,68) \cdot (25 \cdot \frac{1000}{3600})^2 \cdot 0,127 \quad (6)$$

$$M_{rod} = \mu N g r = 0,4 \cdot (58 + 22) \cdot \frac{9,81}{2} \quad (7)$$

$$M_{pend} = m g \sin \alpha = (58 + 22) \cdot 9,81 \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Sustituyendo todos los valores en la ecuación inicial se puede comprobar que el par motor es superior al par de las fuerzas resistentes.

En la Tabla 2 se incluyen los valores obtenidos cuando la inclinación es de 0°.

Tabla 2 Momentos sobre el VMP

Momento de resistencia aerodinámica	
Densidad aire (kg/m ³)	1,29
Superficie frontal (m ²)	0,672
Coefficiente de resistencia aerodinámica	0,2
Velocidad (25 km/h -> m/s)	6,944
Faerodin (N)	4,18
Maerodin (N.m)	2,92
Momento de resistencia a la rodadura	
Coefficiente de rodadura	0,03
Normal (mg + peso patin)	392,4
Gravedad (m/s ²)	9,81
Fuerza resistencia a la rodadura (N)	11,772
Momento resistencia a la rodadura (N.m)	1,495

Momento resistencia a la pendiente	
Masa (kg)	80
Gravedad (m/s ²)	9,81
Angulo	0
Seno del ángulo	0
coseno del ángulo	1
Fuerza pendiente eje x (N)	0
Momento pendiente eje x (N.m)	0
Fuerza pendiente eje y (N)	784,8
Momento pendiente eje y (N.m)	156,96

Los resultados numéricos obtenidos sustituyendo los valores en la ecuación (5):

$$3,63 - (2,93 + 2,98 - 156,96) > 0$$

La pendiente máxima que se consigue subir es de 16,3° lo que corresponde al 36,22 %.

5. Modelado de la planta

Para modelar la planta se necesita aplicar la segunda ley de Newton. Seguidamente se aplicará la transformada de Laplace para convertir la dependencia del tiempo en dependencia de frecuencia y así poder obtener la función de transferencia de la planta. Después se aplicarán las siguientes técnicas de control para analizar cómo se comporta la planta ante diferentes sollicitaciones (escalón negativo y escalón positivo):

- Control PI
- *Fuzzy* control
- *Neural network* control

El objetivo es realizar un control de velocidad mediante varios métodos de control y comparar cuál es el que da una mejor respuesta dinámica atendiendo a criterios objetivos como son el tiempo de respuesta, la sobreoscilación y el error de velocidad.

5.1 Segunda ley de Newton

Para calcular la función de transferencia de la planta se aplica la segunda ley de Newton siendo I la inercia del cuerpo (9):

$$\sum M = (I + J) \vartheta \quad (9)$$

De cuya aplicación al patín resulta la ecuación (10):

$$T^* - M_{aerod} - M_{rod} - M_{pend} = (I + J) \vartheta \quad (10)$$

Siendo los parámetros indicados los que se han explicado previamente en el capítulo 4.2 Comprobación del par motor. El objetivo es calcular la función de transferencia de la planta, y esto se realiza de la siguiente forma:

- M_{aerod} : el momento de resistencia aerodinámica se puede despreciar debido a que el término de C_x es muy pequeño, por lo que se puede despreciar su efecto sobre el patín.
- M_{rod} : para calcular la función de transferencia, se tiene que igualar a 0 el valor de la perturbación de valor constante.

A continuación, se consideran estos pares resistentes nulos con el objetivo de calcular la función de transferencia únicamente respecto al par motor, obteniéndose la ecuación (11). Los partes resistentes actúan como una perturbación o una segunda entrada a efectos del control.

$$T^* = (I + J) \frac{dw}{dt} \quad (11)$$

A continuación, se va a aplicar la transformada de Laplace para convertir la dependencia del tiempo en dependencia de frecuencia (12):

$$T^*(s) - J w(s) = I w(s) \quad (12)$$

Despejando la ecuación anterior, se obtiene la función de transferencia de la planta (13):

$$G(s) = \frac{T^*(s)}{w(s)} = \frac{1}{(I + J) s} \quad (13)$$

Siendo I la inercia del patín más la persona que va encima (se ha considerado mi inercia), J la inercia del rotor y T^* el par motor. La inercia se ha calculado de forma más detallada en el A.IV.3 Cálculo de la inercia del sistema

5.2 Representación de la planta

En la Figura 2 se muestra la planta completa, en la que se pueden ver los bloques usados, los cuales en el anexo IV se van a detallar de forma más completa.

Como se puede ver, la velocidad consigna que se ha fijado es de 25 km/h que es la velocidad máxima a la que pueden ir los vehículos de movilidad personal. En el anexo V se va a hacer referencia al BOE del Viernes 21 de enero en el que se aprobaron las características del vehículo de movilidad personal.

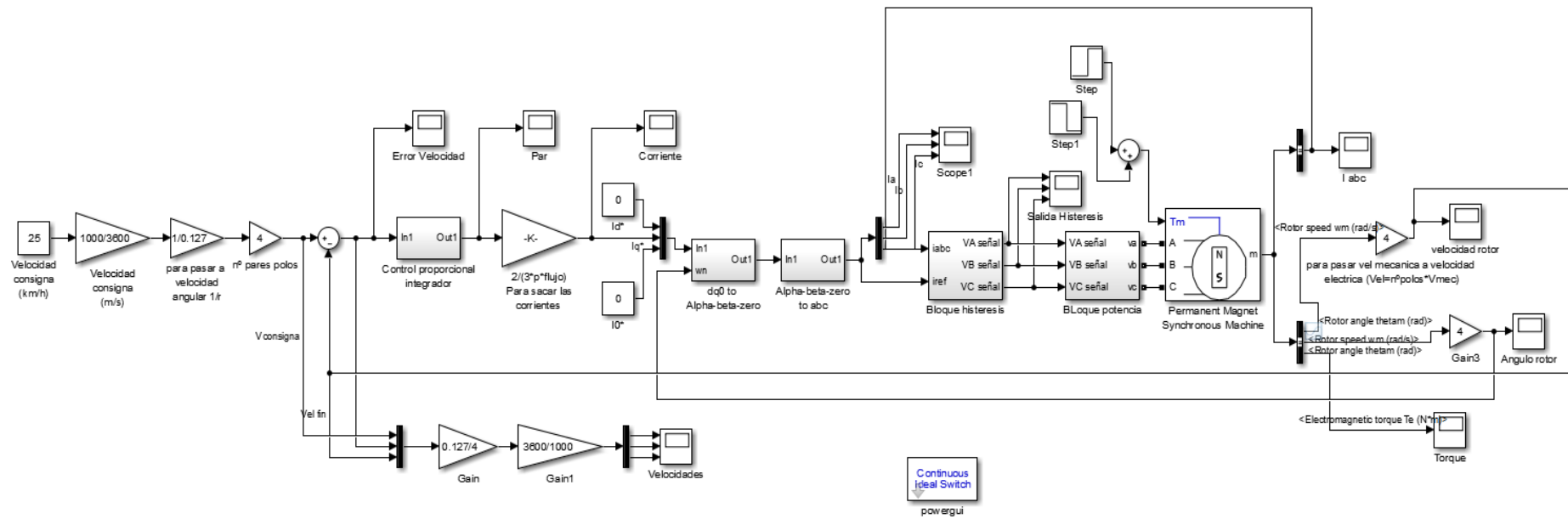


Figura 2 Planta del patín en Maltab (con control PI)

6. Control PI

Tal y como se explica en [1], el controlador proporcional integral (PI) tiene como característica principal que se obtiene un error de velocidad nulo. Esto es debido a que el control integral coloca un polo en el origen.

La función de transferencia del control PI es la siguiente (14).

$$PI = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K_p T_i s + K_p}{T_i s} \quad (14)$$

Para calcular los valores de K_p (constante del control proporcional) y T_i (constante del control integral) se han definido unas condiciones de respuesta de la planta que son las que aparecen en la Tabla 3. También partiendo de esas condiciones se obtienen los valores de sobreoscilación, relación de frecuencias de corte y ξ .

Tabla 3 Parámetros de diseño

Sobreoscilación	28 %
Tiempo de respuesta	3 segundos

Los parámetros K_p y T_i son los parámetros obtenidos en el diseño del controlador proporcional e integral, respectivamente. A continuación, se explica detalladamente cómo se han obtenido estos parámetros.

Se toma como hipótesis que la sobreoscilación máxima admisible del sistema es del 28 % por similitud a otros sistemas de características similares. Para que cumpla con ese criterio de diseño, eso implica que el margen de fase de la planta con el controlador tenga un margen de fase mínimo de 40°. En la Figura 3 que se muestra a continuación se puede ver la relación existente entre el margen de fase y la sobreoscilación [1].

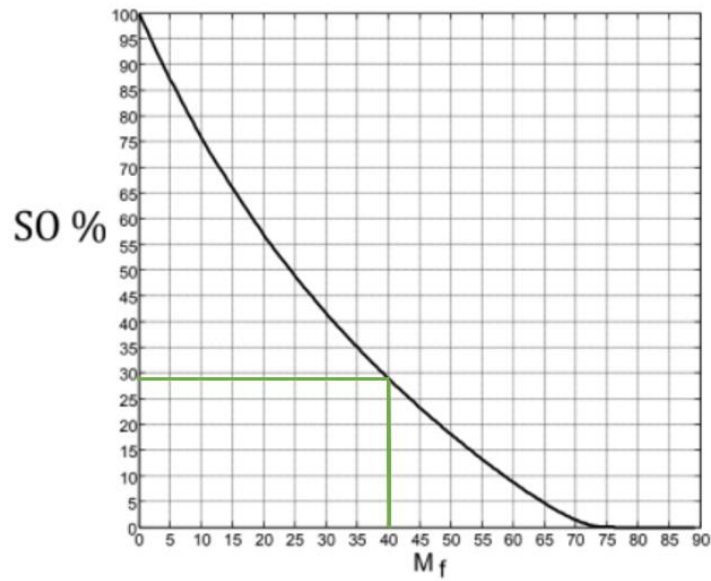


Figura 3 Relación del margen de fase y la sobreoscilación [1]

Con el margen de fase del sistema, se puede obtener la relación de ganancia del sistema en bucle abierto y en bucle cerrado. Esta relación se muestra en la Figura 4.

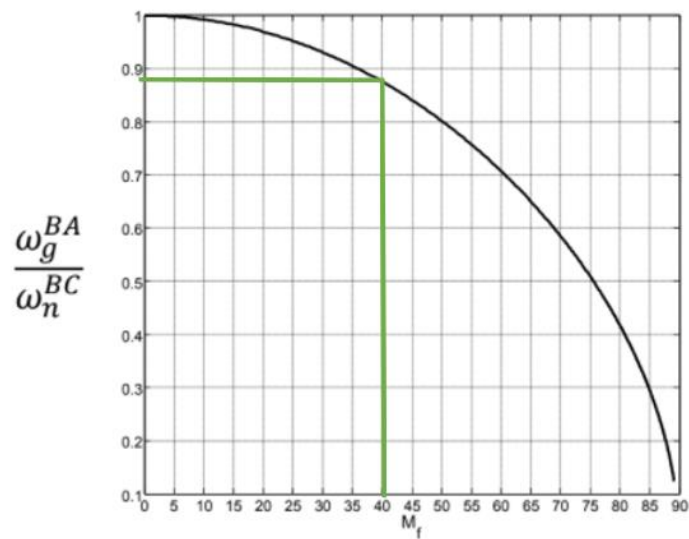


Figura 4 Relación del margen de fase y la relación de ganancias [1]

De la gráfica, se puede obtener que el valor de esta relación de ganancias es de 0,88 mediante (15).

$$\frac{\omega_g^{BA}}{\omega_n^{BC}} = 0,88 \quad (15)$$

Otro dato que se tiene que definir es el tiempo de respuesta del sistema. Para ello se ha decidido que el tiempo de respuesta de sistema es de 3 segundos.

Para determinar la ganancia en bucle cerrado se necesita también el coeficiente ξ que se obtiene también con el margen de fase mediante la Figura 5.

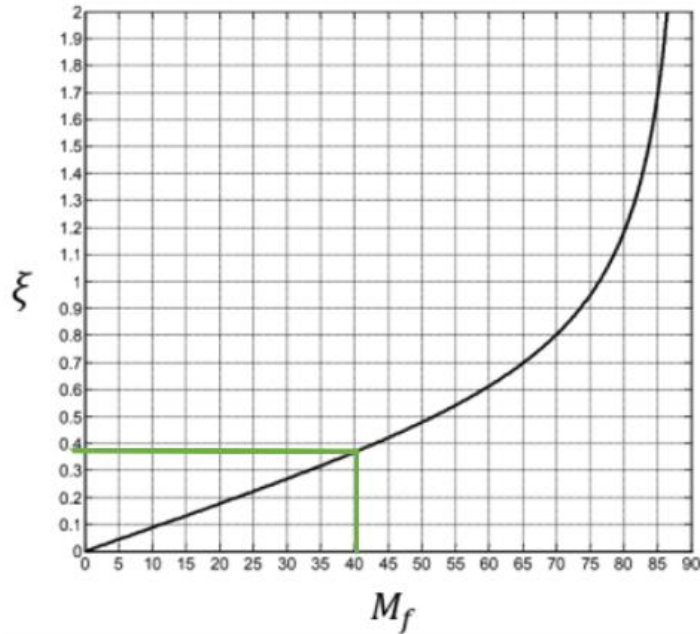


Figura 5 Relación del margen de fase y el coeficiente ξ [1]

Gracias a ello, se puede determinar la ganancia del sistema en bucle cerrado, que se deduce de la ecuación del tiempo de respuesta (16) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$\xi < 1 \text{ (polos complejos)} \rightarrow t_r = \frac{\pi}{\sigma} = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{\omega_g^{BC} \cdot \xi} \quad (16)$$

$$\omega_g^{BC} = \frac{3}{t_r \cdot \xi} = \frac{3}{3 \cdot 0,37} \rightarrow \omega_g^{BC} = 2,7027 \text{ s}^{-1}$$

Una vez calculada la ganancia en bucle cerrado, se puede calcular la frecuencia de corte en bucle abierto mediante la ecuación (15).

$$\frac{\omega_g^{BA}}{\omega_g^{BC}} = 0,88 \rightarrow \omega_g^{BA} = 0,88 \cdot \omega_g^{BC} = 0,88 \cdot 2,7027 \rightarrow \omega_g^{BA} = 2,378 \text{ s}^{-1}$$

Para obtener el valor de T_i , se coloca en la siguiente gráfica ($K_c=1$) la frecuencia de corte en bucle abierto ($\omega_g^{BA} = 2,378$) y se obtiene que el margen de fase será de 40° , ya que mediante el integrador y a esa frecuencia se baja el margen de fase 30° . Esto se puede ver en la Figura 6.

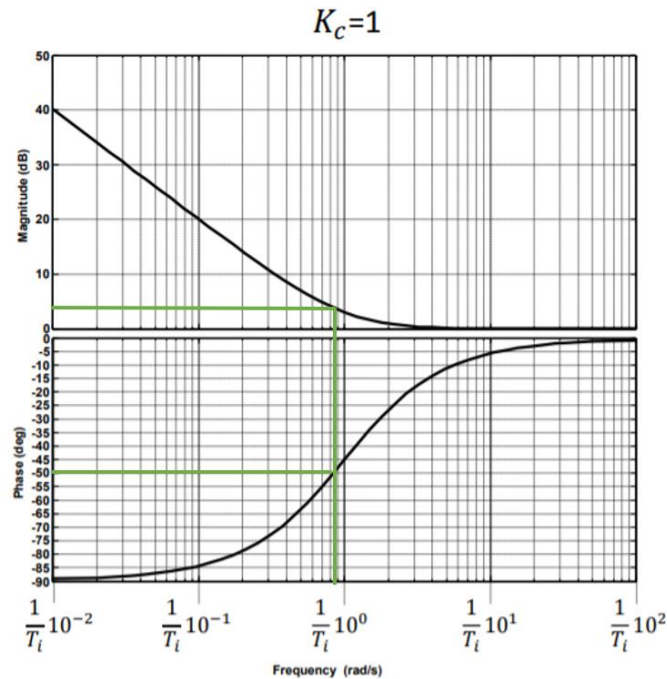


Figura 6 Margen de fase cuando $K_c=1$ [1]

Mediante esta forma, se obtiene el valor de la constante del control integral (17):

$$\frac{1}{T_i} \cdot 10^0 = \omega_g^{BA} \rightarrow T_i = \frac{1}{\omega_g^{BA}} = \frac{1}{2,378} \rightarrow T_i = 0,4205 \text{ s} \quad (17)$$

Hay que tener en cuenta que, a esa frecuencia de corte dada para bajar el margen de fase, sube la ganancia, que en este caso se va a considerar prácticamente despreciable.

Para determinar la constante del control proporcional, hay que determinar cuánto tiene que bajar la ganancia en la frecuencia de corte del bucle abierto para ello, se representa el bode de la planta en bucle abierto:

Se quiere que, a la frecuencia de bucle abierto, ω_g^{BA} , sea justo donde la magnitud de ganancia sea 0. Para ello, hay que subir 43,2 dB la ganancia en ese punto, esta ganancia se puede observar en la Figura 7 Subida de ganancia a frecuencia de corte en bucle abierto.

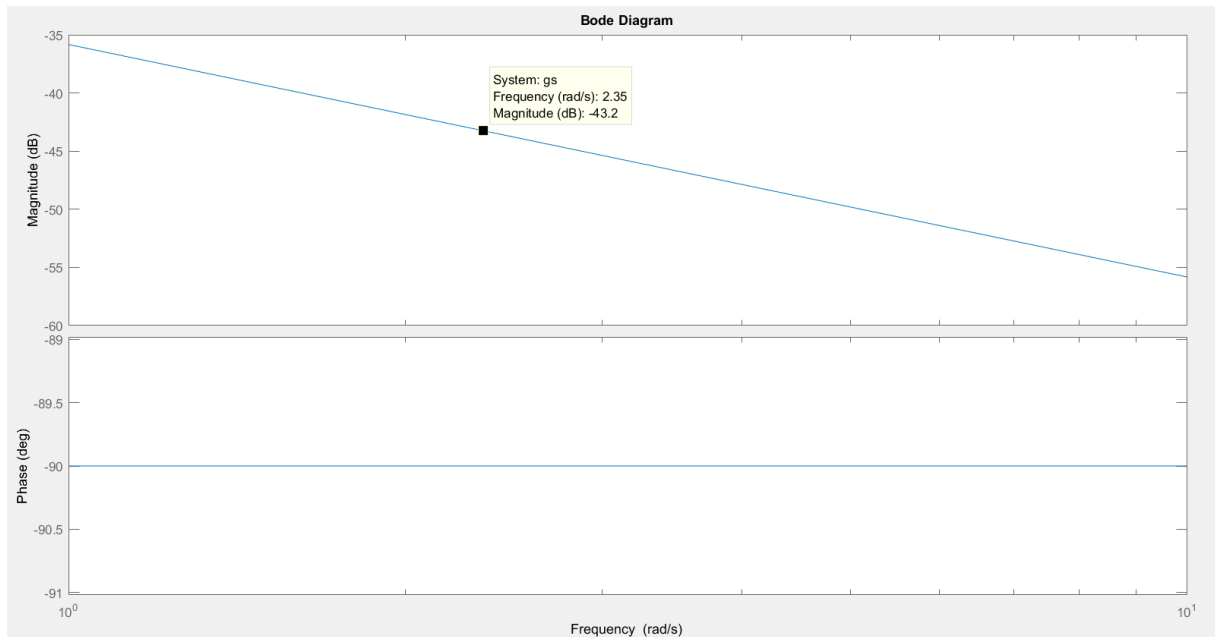


Figura 7 Subida de ganancia a frecuencia de corte en bucle abierto

Es decir, a la frecuencia de corte de 2,37 en bucle abierto hay que subir la ganancia 43,2 dB, por lo que el valor del proporcional será el valor que haga que suba a esa frecuencia dada el valor de la ganancia 43,2 dB.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, al tener el integrador, a la frecuencia de corte dada para que el margen de fase sea de grados, hace que suba la ganancia del sistema 5 grados. Por lo tanto, solo habría que subir la ganancia 43,2-5 grados, es decir 38,2.

El cálculo se hace teniendo en cuenta que el integrador hace que la rampa de bajada sea de -20 dB/dec. Este cálculo de la ganancia se calcula mediante (18).

$$G = -20 \cdot \log(K_p); K_p = 10^{\frac{G}{20}} = 10^{\frac{38,2}{20}} \rightarrow K_p = 81 \text{ dec} \quad (18)$$

Es decir, el controlador proporcional integrador va a tener los siguientes valores K_p y T_i :

- $T_i = 0,4205 \text{ s}$
- $K_p = 81 \text{ dec}$

A continuación, se representa el diagrama de Bode con el control PI en la Figura 8, donde se puede comprobar que el margen de fase es de 40,3 grados, tal como se había fijado en unas condiciones iniciales. El diagrama de Bode representado es el de

la planta con el control PI, el cual se obtiene multiplicando la ecuación (14) con la ecuación (15) y sustituyendo los valores del control proporcional (18) y del control integral (17) se obtiene la ecuación (19).

$$G(s)_{PI} = \frac{K_p T_i s + K_p}{T_i s} \frac{1}{(I + J) s} = \frac{34,06s + 81}{0,42s} \frac{1}{(I + J) s} = \frac{34,06s + 81}{0,42s^2 I + 0,42s^2 J} \quad (19)$$

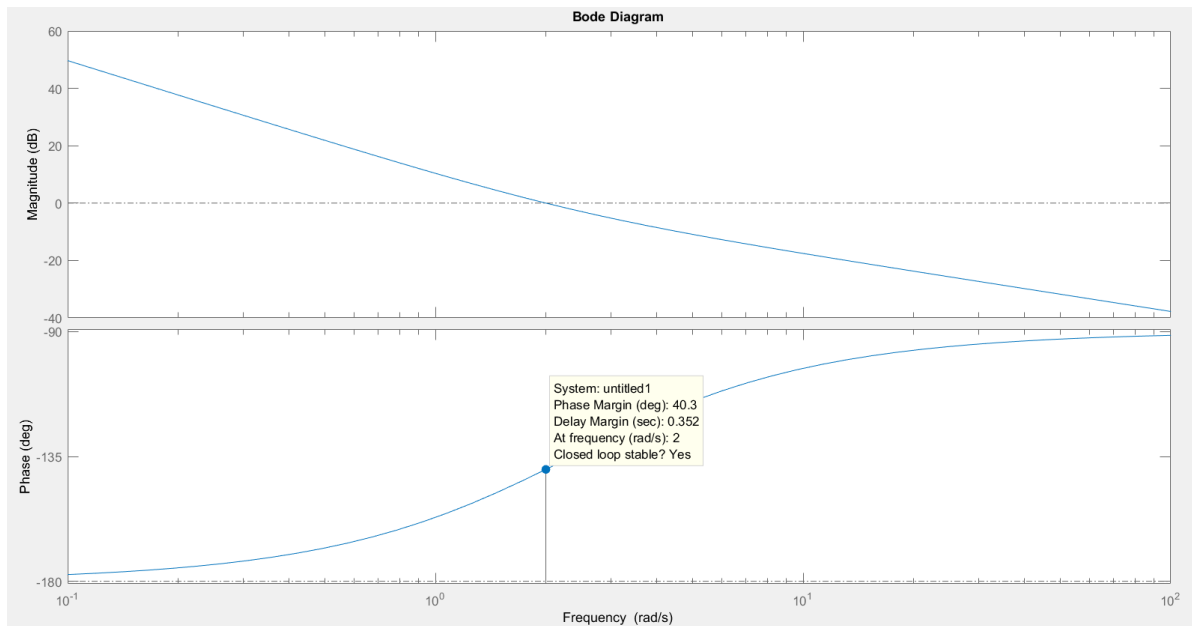


Figura 8 Diagrama de Bode de la planta con el control PI

6.1 Representación de la respuesta ante un escalón

En la Figura 9 aparece la respuesta general de la planta, donde se representa la respuesta ante un escalón positivo y otro negativo.

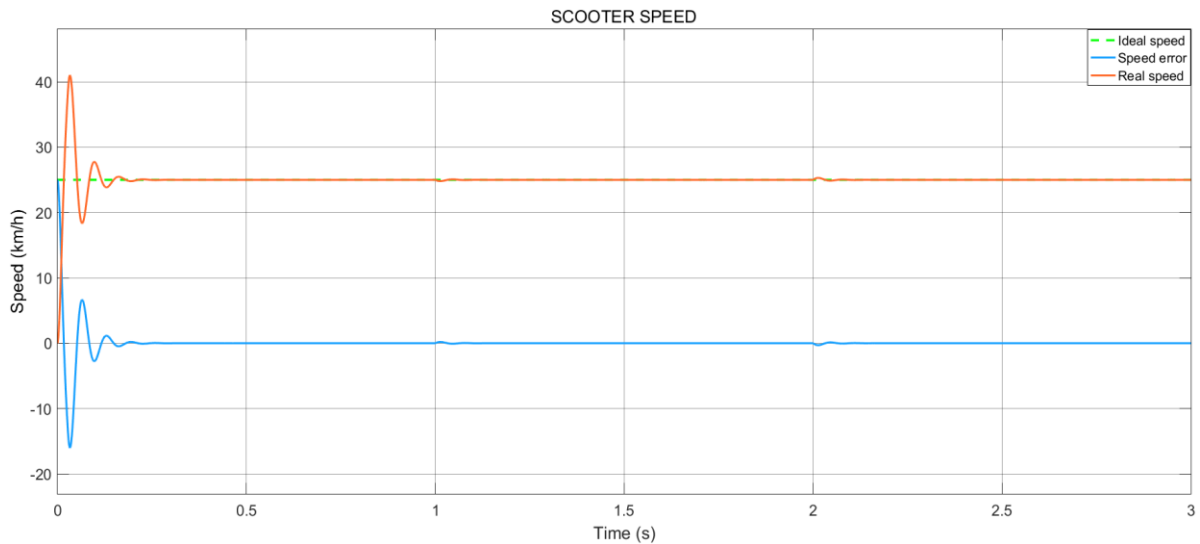


Figura 9 Respuesta velocidad planta con el control PI

La sobreoscilación máxima admisible de este sistema era del 28 % (velocidad máxima admisible 32,25 m/s), esta sobreoscilación máxima se ha fijado en la Tabla 3. En cambio, la sobreoscilación obtenida es del 62 % (velocidad máxima real 40,5 m/s), esto puede deberse a que el sistema parte de reposo y al partir de esas condiciones iniciales, al inicio se da una sobreoscilación máxima.

6.1.1 Respuesta ante escalón positivo

En este apartado se va a introducir un par positivo de valor 2 N.m que está referido a un escalón de par motor.

En la Figura 10 se muestra la velocidad consigna. Se puede observar que el tiempo que le cuesta al sistema el eliminar la perturbación es de 0,1 segundos, por lo que el control es rápido y la sobreoscilación máxima que se da en este caso es del 0,8 %.

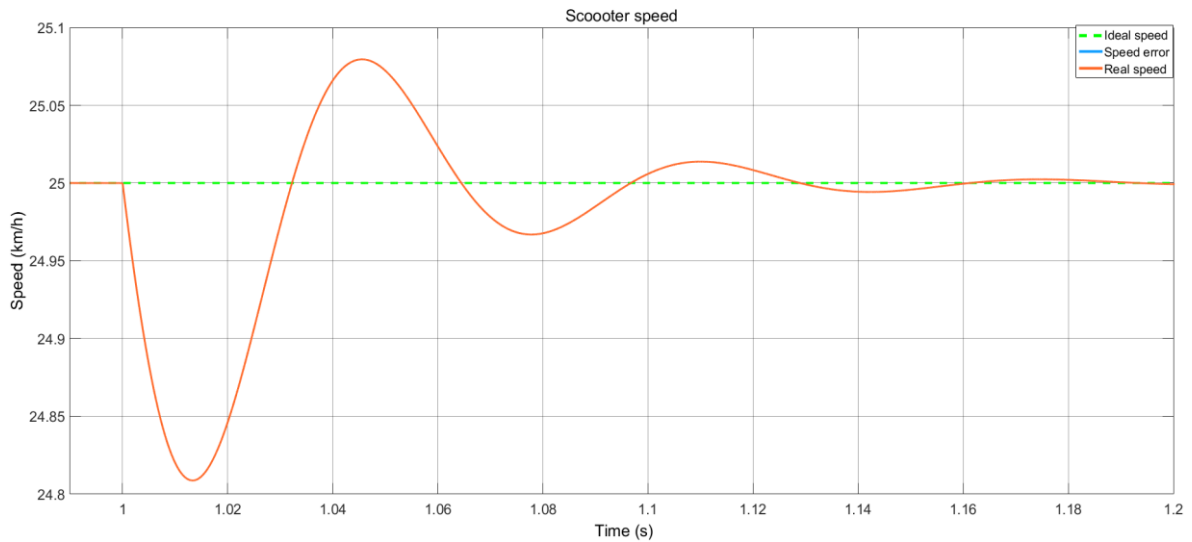


Figura 10 Respuesta velocidad planta con control PI ante un escalón positivo

6.1.2 Respuesta ante escalón negativo

En el segundo 2 se mete un step negativo de valor -3 N.m pidiendo al motor que frene. La amplitud de este escalón viene dado porque se requiere que baje un valor de 3. Se puede observar que en este caso, al introducir el par negativo la sobreoscilación es del 1,2 %. También se puede ver que el error de posición alcanza el valor de 0 debido a la acción del control integral. En la Figura 11 se representa la velocidad consigna y la velocidad real del patín ante un escalón negativo.

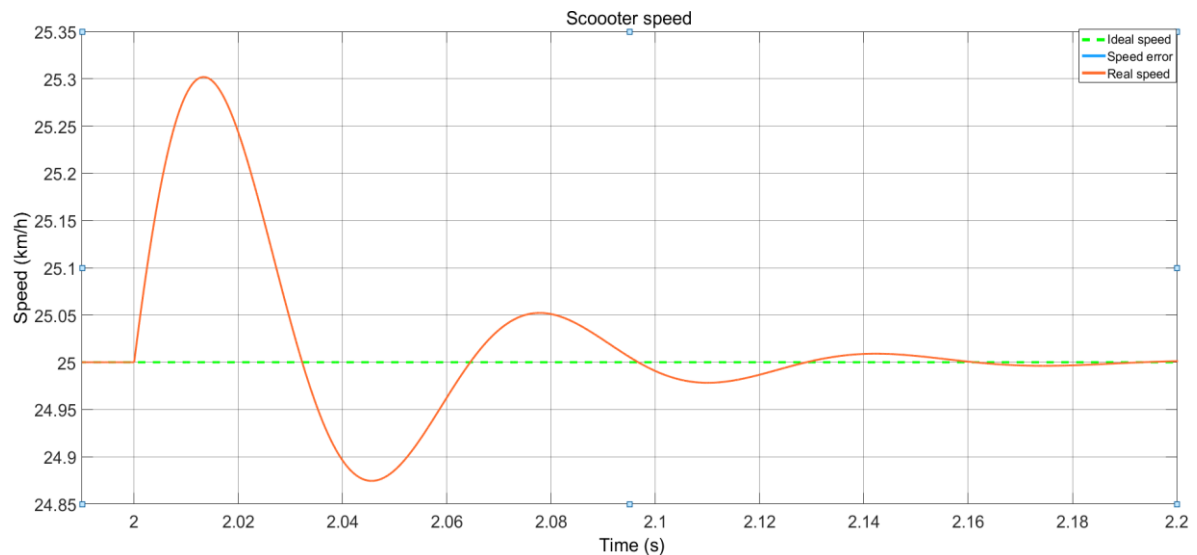


Figura 11 Respuesta velocidad planta con control PI ante un escalón negativo

7. Fuzzy control

La lógica difusa (en inglés *fuzzy logic*) es una lógica paraconsistente (consiste en una lógica que estudia y desarrolla sistemas lógicos que son tolerantes a la inconsistencia) que identifica valores verdaderos entre 0 y 1 de forma gradual. El sistema toma acciones más o menos intensas en función del grado de cumplimiento de la premisa. En el anexo Anexo VI: Control *fuzzy* se hace una explicación más amplia de la evolución del control *fuzzy* [20,21].

Este control tiene gran popularidad debido a que no hay necesidad de modelado matemático de procesos o sistemas. Por todo ello, el uso del control difuso es atractivo en [17,13]:

- Procesos con alta complejidad matemática.
- Procesos con alta incertidumbre.
- Procesos con comportamiento no lineal.
- Procesos en los que no se dispone de un modelo matemático preciso.

El control difuso se compone de 3 etapas [14]:

1. Etapa de entrada

En esta etapa se realiza el mapeo de sensores u otras entradas del sistema.

2. Etapa de procesamiento (fuzzificación)

La fuzzificación consiste en convertir una variable real de entrada en un grado de pertenencia que cuantifica el grado de posesión en concordancia con dicha variable. Se basa en el procesamiento de una combinación de reglas lógicas con la nomenclatura de “SI-ENTONCES” (ej. Si temperatura exterior es “frío extremo”, entonces “encender calefacción al máximo”).

3. Etapa de salida (defuzzificación)

La defuzzificación es el proceso inverso a la fuzzificación, a través del cual se convierte un conjunto difuso de valores en un valor de salida numérico real.

El control difuso se caracteriza por tener muchas entradas y salidas. Estas entradas pueden combinarse con operadores difusos como son el “and”, “or” y “not”. Estas entradas pueden combinarse de varias formas como son:

- Método de inferencia MAX-MIN: El valor de la salida es el que hace que la función característica del conjunto sea máxima/mínima.

- Método del centroide o método del centro de masas: es un método muy popular que combina el valor de las entradas para sacar un único valor de salida. El valor de la salida se calcula mediante el cálculo del centro de gravedad de cada una de las entradas.

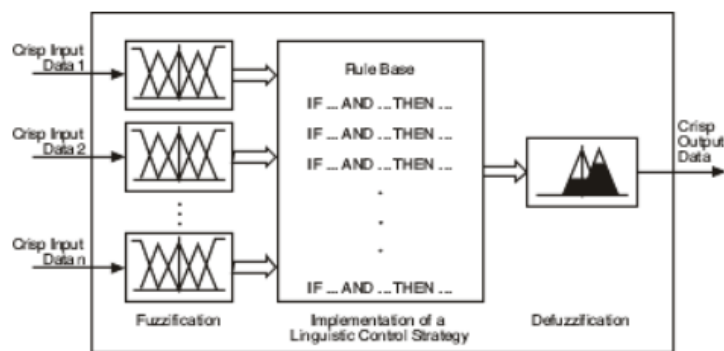


Figura 12 Etapas del control difuso [18]

Para la realización del control de la planta, se va a realizar con 2 entradas (el número de entradas puede variar hasta n entradas) que son:

- Error de velocidad.
- Integral del error de velocidad.

En función del error de velocidad y de la integral del error de velocidad la salida del control *fuzzy* es una acción u otra.

Se han seleccionado 5 ecuaciones de cada una de las entradas al control y tienen la forma geométrica de ecuaciones triangulares. En la Figura 13 se puede ver las funciones que se han usado en el control difuso.

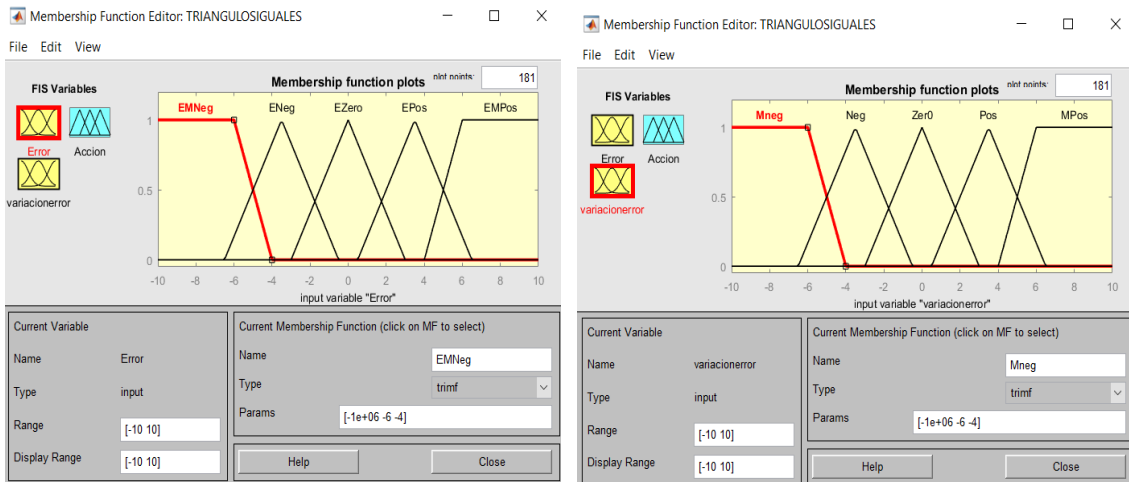


Figura 13 Error de velocidad (izda.) e integral del error de velocidad (dcha.) del control fuzzy

7.1 Resultados del control fuzzy

Se han realizado 3 simulaciones en el que se ha variado la anchura del triángulo de entrada y se van a ver a continuación las diferentes respuestas que se han obtenido. Por anchura del triángulo de entrada se entiende por el rango de entrada de cada una de las entradas.

7.1.1 Triángulos iguales

La primera simulación que se realiza es con los triángulos centrales iguales y bastante grandes. En la Figura 14 se puede ver que la velocidad final del patín alcanza los 23,55 km/h, obteniendo un error de velocidad de 1,45 km/h. Es decir, el error de velocidad es del 5,8 %.

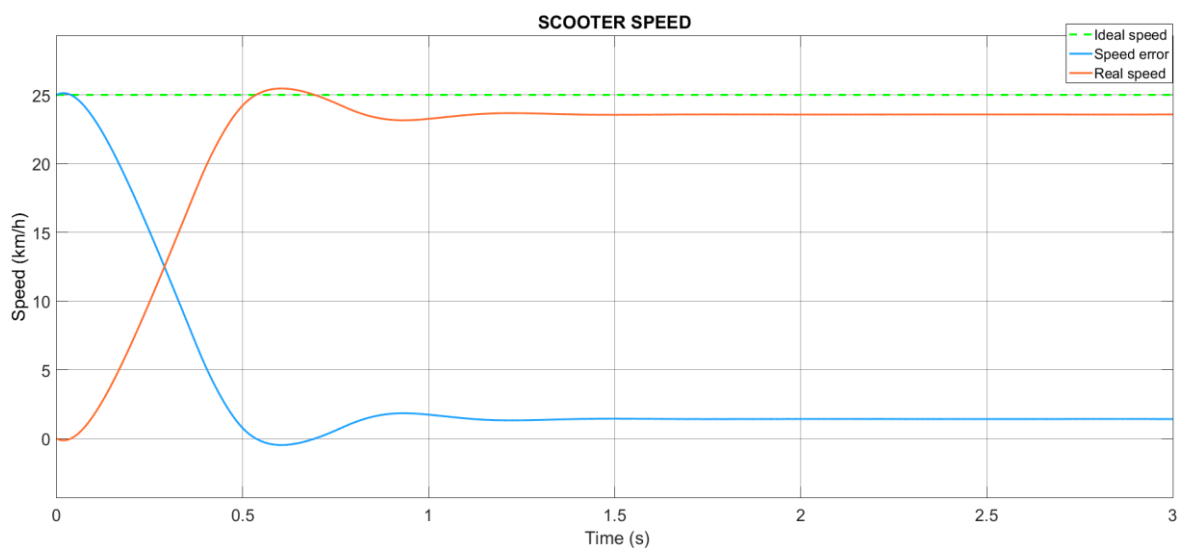


Figura 14 Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulos iguales

7.1.2 Triángulos centrales más pequeños

La segunda simulación que se realiza es con los triángulos centrales más pequeños para las dos entradas en el control.

En la Figura 15 se puede ver que la velocidad final del patín alcanza los 23,78 km/h, obteniendo un error de velocidad de 1,22 km/h. Es decir, el error de velocidad es del 4,88 %.

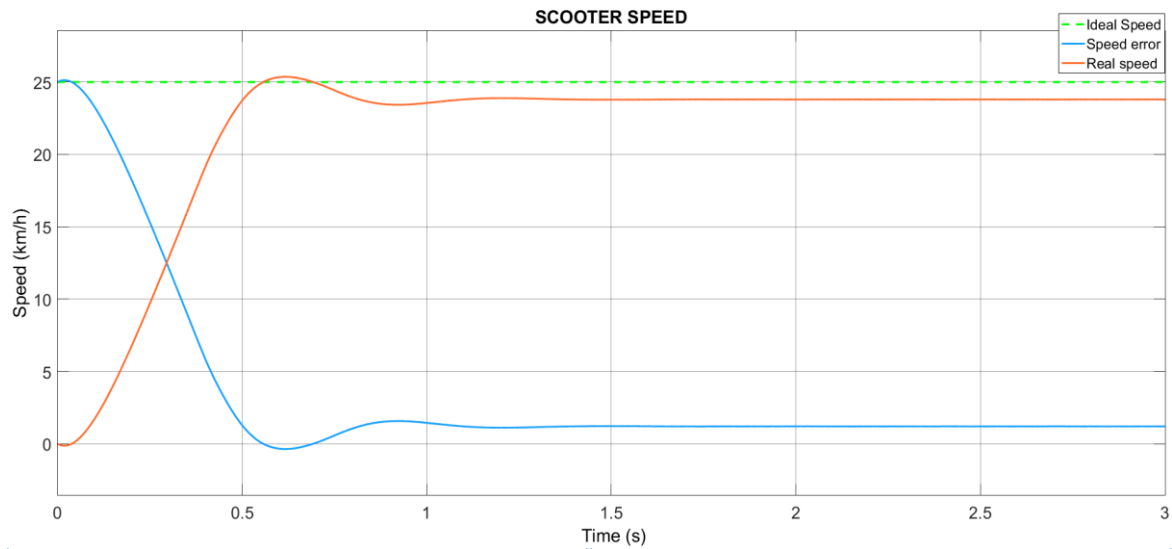


Figura 15 Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulos pequeños

7.1.3 Triángulos centrales muy pequeños

La tercera simulación que se realiza es con los triángulos centrales aún más pequeños para las dos entradas en el control, con el fin de hacer un controlador más preciso.

En la Figura 16 se puede ver que la velocidad final del patín alcanza los 23,81 km/h, obteniendo un error de velocidad de 1,19 km/h. Es decir, el error de velocidad es del 4,76 %.

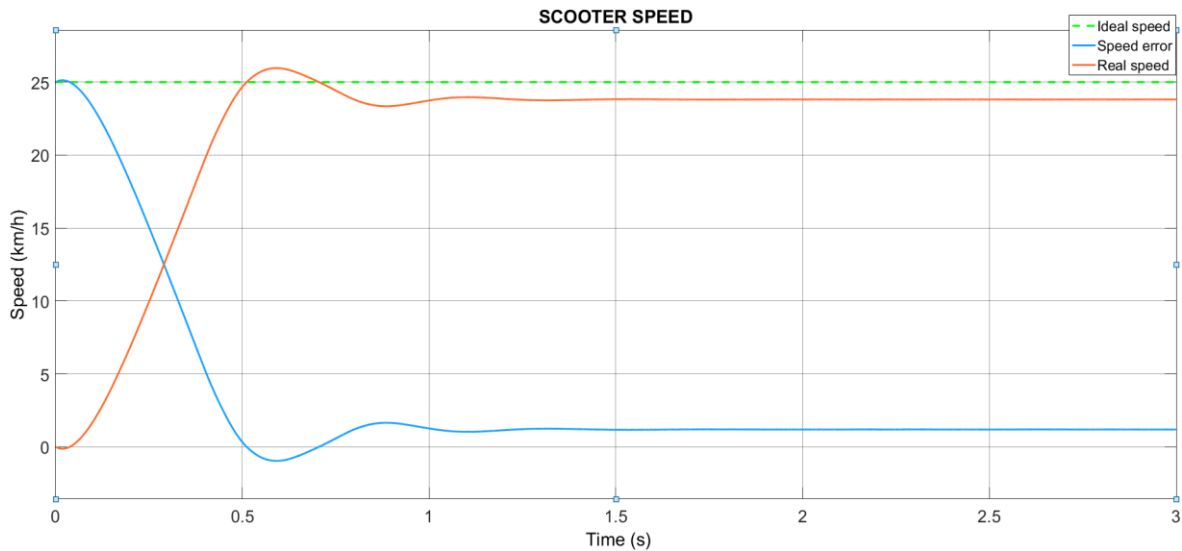


Figura 16 Respuesta de la velocidad en el control fuzzy con triángulo central muy pequeño

Se puede ver que a medida que se disminuye la anchura del triángulo de entrada, el error de velocidad se hace más pequeño, teniendo en cuenta que error de velocidad siempre se va a tener debido a que no se tiene un integrador en el control.

A continuación, en la Tabla 4 se incluye la velocidad real, y el error de velocidad obtenido en función de los triángulos seleccionados para el control difuso:

Tabla 4 Respuesta del sistema variando la entrada del control fuzzy

	Velocidad máxima	Error de velocidad
7.1.1 Triángulos iguales	23,55 km/h	1,45 km/h (5,8 %)
7.1.2 Triángulos centrales más pequeños	23,78 km/h	1,22 km/h (4,88 %)
7.1.3 Triángulos centrales muy pequeños	23,81 km/h	1,19 km/h (4,76 %)

Como se puede observar, el tiempo de respuesta en el control *fuzzy* es más lento que el del control proporcional integral, además la sobreoscilación es muy inferior a la obtenida anteriormente.

La respuesta que se obtiene mediante el control difuso será más segura para el usuario, debido a que no tiene un control tan rápido como el obtenido mediante el control PI.

Mediante el control *fuzzy* se consigue un tiempo de respuesta en torno a 0,9 segundos, en cambio, y mediante el control PI se obtiene un tiempo de respuesta de 0,2 segundos.

7.2 Control *fuzzy* con integrador

El control difuso que se ha usado tiene una respuesta en la que se puede observar un error de velocidad que va desde el 4,76 % al 5,8 %. Podría considerarse que es un error de velocidad admisible, ya que está en torno al 5 %, pero se va a realizar de forma complementaria un controlador difuso con integrador para intentar conseguir un error de velocidad nulo o por lo menos intentar reducirlo al máximo.

En la Figura 17 se muestra el diseño de este controlador que se ha introducido en Matlab.

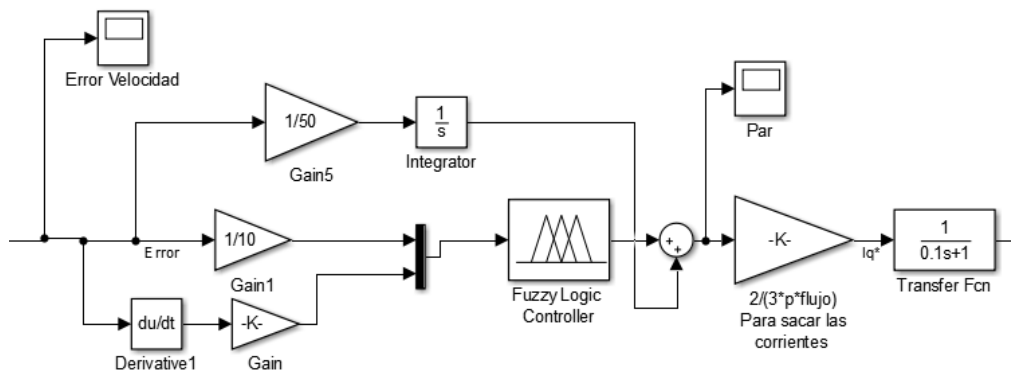


Figura 17 Control difuso con integrador en Matlab

El valor de la constante del control integral es de 1/50, este valor es el que se ha seleccionado como contante del control integral con el objetivo de que el error de velocidad sea nulo. A continuación, en la Figura 18 se representa la respuesta del patín con el control difuso con integrador.

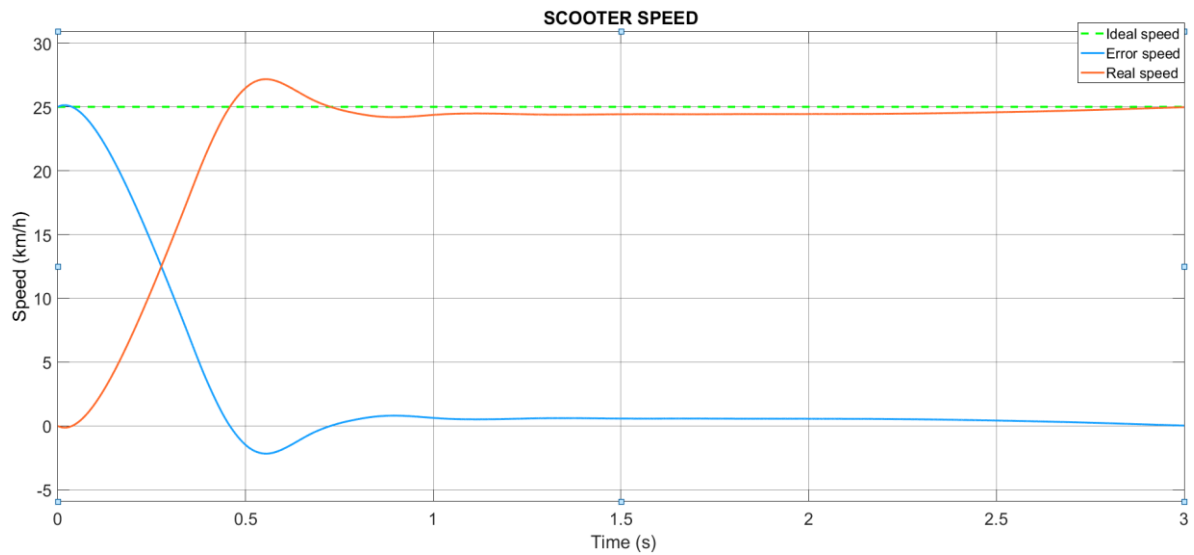


Figura 18 Control fuzzy con integrador

Mediante este cambio, se mejora la respuesta obteniendo un error de velocidad de 1 % y una velocidad máxima en estacionario de 25,5 km/h. La sobreoscilación máxima que se da está en torno al 6%

8. *Neural control*

Las redes neuronales en ingeniería de control se denominan a aquellas redes que están interconectadas masivamente en paralelo y tienen una organización jerárquica. Las redes neuronales intentan simular el modo de interactuar con los objetos del mundo real tal como lo haría nuestro sistema nervioso [31].

Las redes neuronales tienen características similares a las del cerebro humano. Estas redes son capaces de aprender de la experiencia vivida y extrapolar esa experiencia y conocimiento adquirido a nuevas experiencias o situaciones. Todo ello hace que las redes neuronales ofrezcan ventajas como [31]:

- Aprendizaje adaptativo: las redes neuronales poseen la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en una experiencia inicial de la cual ha aprendido y puede extrapolar a nuevas experiencias
- Autoorganización: las redes neuronales pueden crear su propia representación de la información que recibe a través de una etapa de aprendizaje.
- Operación en tiempo real: las operaciones se pueden realizar en tiempo real, debido a su construcción en paralelo.
- Se pueden introducir chips especiales para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas.

En el trabajo se va a implementar un controlador predictivo de red neuronal, el cual utiliza un modelo de red neuronal de una planta no lineal para predecir el rendimiento futuro de la planta.

El primer paso para realizar el control predictivo de la red neuronal es determinar el modelo de la planta de la red neuronal que se va a usar, para ello se va a usar un modelo más simplificado para entrenar la red en un tiempo inferior. El modelo que se va a usar es el modelo de la máquina de corriente continua.

En el modelo de la máquina se va a usar el bloque “NN Predictive Controller”, el cual se conecta de la siguiente forma [30] y aparece en la Figura 19:

- La señal de control (*Control signal*) está conectada a la entrada del modelo de la planta.
- La señal de salida de la planta (*plant output*) está conectada a la salida del bloque de la planta.

- La referencia (*reference*) está conectada a la señal de referencia aleatoria.

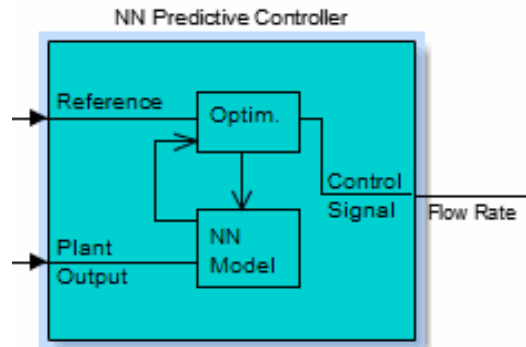
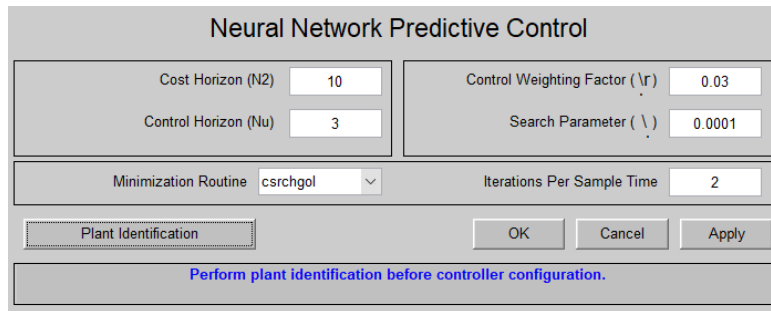


Figura 19 NN predictive controller

A continuación, se va a realizar el diseño del control predictivo y se va a explicar el significado de cada uno de los datos que aparecen [30]. En la Figura 20 se representan los valores seleccionados:

- “*Cost Horizon*” N_2 : el horizonte de costos es el número de pasos de tiempo en los que se minimizan los errores de predicción, cuanto mayor sea este número más pequeño será el error de predicción.
- “*Control Horizon*” U_n : el horizonte de control es el número de pasos de tiempo en los que se minimizan los incrementos de control.
- “*Search parameter*” α : este parámetro determina cuanta reducción en el rendimiento se requiere para un paso de optimización exitoso, cuanto más pequeño sea, más óptimo será el control realizado.
- “*Control weighting factor*” ρ : este factor sale de la suma de los incrementos de control al cuadrado en la función del rendimiento. A mayor valor, mayor rizado de la salida se obtendrá.
- “*Minimization routine*”: se puede elegir la rutina de minimización a usar por el algoritmo de optimización. El tipo de rutina de optimización hará que el sistema converja en más o menos iteraciones. Se han probado con los 6 tipos de rutinas de optimización disponibles, pero con la que se ha obtenido una respuesta con menor error de velocidad es la llamada “*csrchgol*”.
- “*Interactions per sample time*”: es el número de iteraciones del algoritmo de optimización en cada tiempo de muestra. En este caso, realizará 2 iteraciones por cada segundo de muestreo.

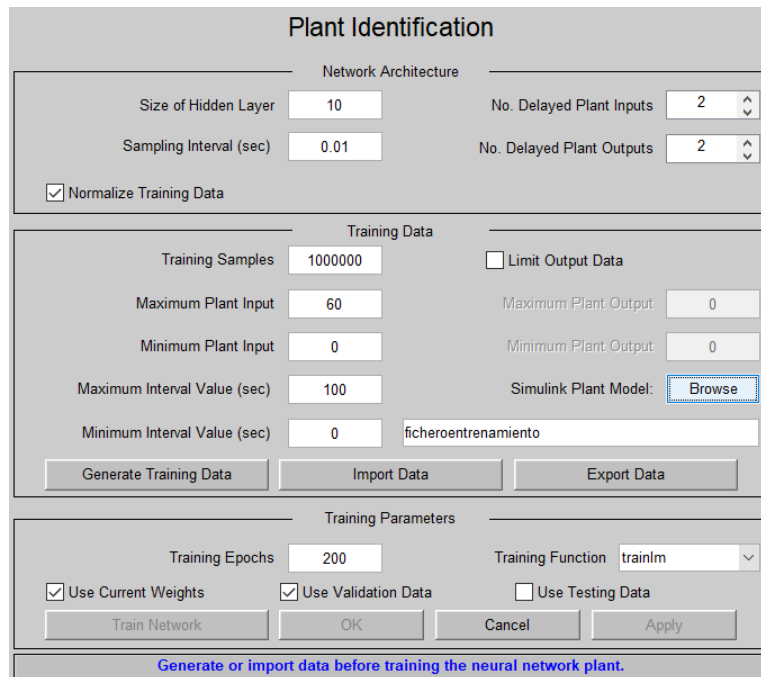


Neural Network Predictive Control

Cost Horizon (N2) <input type="text" value="10"/> Control Horizon (Nu) <input type="text" value="3"/>	Control Weighting Factor (ρ) <input type="text" value="0.03"/> Search Parameter (λ) <input type="text" value="0.0001"/>
Minimization Routine: <input type="text" value="csrchgol"/>	Iterations Per Sample Time: <input type="text" value="2"/>
<input type="button" value="Plant Identification"/> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Apply"/>	
Perform plant identification before controller configuration.	

Figura 20 Parámetros del NN Predictive Control

Una vez que se han seleccionado los parámetros, hay que darle al botón “Plant identification” y aparecerá una ventana en la que se debe rellenar los parámetros de la red neuronal antes de poder simular el control. Los datos que se han elegido son los que aparecen en la Figura 21



Plant Identification

Network Architecture	
Size of Hidden Layer <input type="text" value="10"/>	No. Delayed Plant Inputs <input type="text" value="2"/>
Sampling Interval (sec) <input type="text" value="0.01"/>	No. Delayed Plant Outputs <input type="text" value="2"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Normalize Training Data	
Training Data	
Training Samples <input type="text" value="1000000"/>	<input type="checkbox"/> Limit Output Data
Maximum Plant Input <input type="text" value="60"/>	Maximum Plant Output <input type="text" value="0"/>
Minimum Plant Input <input type="text" value="0"/>	Minimum Plant Output <input type="text" value="0"/>
Maximum Interval Value (sec) <input type="text" value="100"/>	Simulink Plant Model: <input type="button" value="Browse"/>
Minimum Interval Value (sec) <input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="ficheroentrenamiento"/>
<input type="button" value="Generate Training Data"/>	<input type="button" value="Import Data"/> <input type="button" value="Export Data"/>
Training Parameters	
Training Epochs <input type="text" value="200"/>	Training Function <input type="text" value="trainlm"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Use Current Weights	<input checked="" type="checkbox"/> Use Validation Data
<input type="checkbox"/> Use Testing Data	
<input type="button" value="Train Network"/>	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Apply"/>
Generate or import data before training the neural network plant.	

Figura 21 Plant Identification

Los parámetros que hay que introducir son los siguientes [30]:

- “*Size of hidden layer*”: es el número de neuronas en la primera capa de la red del modelo de la planta. Al aumentar el número de neuronas, mayor tiempo de simulación se tendrá.
- “*Sampling Interval (sec)*”: es el tiempo que transcurre desde que almacena un dato hasta que se almacena el siguiente. Si este valor es muy grande, se

perderán muchos datos de simulación, ya que habrá muchos datos que no podrá captar.

- “*No. Delayed plant input*”: corresponde al número de entradas en el modelo estudiado.
- “*No. Delayed plant outputs*”: es el número de salidas en el modelo estudiado.
- “*Training samples*”: es el número de datos que se generan en el entrenamiento de la red. Si es muy pequeño se corre el riesgo de que la muestra de valores obtenidos no sea lo suficientemente grande y no se esté analizando la respuesta completa.
- La entrada de la planta aleatoria tiene una serie de datos e intervalos aleatoria, que vienen limitados por altura y tiempo máximo y mínimo.
 - o “*Maximum plant input*”: valor máximo de entrada.
 - o “*Minimum plant input*”: valor mínimo de entrada.
 - o “*Maximum Interval value*”: intervalos máximos de entrada.
 - o “*Minimum Interval value*”: intervalos mínimos de entrada.
- “*Limit output data*”: se puede limitar un rango de valores de salida, a partir de los cuales la salida saturará a ese valor.
 - o “*Maximum plant output*”.
 - o “*Minimum plant output*”.
- “*Simulink plant model*”: es el modelo de la planta que se usa para generar datos de entrenamiento. En el caso estudiado, para el modelo de la planta se ha usado una simplificación del modelo real, el cual dispone de un motor de corriente continua.

Una vez se han seleccionado estos datos se importan los datos del archivo que se ha creado o de una red que se ha entrenado ya previamente. En este caso se van a importar los datos de una red previamente entrenada, la cual se representa en la Figura 22. El modelo de la red entrenada corresponde a un modelo donde hay un motor de corriente continua.

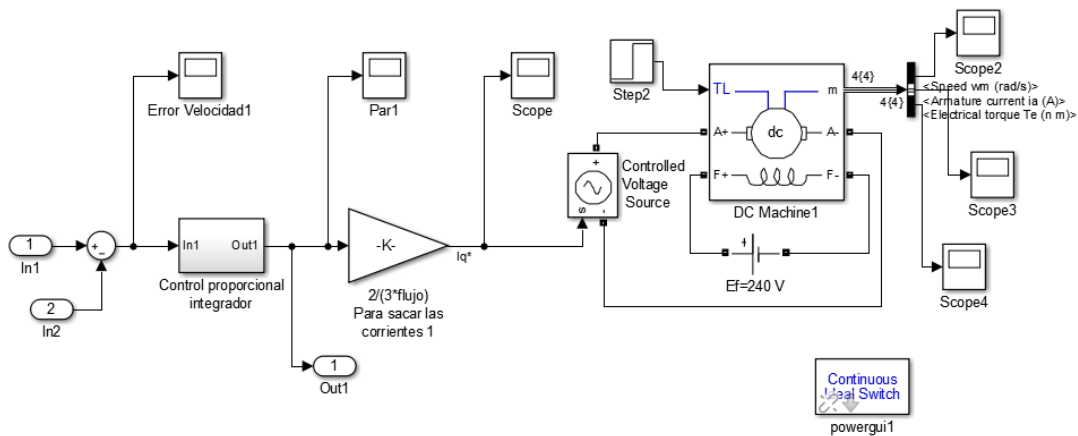


Figura 22 Modelo de la red entrenada. Motor de corriente continua

Una vez que se ha entrenado, se definen los siguientes valores para ensayar el modelo [30]:

- “Training epochs”: es el número de iteraciones que va a realizar la planta. A mayor número de iteraciones, mayor tiempo de simulación. Si la simulación finaliza antes de llegar a ese valor significa que la solución ha convergido antes de ese número de iteraciones.
- “Training function”: se puede escoger entre todas las funciones de entrenamiento que aparecen para ensayar el modelo. La función de entrenamiento que ha presentado una respuesta con una mejor dinámica es la función llamada “trainlm”.
- “Use current weight”: hay que seleccionar esa casilla para que entrene el modelo con los valores actuales. Si no se selecciona esa casilla generará valores de peso aleatorios.
- “Use validation Data”: hay que seleccionar esa casilla para que valide los datos mientras se está entrenando el modelo.

Una vez se ha rellenado todo, se puede entrenar la red del modelo dándole al botón de “train network”. Los resultados que se muestran en la Figura 23

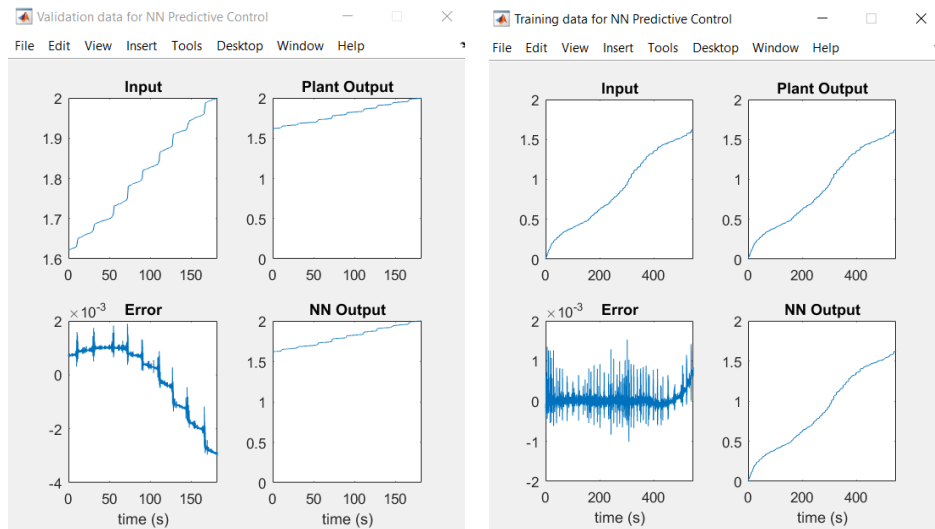


Figura 23 Validación de la red neuronal

8.1 Resultados

En la Figura 24 se muestra la respuesta de la dinámica del patín mediante el control seleccionado, que es el neural control. A este control se le ha añadido un integrador, con el objetivo de intentar reducir el error de velocidad

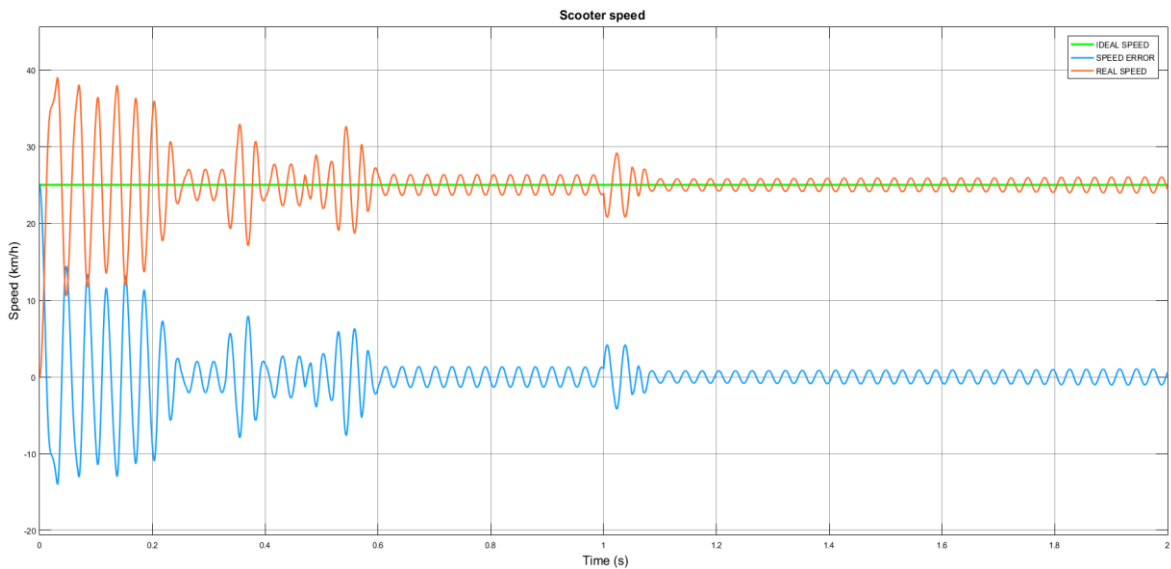


Figura 24 Velocidad del patín con una red neuronal

Como se puede ver, la respuesta de la planta ante un control neuronal es peor que los obtenidos mediante los otros 2 controles que se han usado basándose en que la respuesta tiene una SO en torno al 52 % y que el rizado de la respuesta es bastante elevado, ya que está todo el rato oscilando cuando llega a la velocidad consigna y no se estabiliza como pasa en los otros controles.

9. Conclusiones

Se ha realizado el control del patín eléctrico mediante 3 tipos de controles, el control proporcional integral, el control *fuzzy* y el control *neural*, obteniéndose para cada control una respuesta.

Mediante el control proporcional integral se ha obtenido una respuesta muy rápida (en torno a 0,2 segundos), pero la sobreoscilación obtenida al inicio del control es del 62 % y esto se debe a que el sistema parte de reposo y al partir de esas condiciones iniciales, al inicio se da una sobreoscilación máxima. Cabe destacar que el error de velocidad obtenido mediante este control es nulo.

Mediante en control *fuzzy* se ha obtenido tiempo de respuesta de 0,6 segundos aproximadamente y la sobreoscilacion es de 4 %, en cambio, mediante este control se obtiene un error de velocidad del 4,76 % (seleccionando 7.1.3 Triángulos centrales muy pequeños) y una sobreoscilación máxima en torno al 4%.

Con el objetivo de intentar conseguir que el error de velocidad disminuya se añade un control integral, mediante el cual se obtiene un error de velocidad en torno al 1 %, una sobreoscilación máxima en torno al 6 % y un tiempo de respuesta de 0,6 segundos aproximadamente.

Por último, mediante el control *neural* con integrador se ha obtenido un tiempo de respuesta de 0,4 segundos y una sobreoscilacion del 52 %. La respuesta del control *neural* no llega a ser tan buena como en los otros dos controles anteriores, esto puede deberse a que el modelo de red entrenado corresponde a un motor de corriente continua y no el motor usado para el resto de los controles, esto es porque tendría que tener una capacidad muy alta de simulación para poder simular el modelo real del motor.

En base a los resultados obtenidos, puedo concluir que el control *fuzzy* sería más adecuado para el control del patín debido a que es el que menor sobreoscilación tiene y debido a que el tiempo de respuesta es mayor, algo que es más seguro para el usuario de este.

Anexo I Introducción al vehículo de movilidad personal

A.I.1 Contexto histórico del vehículo de movilidad personal

Se podría pensar que el patín eléctrico es un invento reciente, lo cual es erróneo, la primera patente de un patín eléctrico se registró a finales del siglo XIX. Por aquel entonces, estos vehículos eran pesados y con baja potencia, es por ello que no llegaba a ser una tecnología tan interesante y que pudiera plantar cara a los vehículos de combustión [26,28].

El lanzamiento de la primera batería comercial de ion-litio en el año 1991 marcó un antes y un después en los vehículos eléctricos. Esta tecnología de baterías era capaz de almacenar mucha más energía por unidad de masa que sus antecesoras, lo cual suponía una mayor capacidad en menos peso. Además, estas baterías necesitaban menos tiempo de carga que las de su competencia [26, 28].

En 1996, Peugeot fue la primera empresa en producir en masa patines eléctricos. Comercializó un patín eléctrico (llamado *Scoot'Elec*) que alcanzaba 45 km/h con una autonomía de 40 km usando una batería de níquel-cadmio (esta tecnología de baterías no es tan respetuosa con el medio ambiente como las que se usan ahora). Este modelo de patín eléctrico tuvo gran éxito y se llegó a fabricar durante 10 años [26].

Pero no ha sido hasta los años 2017 y 2018 donde el uso de los patines eléctricos ha crecido de forma exponencial. El uso de los patines eléctricos en las grandes ciudades es algo muy habitual y una alternativa más económica y respetuosa con el medio ambiente que los coches con motores de combustión [26].

A.I.2 Estudio de mercado

A lo largo de los primeros meses del año 2021, estuve haciendo un análisis de mercado de los patines eléctricos que se estaban vendiendo, con objeto de adquirir un vehículo de movilidad personal. Los parámetros más importantes en los que me fijé fueron la potencia del motor, la autonomía del vehículo y el tipo de frenos que tenía (tambor, disco, eléctrico...). Aparte de estos parámetros, también se analizó si tenían suspensión, precio y velocidad máxima.

A continuación, en la Tabla 5 se adjuntan los patines estudiados y los parámetros más importantes considerados a la hora de seleccionar el patín.

Tabla 5 Comparativa patines eléctricos

Marca	Modelo	Potencia	Autonomía	Precio	Velocidad máx	Freno delantero	Freno trasero	Suspensión
Xiaomi	Electric Essential	500 W	20 km	350 €	20 km/h	E-ABS	Disco	No
	Electric 3	600 W	30 km	450 €	25 km/h	E-ABS	Disco	No
	Electric Pro	600 W	45 km	500 €	25 km/h	E-ABS	Disco	No
	Electric Pro 2	600 W	45 km	550 €	25 km/h	E-ABS	Disco	No
smartGyro	Speedway	800 W	45 km	610 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Speedway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Rockway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Kugoo	S1 plus	350 W	25 km	460 €	25 km/h	Eléctrico	Mecánico	Delantera
	S1 pro	350 W	30 km	440 €	30 km/h	Eléctrico	Mecánico	Delantera
	Kirin S4	350 W	40 km	500 €	35 km/h	Eléctrico	Disco	Delantera
	Kirin M4 pro	500 W	45 km	700 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Kirin X1	600 W	50 km	800 €	40 km/h	E-ABS	Disco	Delantera y trasera
Cecotec	BONGO SERIE A	350 W	25 km	349 €	25 km/h	Eléctrico	Disco	No
E-scooter	H7	350 W	25 km	297 €	25 km/h	Eléctrico	Disco	No
Inokim	Light 2	350 W	30 km	1.099 €	Lim a 25 km/h	Tambor	Tambor	No
	Quick 4	600 W	58 km	1.499 €	Lim a 25 km/h	Tambor	Tambor	Delantera y trasera
Zero	Zero 8	500 W	50 km	949 €	45 km/h	No	Mecánico	No
	Zero 9	600 W	50 km	1.149 €	45 km/h	Disco	Tambor	Delantera y trasera
	Zero 9 lite	600 W	35 km	785 €	40 km/h	Disco	Tambor	Delantera y trasera
Vsett	Vsett 8	500 W	50 km	799 €	42 km/h	Tambor	Tambor	No especifica
	Vsett 9	500 W	40 km	999 €	45 km/h	Disco	Disco	No especifica
Inmotion	Inmotion L9	500 W	75 km	799 €	40 km/h	Eléctrico	Disco	Delantera y trasera
Kaabo	Mantis K800	800 W	50 km	699 €	50 km/h	Tambor	Disco	Delantera y trasera
	Mantis 8 Lite	800 W	45 km	749 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera

El primer parámetro elegido fue el tipo de freno, ya que es fundamental para la seguridad del usuario. Por lo tanto, en la Tabla 6 se introduce el filtro del freno delantero y trasero con tambor de disco que es el freno más eficiente.

Tabla 6 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor

Marca	Modelo	Potenc	Autonom	Preci	Velocidad máx	Freno delante	Freno trase	Suspensión
smartGyro	Speedway	800 W	45 km	610 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Speedway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Rockway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Kugoo	Kirin M4 pro	500 W	45 km	700 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Vsett	Vsett 9	500 W	40 km	999 €	45 km/h	Disco	Disco	No especifica
Kaabo	Mantis 8 Lite	800 W	45 km	749 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera

El segundo parámetro elegido fue la autonomía, esta debía ser como mínimo de 45 kilómetros, por lo que en la Tabla 7 se incluye la tabla en la que aparece el filtro del tipo de freno y de la autonomía.

Tabla 7 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor y autonomía

Marca	Modelo	Potenc	Autonom	Preci	Velocidad m	Freno delante	Freno trase	Suspensión
smartGyro	Speedway	800 W	45 km	610 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Speedway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Rockway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Kugoo	Kirin M4 pro	500 W	45 km	700 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Kaabo	Mantis 8 Lite	800 W	45 km	749 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera

El siguiente parámetro fue la potencia, esta debía ser como mínimo de 600 W, por lo que en la Tabla 8 se incluyen todos los patines que cumplían con los requisitos.

Tabla 8 Comparativa de patines eléctricos con filtro de los frenos de tambor, autonomía y potencia

Marca	Modelo	Potenc	Autonom	Preci	Velocidad m	Freno delante	Freno trase	Suspensión
smartGyro	Speedway	800 W	45 km	610 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Speedway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
	Rockway pro	1200 W	50-60 km	769 €	55 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera
Kaabo	Mantis 8 Lite	800 W	45 km	749 €	45 km/h	Disco	Disco	Delantera y trasera

Finalmente, adquirí el patín de la marca Smartgyro , modelo Speedway, porque era el que tenía una relación mejor de potencia-autonomía-frenos-precio.

Anexo II: Datasheet del patín eléctrico Smartgyro y descripción detallada de cada una de las partes del patín seleccionado

A continuación, se adjunta el *datasheet* del patín descargado de la página web de la marca Smartgyro



smartGyro
SPEEDWAY
v.3.0

Bateria 48v

Motor 800w

Rueda 10"

Luces LED

¡Nuevo! smartGyro SpeedWay V3.0
Un scooter super potente

Powerful motor
Brushless 800W

Battery life
12500 mAh / 48V

Up to 45 Km
of autonomy

LED
rechargeable

10" wheels
recumbent

Foldable
structure

Front and rear
brakes

3 modes
of speed

Display
multifunction

Double suspension
front and rear

4 Full
LED lights

Medio de transporte para adultos exigentes
El patín eléctrico más potente de smartGyro. Speed Way es sinónimo de velocidad,
resistencia y aplomo con una conducción muy sencilla

www.smartgyro.es

Figura 25 Hoja 1 Ficha técnica



VELOCIDAD, DURABILIDAD Y CALIDAD

SmartGyro SpeedWay V3.0 viene con un diseño robusto, suspensiones reforzadas de doble pistón, intermitentes y una calidad inigualable, necesaria para tanta potencia. Este patín sube las cuestas sin ningún problema, te subirás y no te lo podrás quitar de la cabeza.

¿Estás preparado?



Estructura muy resistente de aluminio plegable



Potente motor de 800W y batería de 12.500 mAh



Potentes frenos de disco delantero y trasero



Doble amortiguación Delantera y trasera



Cuentakilómetros, odómetro y TRIP



4 Intermitentes LED Dos delanteros y dos traseros.

El Scooter eléctrico más potente de smartGyro. SpeedWay es sinónimo de velocidad, resistencia y aplomo con una conducción muy sencilla. Incorpora una batería de litio con alta capacidad de 12.500 mAh, con la que podrás disfrutar de una autonomía de hasta 45 Km. Su potente motor de 800W con selector de 3 velocidades, sus ruedas neumáticas de 10", su potente sistema de frenado por discos de freno, su doble suspensión por amortiguador, intermitentes delanteros y traseros, y su más que probada fiabilidad, lo hacen ideal para que te olvides de atascos, economices tus viajes, te diviertas y cuides el medio ambiente. ¿Te atreves a subir?

Motor 800w

Rueda 10"

Batería 48v

- Potente motor Brushless de 800W con transmisión directa (sin uso de cadenas ni correas) mayor aceleración, mantenimiento cero y evita averías.
- Ruedas neumáticas de 10" resistentes y estables.
- Doble suspensión delantera y trasera por amortiguador.
- Disco de freno delantero y trasero
- Batería mejorada y reforzada con una potencia mínima de 12.5 Ah y máxima de 13Ah 48V, más eficiente y estable
- Tiempo de carga máxima de 7 horas.
- Velocidad máxima: 45km/h, autolimitado por ley a 25km/h.
- Foco de LED delantero y luz de freno trasera para máxima visibilidad.
- 4 Intermitentes led: 2 delanteros y 2 traseros.
- Luces led en los laterales que pueden desconectarse con un simple botón.
- Display multifunción indicativo de Km/hora, distancia recorrida, duración de batería etc.
- Puedes elegir entre 3 modos de velocidad diferentes.
- Estructura resistente plegable de aluminio con soporte para pies, timbre y pata de cabra.
- Soporta un peso máximo permitido de hasta 120 kgs.

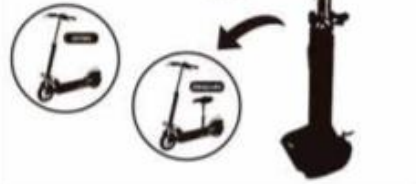
SMARTGYRO XTREME SPEEDWAY	8435089030679	3027-152
SMARTGYRO XTREME SPEEDWAY SEAT	8435089030686	3027-153



OPCIONAL

Asiento ajustable para SmartGyro Xtreme

SPEEDWAY V2B



Busca en nuestra web tutoriales de uso, cómo disfrutar día a día y sacar más partido a tu smartGyro.

www.smartgyro.es

Figura 26 Hoja 2 Ficha técnica

A continuación, se realiza una descripción detallada de cada una de las partes del patín seleccionado.

AII.1 Cuadro

El cuadro está formado por la unión de un mástil a la base (donde se acoplan las dos ruedas). El mástil está compuesto por dos partes, el mástil inferior y el mástil superior. El mástil inferior se encuentra unido a la base y es de un diámetro superior al mástil superior, ya que este se aloja en interior del mástil inferior pudiéndose regular la longitud en función de la comodidad del conductor extrayéndolo más o menos.

La mayoría de los patines que existen en el mercado son plegables, con lo que se podrá colocar el mástil en paralelo a la base.

El material usado para la fabricación del mástil es el aluminio, con el objetivo que sea más ligero sin perder propiedades como son la durabilidad y la robustez.



Figura 27 Mástil inferior (izda.). Unión mástil inferior con mástil superior (dcha.)

AII.2 Base

La base es la parte del patín donde el usuario de este se sube y puede apoyar los pies para una conducción cómoda. Es importante que la base tenga la extensión suficiente como para poder apoyar los dos pies de una persona adulta, en el patín analizado, la base tiene una longitud de 55 cm y un ancho de 23 cm.

Además, la base suele llevar cintas antideslizantes con el objetivo de que el usuario tenga un mayor agarre. En el patín analizado, se incluyen dos cintas de 55 cm de largo y 3,5 cm de espesor.

Por último, también viene incorporado el patín con una pata de cabra para que poder dejarlo apoyado.



Figura 28 Base del Patín (izda). Pata de cabra (dcha.)

AII.3 Batería

La batería del patín analizado está fabricada con la tecnología de ion-litio, que son sin duda las que mejores prestaciones ofrecen (prestaciones muy superiores a las baterías con la tecnología de gel y las de plomo). Estas baterías se emplean en patines de gama media-alta debido a su alto coste asociado. Las baterías de ion-litio ofrecen mas potencia en menos espacio (poseen una mayor capacidad de almacenaje de energía por kilogramo) y además están diseñadas para unos 3000 ciclos de carga (500-800 ciclos de carga más que las de plomo o las de gel).



Figura 30 Batería del patín [22]



Figura 29 Batería del patín [22]

AII.4 Ruedas

Las ruedas que suelen instalarse en los patines eléctricos suelen estar entre los siete a las diez pulgadas, siendo este último valor el diámetro del patín analizado. A menor diámetro de rueda, mayor maniobrabilidad, control y aceleración. Por el contrario, a mayor diámetro, mayor amortiguación, menor vibración, mayor estabilidad y seguridad.

Las ruedas pueden ser de dos tipos:

- Ruedas con cámara de aire: ofrecen una mayor amortiguación y son el tipo de ruedas que llevan este patín.
- Ruedas macizas: llamadas en inglés “tubeless” ofrecen mayor durabilidad y menor mantenimiento.

Por último, se puede distinguir dos tipos de banda de rodadura en función de la superficie pensada:

- Ruedas más lisas: son ruedas finas y con una banda de rodadura más lisas (estas ruedas consiguen un mayor agarre al asfalto, ya que tienen mayor superficie en contacto), pensadas para usarse por ciudad.
- Ruedas “todoterreno”: son ruedas pensadas para rodar sobre superficies más adversas como puede ser tierra con piedras. Estas ruedas poseen tacos que se pueden agarrar mejor a la superficie.



Figura 31 Rueda lisa del patín Smartgyro Speedway (izda.). Rueda todoterreno (dcha.) [23]

All.5 Frenos

Se pueden encontrar dos tipos de frenos que suelen ir alojados en la rueda trasera:

- Freno de tambor: está formado por una superficie fija (zapata) y otra móvil (tambor) que cuando se acciona el freno, se produce un rozamiento entre ambas partes haciendo que el patín se pare. Este tipo de freno es barato y el tiempo de frenado es elevado.
- Freno de disco: está formado por una superficie fija (pastilla de freno) y otra móvil (disco de aleación o de acero) que cuando se acciona el freno, se produce un rozamiento entre ambas partes haciendo que el patín se pare. Este tipo de freno es caro (por eso se monta solamente en patines de gama media-alta) y el tiempo

de frenado es corto por lo que la distancia de frenado se reduce. El patín analizado dispone de freno de disco delantero y trasero, por lo que la distancia de frenado es de 3 metros yendo a 25 km/h (distancia de frenado medida por mí misma yendo a 25 km/h).



Figura 32 Freno de disco del patín Speedway (izda. y centro) Freno de tambor (dcha.) [24]

All.6 Motor

Los motores instalados en la rueda trasera de los patines pueden variar desde los 250-300 W (gama baja) de potencia hasta los 1000 W (gama alta).

Los motores eléctricos usados en los patines se pueden clasificar en dos tipos:

- Motores con escobilla ('brushed'): estos motores tienen como desventaja que se desgasta el motor rápido debido a la fricción de las escobillas con el motor. Son motores robustos, pesados y económicos, por eso son usados en patines de gama baja.
- Motores sin escobilla ('brushless'): estos motores no tienen el problema del desgaste, ya que no poseen escobillas, por lo que tienen una larga vida útil y alcanzan elevadas potencias con menores consumos. Son motores más caros y por eso se usan en patines de gama media-alta.

El motor que se estudia en este trabajo es un motor síncrono de imanes permanentes ('brushless'). El motor de imanes permanentes es un motor eléctrico que incorpora en su rotor imanes compuestos por tierras raras como son el disprosio, el gadolinio, o el neodimio.

Este tipo de motores no necesitan de excitación externa, ni escobillas para generar el campo magnético en él, debido a la presencia de estos imanes en el rotor.

Existen 3 tipos distintos de motores de imanes permanentes:

- Motores de corriente continua de imanes permanentes.
- Motores de corriente alterna de imanes permanentes.
- Motores paso a paso de imanes permanentes.

All.7 Acelerador

El acelerador es un elemento de control de potencia (cuanto más se pulse mayor potencia estás requiriendo del motor). El acelerador se encuentra en el manillar, en el agarre diestro, y es un variador de frecuencia electrónico.

Además, lleva incorporada una pantalla donde se puede cambiar el modo de conducción del patín y ver parámetros como la tensión, la velocidad, la hora, los kilómetros totales.



Figura 33 Acelerador marcado con un círculo amarillo (izda.)



Figura 34 Display marcando la tensión de la batería (dcha.). Display marcando la distancia total (centro).

Display marcando la distancia del viaje actual (izda.)

Anexo III Diseño preliminar de un PMSM trifásico

Debido a la dificultad de encontrar una hoja de datos en la que se especificaran todos los parámetros necesarios para caracterizar el motor, se va a realizar el diseño preliminar partiendo de las especificaciones técnicas que se han encontrado en la hoja de datos del patín eléctrico.

Para realizar el diseño preliminar se debe partir de unas especificaciones generales que son las siguientes:

- Potencia base (P_b): 800W
- Velocidad de giro base (N_b): 1800 rpm
- Velocidad de giro máxima (N_{max}): 3000 rpm
- Potencia a velocidad máxima (P_b): 800W
- Voltaje batería (V_{dc}): 48 V
- Conexión en estrella

A.III.1 Voltaje máximo por fase:

La tensión máxima de fase (V_{ph}) es la siguiente:

$$V_{ph} = V_{linmax} \cdot \sqrt{6} = \frac{4}{\sqrt{6} \cdot \pi} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot V_{dc} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{dc} = 21,6 \text{ V} \quad (20)$$

A.III.2 Dimensionamiento del imán permanente (PM) y de la bobina

Como se ha explicado anteriormente, el flujo máximo por el imán permanente se calcula mediante (2):

$$\Psi_{max} = B_{gPM} b_{PM} l_{stack} 2n_c \quad (1)$$

A continuación, se van a explicar cada uno de los parámetros, teniendo en cuenta que el motor está compuesto por imanes permanentes de NdFeB:

- B_{gPM} : inducción remanente de los imanes
- b_{PM} : intervalo de imán permanente
- l_{stack} : longitud axial de la máquina

El parámetro B_{gPM} se calcula mediante la siguiente ecuación (21):

$$B_{gPM} = \frac{B_r}{1 + k_{fringe}} \frac{h_{pm}}{h_{pm} + g} = \frac{1,2}{1 + 0,1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3}} \rightarrow B_{gPM} = 0,827 \text{ T} \quad (21)$$

Siendo:

- k_{fringe} tiene un valor entre 0,1 y 0,2
- $B_r = 1.2 \text{ T}$
- G (airgap) = $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $h_{pm} = 4g = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- b_{PM} el intervalo de imán permanente

El parámetro b_{PM} (intervalo de imán permanente) se elige igual al paso de ranura del estátor (τ), con el objetivo de reducir el par de arranque (22):

$$b_{PM} = \tau = \frac{\pi D_{is}}{6} = \frac{\pi 0,0646}{6} \rightarrow b_{PM} = 0,0338 \text{ m} \quad (22)$$

El parámetro L_{stack} se obtiene de la relación $L_{stack}/D_{is} = \lambda = 1$. Por lo tanto, se calculará a continuación el parámetro D_{is} (23).

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot T_{eb}}{\lambda \cdot \pi \cdot f_t}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 4,24}{1 \cdot \pi \cdot 10^4}} = 0,0646 \text{ m} \rightarrow L_{stack} = 0,0646 \text{ m} \quad (23)$$

Siendo:

- $f_t = 0,2 - 1,2 \text{ N/cm}^2 \rightarrow$ Se elige: $f_t = 10^4 \text{ N/m}^2$
- $T_{eb} = \frac{P_b}{2 \cdot \pi \cdot n_b} = \frac{800}{2 \cdot \pi \cdot 1800/60} = 4,24 \text{ N} \cdot \text{m}$

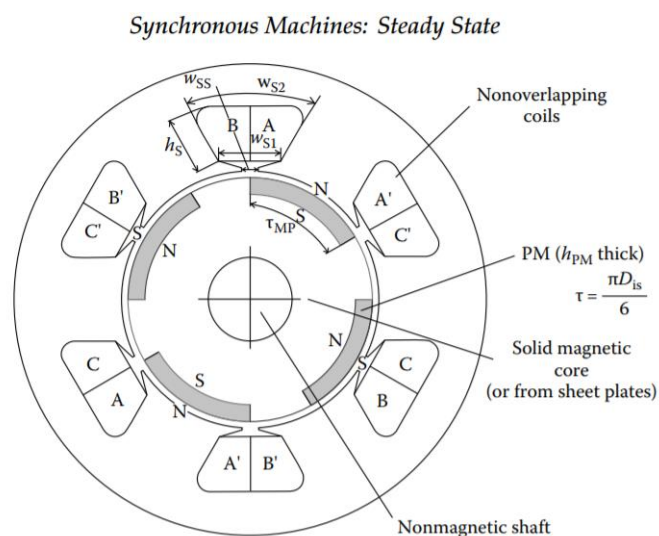


Figura 35 PMSM con 6 slot y 4 polos [17]

Por lo tanto, sustituyendo los valores calculados en la ecuación (2), se puede obtener el valor de flujo máximo a través de los imanes permanentes:

$$\Psi_{max} = 0,827 \cdot 0,0338 \cdot 0,0646 \cdot 2n_c \rightarrow \Psi_{max} = 0,00361 \cdot n_c \quad (24)$$

El par cuando $I_d=0$ y $I_q=0$ es el siguiente:

$$T_{eb} = 3 p_1 \frac{\Psi_{max}}{\sqrt{2}} I_b \quad (25)$$

Combinando la ecuación (2) con la ecuación (25), se obtiene la siguiente expresión (26):

$$T_{eb} = 3 p_1 \frac{0,00361 n_c}{\sqrt{2}} I_b \quad (26)$$

$$n_c \cdot I_b = \frac{T_{eb} \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot p_1 \cdot 0,00361} = \frac{4,24 \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot 2 \cdot 0,00361} \rightarrow n_c \cdot I_b = 276,79 \text{ A}$$

A.III.3 Dimensionado del tamaño de la ranura del estátor

Hay 2 bobinas por cada ranura, por lo que el área activa de la ranura del estátor se calcula mediante la ecuación (27):

$$A_{co} = \frac{2 \cdot n_c \cdot I_b}{k_{fill} \cdot j_{cob}} = \frac{2 \cdot 276,79}{0,4 \cdot 6,5 \cdot 10^6} \rightarrow A_{co} = 2,129 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (27)$$

Siendo el valor de la densidad $j_{cob} = 6,5 \text{ A/mm}^2$ y el factor $k_{fill} = 0,4$ el valor de área activa de la ranura del estátor es de $2,129 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

A.III.4 Parámetros de la máquina

A.III.4.1 Resistencia

La resistencia se calcula a través de la ecuación (3) que se ha explicado previamente:

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_{turn} 2 n_c^2}{(n_c I_b / j_{co})} \quad (28)$$

Siendo:

$$l_{turn} = 2 (l_{stack} + 1,25 \tau_s) = 2 (0,0646 + 1,25 \cdot 0,0338) = 0,2137 \text{ m}$$

A continuación se sustituye en la ecuación (3) y se calcula la resistencia de la máquina:

$$R_s = 2,3 \cdot 10^{-8} \frac{0,2137 \cdot 2 n_c^2}{(276,79/6,5 \cdot 10^6)} = 2,308 \cdot 10^{-4} n_c^2$$

A.III.4.2 Pérdidas en el cobre

Una vez calculada la resistencia se puede calcular las pérdidas de cobre para el par base (T_{eb}) (29):

$$P_{cob} = 3 R_s I_b^2 \quad (29)$$

$$P_{cob} = 3 \cdot 2,308 \cdot 10^{-4} (n_c \cdot I_b)^2 = 3 \cdot 2,308 \cdot 10^{-4} \cdot 276,79^2 \rightarrow P_{cob} = \mathbf{53,057 \text{ W}}$$

A.III.4.3 Eficiencia

A continuación, se va a calcular la eficiencia a potencia y velocidad base, despreciando tanto las pérdidas del hierro como las mecánicas (30):

$$\eta_b = \frac{P_b}{P_b + P_{cob}} = \frac{800}{800 + 57,057} \rightarrow \eta_b = \mathbf{93,34 \%} \quad (30)$$

Una vez calculada la eficiencia, se puede calcular el factor de potencia a través de la fórmula (31):

$$\cos \varphi = \frac{P_b}{\eta_b P_b} \rightarrow \cos \varphi = 0,96 \quad (31)$$

A.III.4.4 Inductancia

La inductancia de fase comprende la inductancia principal (L_m), la inductancia de fuga (L_{s1}) y la inductancia de acoplamiento (L_{12}), se calcula como se ha calculado previamente mediante la ecuación (32).

$$L_m = 2 n_c^2 \mu_0 \frac{\tau_s - b_{os}}{h_{pm} + g} l_{stack} \quad (32)$$

$$L_m = 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} n_c^2 \frac{(0,0338 - 0,002)}{2 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3}} 0,0646 \rightarrow L_m = \mathbf{2,0641 \cdot 10^{-6} n_c^2}$$

La inductancia de acoplamiento se puede relacionar con la inductancia principal (33):

$$L_{12} \approx -\frac{L_m}{3} \quad (33)$$

La inductancia de fuga se puede relacionar con la inductancia principal mediante la siguiente relación (34):

$$L_{s1} = 0,3 L_m \quad (34)$$

La inductancia síncrona se puede calcular mediante la siguiente fórmula (35):

$$L_s = L_m - L_{12} + L_{s1} L_s = L_m - \frac{L_m}{3} + 0,3 L_m = \frac{2,9 L_m}{3} \rightarrow L_s = 3,302 \cdot 10^{-6} n_c^2 \quad (35)$$

A.III.4.5 Número de vueltas por bobina

La frecuencia a la velocidad base se calcula mediante la ecuación (36):

$$f_b = n_b p_1 = \frac{1800}{60} \cdot 2 = 60 \text{ Hz} \quad (36)$$

Para calcular los siguientes apartados, es importante en el Diagrama fasorial a velocidad base Figura 36 a) (control de I_q , $I_d=0$) y en diagrama fasorial a velocidad máxima ($i_d < 0$) que se puede ver en la Figura 36 b).

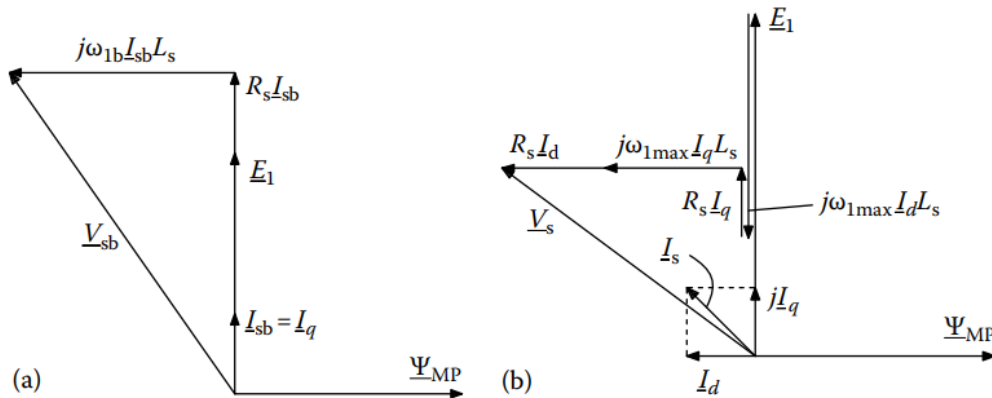


Figura 36 a) Diagrama fasorial a velocidad base (control de I_q , $I_d=0$); b) Diagrama fasorial a velocidad máxima ($i_d < 0$) [17]

A continuación, se calcula la E_1 (RMS) usando la ecuación (37).

$$E_1 = \frac{\omega_{1b} \Psi_{max}}{\sqrt{2}} \quad (37)$$

$$E_1 = \frac{2 \pi f_b \Psi_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \pi \cdot 60 \cdot 0,00361 n_c}{\sqrt{2}} \rightarrow E_1 = 0,962 n_c$$

Fijándonos en la tensión máxima calculada inicialmente (ecuación (20)) y el valor de la ecuación (37), se puede despejar el valor de n_c a través de la siguiente ecuación (38).

$$V_{ph\ max} = \sqrt{(E_1 + R_s I_b)^2 + (\omega_{1b} L_s I_b)^2} \quad (38)$$

$$V_{ph\ max} = 1,14 n_c = 21,6 \rightarrow n_c = 18,97 \text{ vueltas/bobina}$$

Sabiendo el número de vueltas por bobina, se puede calcular la corriente base por cada fase mediante la ecuación (39):

$$I_b = \frac{I_b n_c}{n_c} = \frac{159,52}{18,97} \rightarrow I_b = 8,41 \text{ A} \quad (39)$$

La potencia aparente se puede calcular mediante (40):

$$S_n = 3 V_{ph\ max} I_b = 3 \cdot 21,6 \cdot 8,41 \rightarrow S_n = 545,2 \text{ VA} \quad (40)$$

Para mantener la potencia máxima, se calcula el par necesario (41):

$$T_{e\ max} = \frac{P_b}{2 \pi n_{max}} = \frac{800}{2 \pi n_{max}/60} \rightarrow T_{e\ max} = 1,364 \text{ Nm} \quad (41)$$

Para alcanzar ese par, la corriente $I_{q\ max}$ se calcula como (42):

$$I_{q\ max} = \frac{T_{e\ max}}{T_{eb}} I_b \rightarrow I_{q\ max} = 5,04 \text{ A} \quad (42)$$

A continuación, se calcula la I_d necesaria para alcanzar el par necesario (43):

$$I_d = \sqrt{I_b^2 - I_{q\ max}^2} \rightarrow I_d = 6,72 \text{ A} \quad (43)$$

Por último, se va a calcular Voltaje a velocidad máxima (44):

$$V_s = \sqrt{(E_1 + R_s I_q - \omega_{1b} L_s I_b)^2 + (R_s I_d + \omega_{1b} L_s I_q)^2} \rightarrow V_s = 14,25 \text{ V} \quad (44)$$

Comprobación del voltaje: $V_s(14,25) < V_{ph\ max}(21,6)$ por lo que el motor puede proveer potencia constante.

Anexo IV: Planta en Matlab

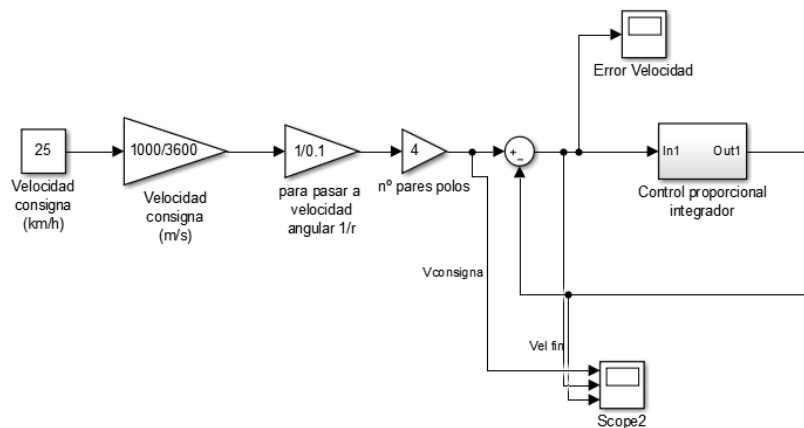


Figura 37 Velocidad consigna, velocidad final, error de velocidad

La velocidad consigna es la velocidad que yo quiero alcanzar, está expresada en km/h y el valor es de 25 km/h que es la velocidad legal que se permite en España por la legalidad vigente. Esa velocidad de 25 km/h se pasa a SI (m/s). Además, esa velocidad lineal si se divide entre el radio de la rueda, se obtiene la velocidad angular. Por último, se multiplica por 4, que es el valor de pares de polos del motor.

Se realiza la resta de la velocidad (angular) consigna menos la velocidad real angular del patín y de esta forma se obtiene el error de velocidad del patín (y este resultado se muestra en una pantalla mediante el un *scope*). Tanto la velocidad consigna, como la velocidad real como el error de velocidad se representan en el *scope 2*.

Por último, en la imagen que aparece a continuación se muestra el control seleccionado, que será el control PI, el control *fuzzy* o el control *neural* en función del tipo de control que se ha decidido analizar y que a su salida se obtiene la variable de par.

A continuación se van a mostrar 3 imágenes en las que se muestra la planta analizada con los 3 tipos de control usados.

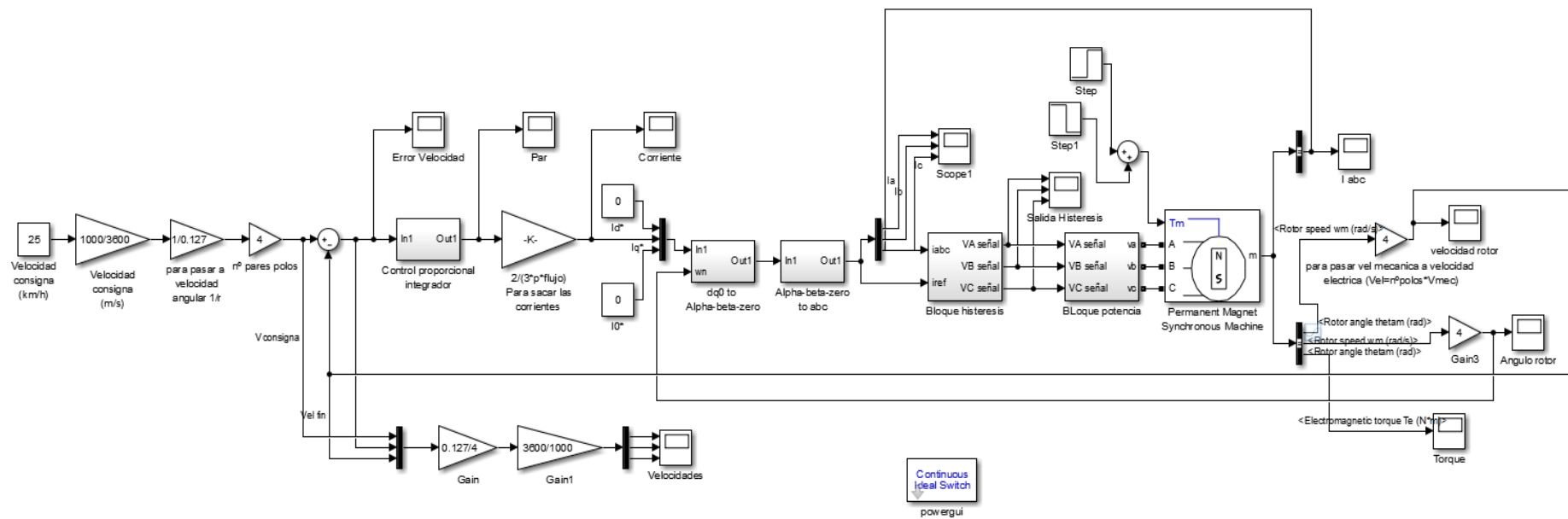


Figura 38 Planta en Matlab con control proporcional integral

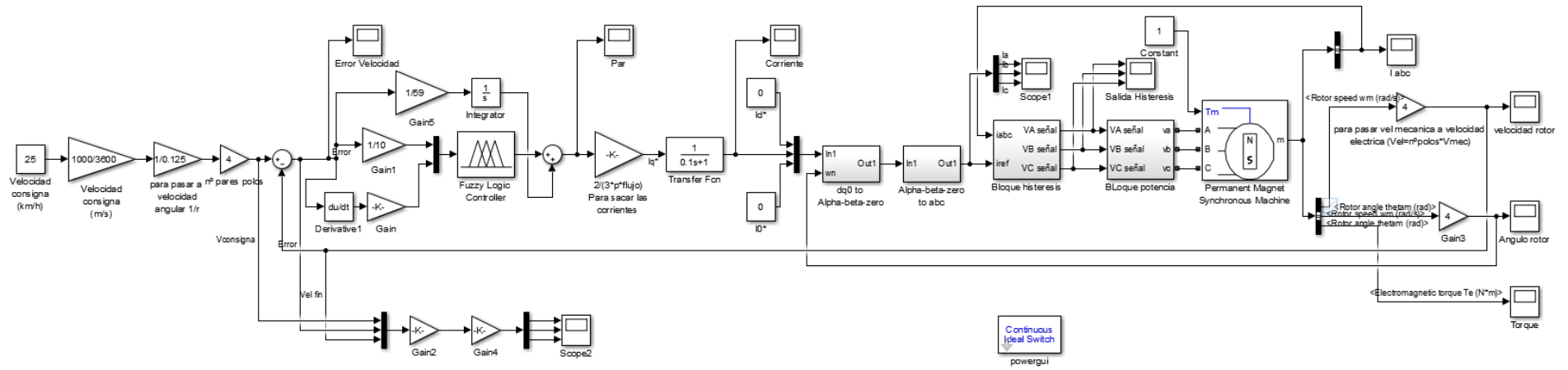


Figura 39 Planta en Matlab con control fuzzy con integral

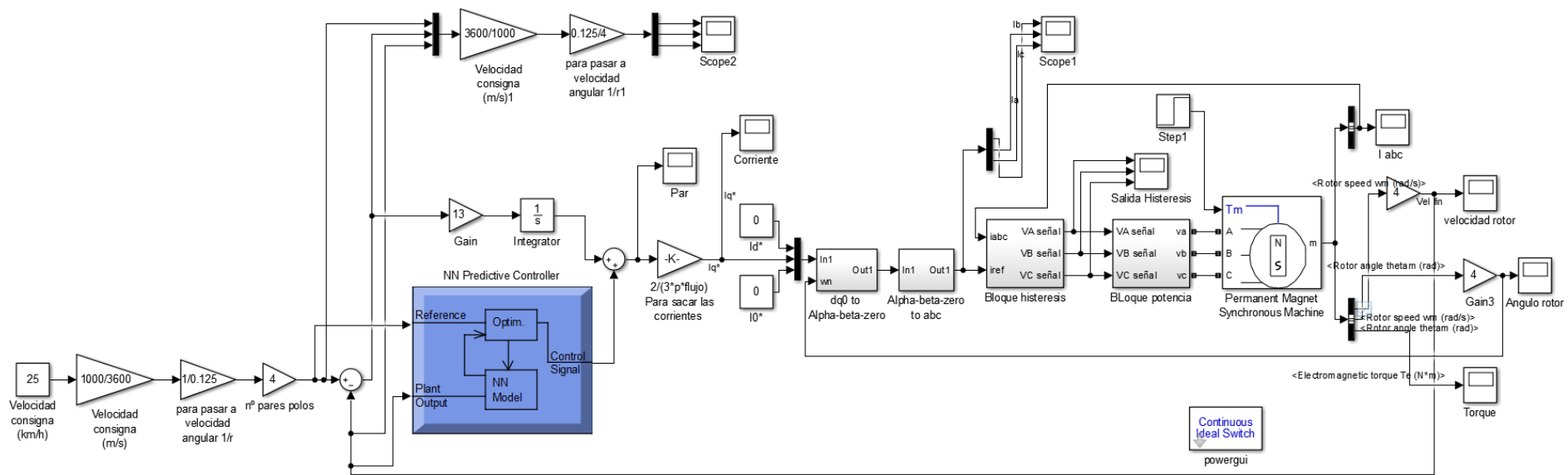


Figura 40 Planta en Matlab con control neural

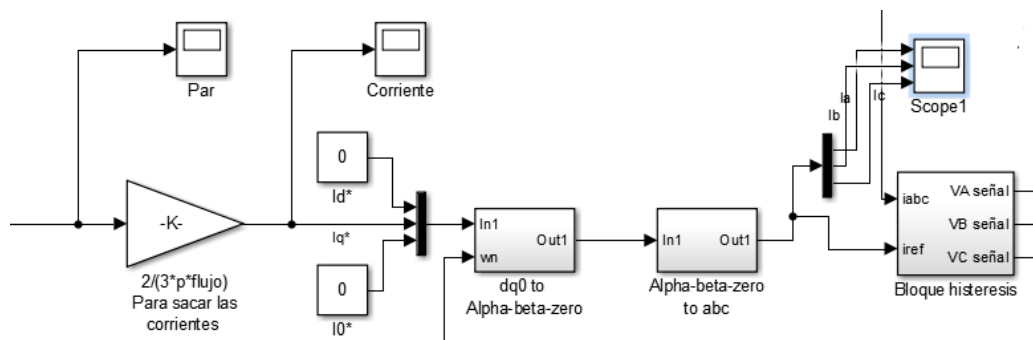


Figura 41 Par, corrientes, dq0 to Alpha-beta-zero to abc y bloque de histéresis

En la Figura 41; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra lo siguiente:

Se muestra el valor obtenido después de aplicar el control a través del scope de par. A continuación, se multiplica el par por $2/3$ y se divide entre el flujo y entre el número de pares de polos para obtener la corriente que llamaremos I_q^* .

Luego se pasará de corrientes en los ejes $dq0$ a corrientes en los ejes $Alpha-beta-zero$ (Transformada de Clarke) y de estos a otros ejes abc (Transformada de Park) para obtener las corrientes I_a , I_b e I_c (Se puede ver la corriente trifásica en el scope 1).

Por último, a la derecha de la imagen aparece el bloque de histéresis que convierte las corrientes I_a , I_b e I_c en tensiones V_a , V_b y V_c (en la imagen A.VI se ve con más detalle).

Las transformadas de Clarke y Park se utilizan habitualmente en el control de campo orientado de máquinas de CA de tres fases.

A continuación se va a explicar con detalle la transformada de Clarke y de Park las cuales se pueden usar gracias a que los vectores especiales de cada uno de los devanados del estátor (x_a , x_b y x_c) se puede escribir en función de las componentes real x_α e imaginaria x_β en un sistema de ejes cartesianos ortogonales α y β fijos ligados al estátor. Este vector puede ser referido a la corriente, a la tensión y al flujo magnético.

A.IV.1 Transformada de Park o D-Q

La transformada de Park o d-q convierte las componentes " $\alpha\beta$ " del sistema trifásico ($\alpha\beta0$) a otro sistema de referencia "dq0".

- El objetivo de la transformada de Park consiste en la transformación de ejes móviles a ejes fijos.
- La transformada de Park inversa convierte las componentes de un sistema de referencia “dq0” a un sistema trifásico “αβ0”.

A continuación, se incluye una Figura 42 en la que aparece ese cambio de coordenadas, denominada Transformada de Park y Transformada de Park inversa.

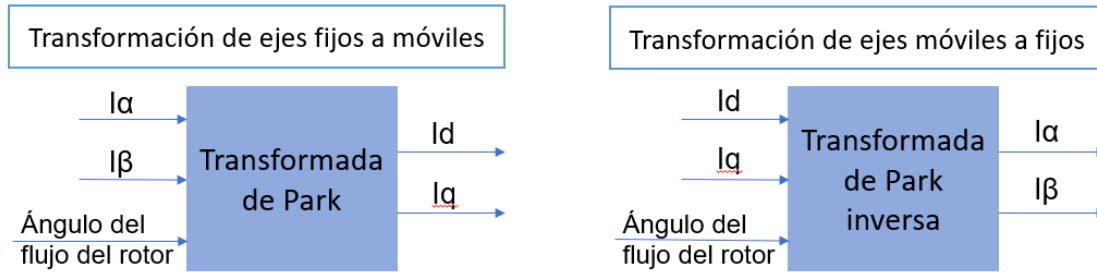


Figura 42 Transformada de Park (izda) Transformada de Park inversa (dcha..)

En la Figura 43 se puede ver como se pasa de la corriente en ellos ejes dq0 a la corriente en los ejes *Alpha-beta-zero* a través de la transformada de Park inversa, cuyo objetivo se centra en eliminar la dependencia al ángulo del sistema.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix}$$

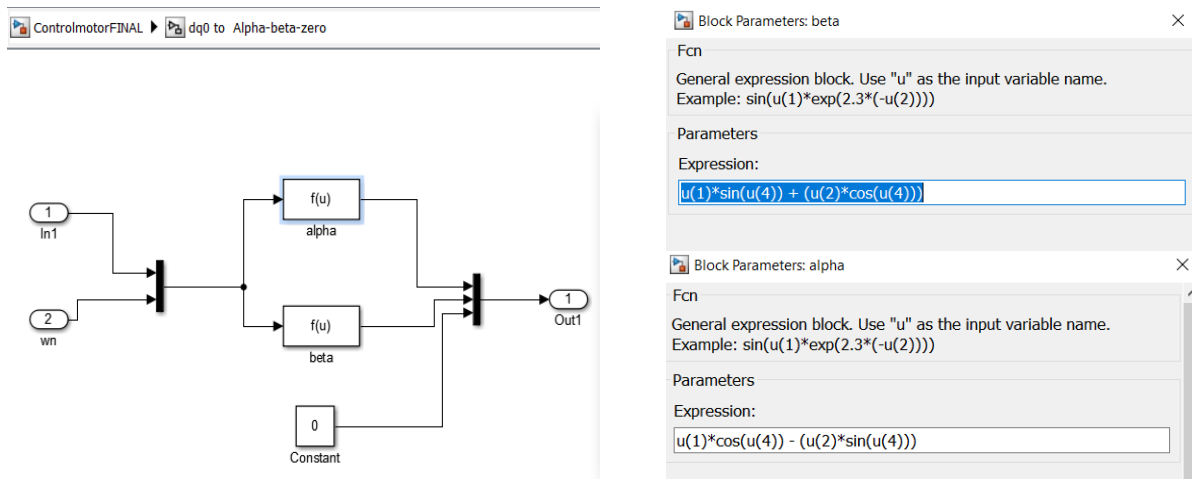


Figura 43 Transformada de Park en Matlab

A.IV.2 Transformada de Clarke

La transformada de Clarke permite convertir las componentes de un sistema trifásico abc en un sistema estacionario de dos variables ($\alpha\beta$).

En la imagen que aparece a continuación se puede ver la transformada de Clarke, en la que se convierte de un sistema trifásico abc en un sistema estacionario de dos variables ($\alpha\beta$).

La transformada de Clarke Inversa, convierte las componentes de un sistema estacionario de dos variables $\alpha\beta$ a un sistema trifásico abc .

A continuación, en la Figura 44 se representa este cambio de coordenadas, denominada Transformada de Clarke y Transformada de Clarke inversa.



Figura 44 Transformada de Clarke (izda). Transformada de Clarke inversa (dcha.)

A continuación, en la Figura 45 se muestra las ecuaciones usadas en Matlab para pasar la corriente de los ejes $Alpha$ - $beta$ (componentes en un marco estacionario ortogonal) a los ejes abc (componentes del dominio del tiempo) a través de la transformada de Clarke inversa.

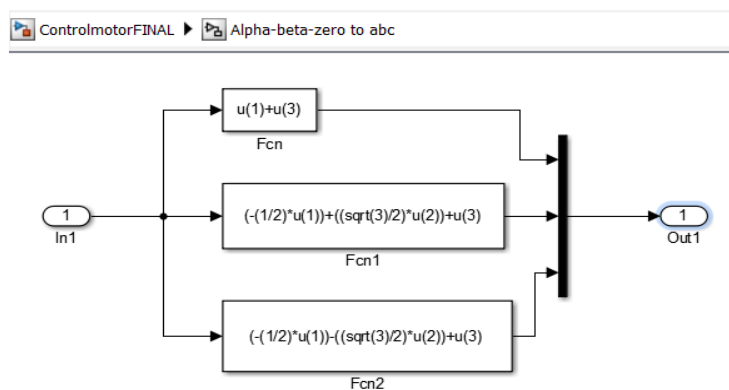


Figura 45 Transformada de Clarke

A continuación, se muestra en bloque de histéresis. En la Figura 46 se puede ver como se obtiene la tensión en los ejes abc (V_a , V_b y V_c) en función de una comparación de las intensidades de entrada (en las imágenes siguientes y párrafos siguientes se explica como se hace esta comparación para obtener la salida de tensión en los ejes abc).

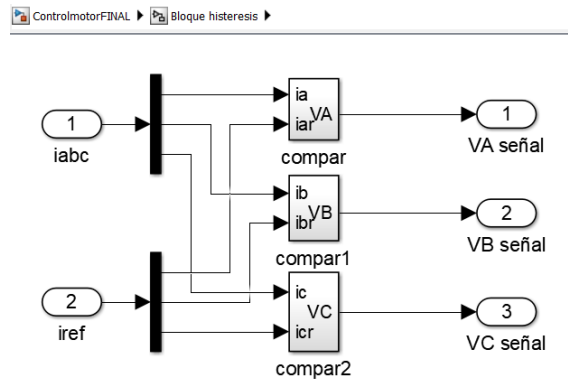


Figura 46 Esquema general del bloque de histéresis

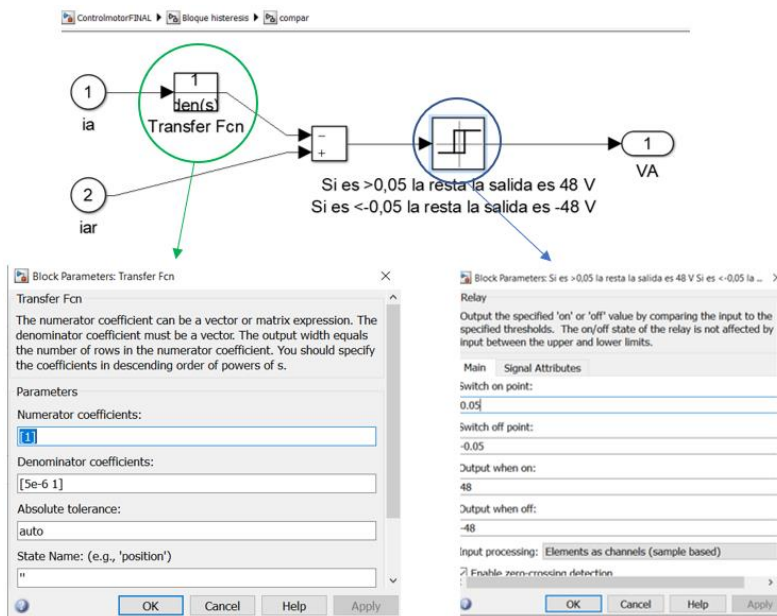


Figura 47 Función de transferencia (izda) y Comparación por histéresis (dcha..)

En la Figura 47 se puede apreciar que se ha definido el Switch on point (es decir el punto de cambio a encendido) en 0,05 (es decir si la resta de las intensidades es mayor de 0,05 la salida será de 48 V) y por el contrario se ha definido el Switch off point (es decir el punto de cambio a apagado) en -0,05 (es decir si la resta de las intensidades es menor de -0,05 la salida será de -48 V).

Además, también se puede apreciar que la comparación se hace restando las intensidades referencia que proceden de las intensidades que se han obtenido a través de las transformadas de Clark y de Park, y las intensidades a, b y c que provienen de la velocidad de salida del patín.

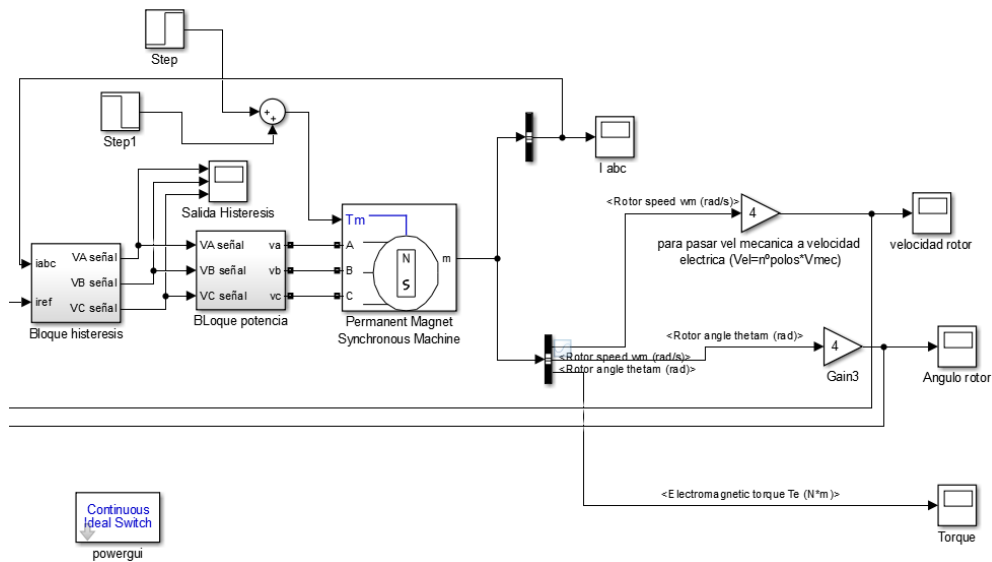


Figura 48 Bloque de potencia, motor síncrono de imanes permanente y estado final de la planta

En la Figura 48 se muestran los siguientes bloques:

El bloque de potencia en el que entra una señal y la salida es una tensión real. Este proceso se realiza haciendo una etapa de conversión de potencia. Este bloque contiene una etapa inversora trifásica (compuesta por 6 MOSFET) que pasa la tensión en corriente continua, que tiene un valor de 48 V que da la batería del patín, a una tensión en corriente alterna (V_a, V_b y V_c de potencia).

También se muestra el motor síncrono de imanes permanentes al que entran dos señales externas (step).

Por último, en la parte derecha de la imagen se muestra las salidas del sistema en el que se muestran intensidades, velocidad del rotor y el ángulo y el par del motor.

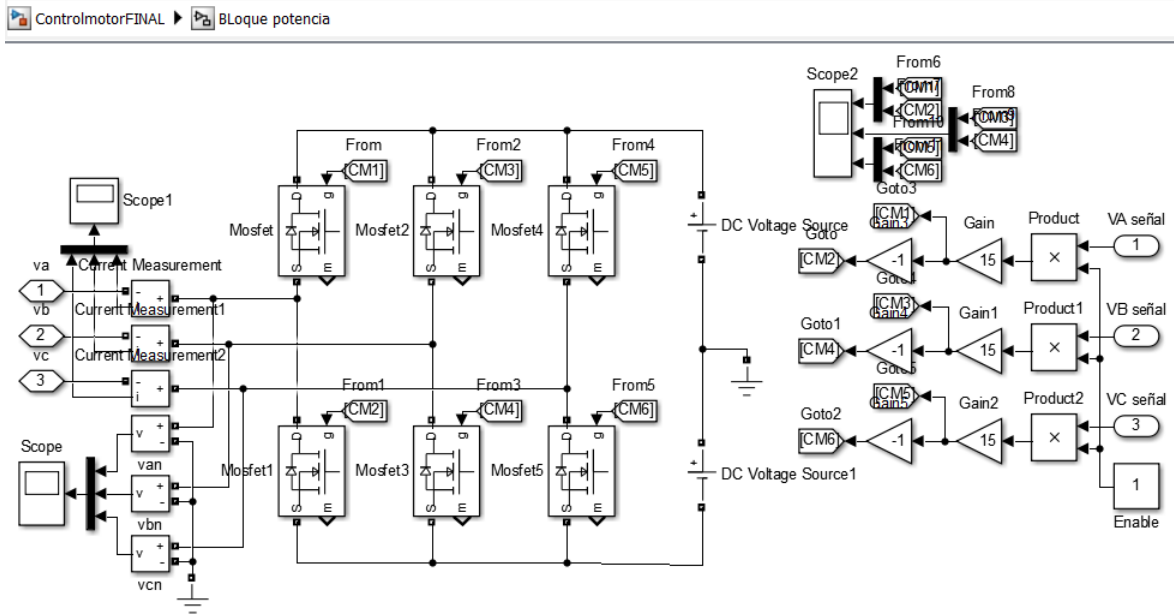


Figura 49 Etapa de conversión de potencia

Se muestra en la Figura 49 el bloque de potencia en el que entra V_a señal, V_b señal y V_c señal y sale v_a , v_b y v_c .

Para hacer esta transformación se cogen 6 señales (CM1, CM2, CM3, CM4, CM5 y CM6) que son las señales con una ganancia positiva o negativa que se obtienen gracias al bloque de histéresis.

Esas ganancias positivas o negativas se introducen en forma de señal en la puerta de los 6 mosfet que se han seleccionado para realizar la etapa inversora.

También se han añadido 2 pantallas de visualización a la salida de la etapa inversora trifásica en la que se muestra la tensión de salida v_a , v_b y v_c (Scope1) y la tensión de fase a neutro (v_{an} , v_{bn} y v_{cn}).

Además aparece las características que se han definido del motor síncrono de imanes permanentes.

Además aparece un step negativo y otro positivo para analizar cómo se comporta la planta cuando de pido más par cuando estoy acelerando (escalón positivo) y cómo se comporta la planta cuando estoy solicitando un par menor como cuando quiero frenar (escalón negativo).

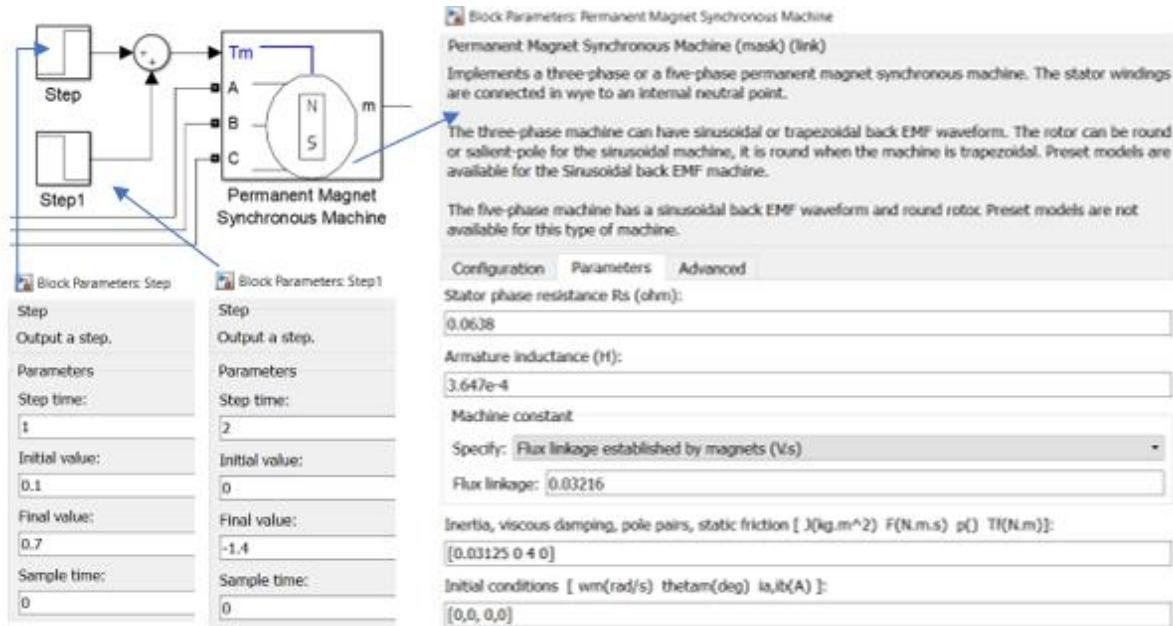


Figura 50 Motor y acciones externas

A.IV.3 Cálculo de la inercia del sistema

A continuación, se va a calcular la inercia del patín y del usuario del patín, teniendo en cuenta que la persona que va encima del patín soy yo. Para ello, lo primero es saber hacer el cálculo de las inercias de cada una de las partes que componen la planta. A continuación, en la Figura 51 aparece todas las inercias para el cálculo de las siguientes figuras geométricas.

Tabla de Momentos de Inercia		
	$\frac{1}{2}MR^2$	
	$\frac{3}{2}MR^2$	
	MR^2	
	$\frac{1}{2}MR^2 + \frac{1}{12}M\omega^2$	
	$\frac{2}{5}MR^2$	
	$\frac{7}{5}MR^2$	
	MR^2	
	$\frac{1}{2}M(a^2 + b^2)$	
	$\frac{1}{12}ML^2$	
	$\frac{1}{12}ML^2$	
	$\frac{1}{3}ML^2$	

Figura 51 Tabla momentos de inercias [29]

A continuación, para el cálculo de las inercias, se usan las fórmulas que se han recuadrado en la Figura 51. En la 4ª columna de la Tabla 9 se introduce este cálculo.

Tabla 9 Cálculo de momentos de inercia

	L (m)	m (kg)	I_0 (kg.m ²)	M.d ²	I_{TOTAL} (kg.m ²)
Tabla pies	0,47	12	0,88	0,046	0,93
Rueda delantera	0,125	2	0,015	0,70	0,72
Rueda trasera	0,125	4	0,031	0	0,03
Palo + manillar	0,87	4	1,01	1,41	2,42
Persona	1,68	58	54,56	3,20	57,77
					61,88015

Una vez calculado las inercias, estas hay que pasarlas todas a la rueda trasera mediante el teorema de Steiner que dice lo siguiente:

$$I_{TOTAL} = I_0 + A d^2 \quad (45)$$

Siendo, I_0 la inercia del cuerpo y $A d^2$ el factor de corrección para pasar la inercia a la rueda trasera.

Anexo V: Resolución del 12 de enero de 2022 de la dirección general de Tráfico por la que se aprueba el manual de características de los vehículos de movilidad personal

Mediante esta resolución se establece que todos los vehículos de movilidad personal requerirán para poder circular por la ciudad el certificado de circulación que garantice el cumplimiento de los requisitos técnicos exigibles por la normativa nacional e internacional recogidos en su manual de características, así como su identificación [25].

Asimismo, define el manual de características de los vehículos de movilidad personal como el documento elaborado por el organismo autónomo Jefatura Central de Tráfico y aprobado mediante resolución de su titular, en el que se establecerán los requisitos técnicos que los vehículos de movilidad personal deben cumplir para su puesta en circulación, la clasificación de los mismos, los procesos de ensayo para su certificación y los mecanismos que se emplearán para su fácil identificación [25].

Los vehículos de movilidad personal tienen que cumplir con los siguientes requisitos que se incluyen en la Tabla 10.

Tabla 10 Parámetros exigibles en los VMP de transporte personal [25]

VMP de transporte personal		
Velocidad máxima	Entre 6 y 25 km/h	
Potencia nominal ⁽³⁾ por vehículo.	Vehículos sin auto-equilibrado: ≤ 1.000 W	Vehículos con auto-equilibrado ⁽⁴⁾ : ≤ 2.500 W
Masa en orden de marcha ⁽⁵⁾ .	< 50 kg	
Longitud máxima.	2.000 mm	

⁽³⁾ La potencia nominal deberá ser declarada por el fabricante del motor y medida según el apartado 4.2.14 de la norma EN 15194:2018, o alternativamente en el Reglamento n.º 85 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) - Disposiciones uniformes relativas a la homologación de motores de combustión interna o de grupos motopropulsores eléctricos para la propulsión de vehículos de motor de las categorías M y N en lo que respecta a la medición de la potencia neta y la potencia máxima durante 30 minutos de los grupos motopropulsores eléctricos (DO L 323 de 7.11.2014, pág. 52).

⁽⁴⁾ Al menos el 60% de esta potencia se debe dedicar al sistema de autoequilibrado.

⁽⁵⁾ Masa en orden de marcha: masa del vehículo tal y como se define en el artículo 5 del Reglamento (UE) n.º 168/2013.

Anexo VI: Control *fuzzy*

La lógica difusa o *fuzzy* tiene como objetivo expresar el conocimiento común, el cual está regido por la teoría de conjuntos difusos y funciones de pertenencia asociados a estos. Este control pretende relacionar la sintaxis lingüística (la cual es de mayor entendimiento para las personas), con datos numéricos que aportan mayor precisión. La aplicación de la lógica difusa al control de problemas no lineales presenta grandes ventajas debido a su flexibilidad y tolerancia con las imprecisiones [19].

La mayor ventaja de la lógica difusa es que a medida que la complejidad de un sistema aumenta, disminuye la capacidad para hacer afirmaciones precisas, por lo que la lógica difusa es un método muy adecuado cuando los datos no son precisos.

Lofti Asker Zadeh fue un matemático, científico, informático e ingeniero eléctrico, famoso por introducir la lógica difusa en 1965 [14,19].

Looney señaló en 1998 que los algoritmos difusos tradicionales no pueden predecir el comportamiento futuro, por lo que propuso un modelo basado en redes de Petri, que simula redes neuronales mediante algoritmos difusos, en el sentido de aprender y ejecutar la lógica de predicción [20,21].

En 1997, Bentalba, Hajjaji y Rachid propusieron utilizar un sistema difuso para estabilizar la respuesta de dos sistemas lineales para controlar un robot móvil [15].

En 2004, Yang analizó robots incompletos y formuló un conjunto de reglas difusas basadas en el método directo de Lyapunov. A través de esto, Yang pudo obtener el ángulo de rotación requerido y un seguimiento confiable de la trayectoria [16].

En 2008, Mazari y Kumar compararon la heurística de búsqueda global, el algoritmo genético, la optimización del enjambre de partículas, el recocido simulado, la búsqueda de patrones generalizados, el algoritmo genético híbrido y Nelder-Mead y la búsqueda de patrones generalizados para ajustar el control difuso PID del dispositivo robótico PUMA 560. También en 2008, Alavandar y Nigam llevaron a cabo un estudio sobre el uso del control difuso PD + I para controlar las articulaciones de los robots PUMA [24,25].

En 2011, Piltan, Sulaiman, Gavahian, Soltani y Roosta aplicaron tecnología de control difuso al robot PUMA con tres grados de libertad [17].

La lógica difusa (en inglés *fuzzy logic*) es una lógica paraconsistente (consiste en una lógica que estudia y desarrolla sistemas lógicos que son tolerantes a la inconsistencia) que identifica valores verdaderos entre 0 y 1 de forma gradual. La lógica difusa hace que el sistema tome decisiones de mayor o menor intensidad en función del grado de cumplimiento de una premisa.

Este control tiene gran popularidad debido a que no hay necesidad de modelado matemático de procesos o sistemas. Es por ello, que el control difuso es atractivo en procesos con alta complejidad matemática [1,19].

Este control tiene gran popularidad debido a que no hay necesidad de modelado matemático de procesos o sistemas. Se han reportado aplicaciones exitosas en todo el mundo. Pero principalmente en Japón, con soluciones pioneras desde los años 80 [1,19].

Por todo ello, el uso del control difuso es atractivo en:

- Procesos con alta complejidad matemática.
- Procesos con alta incertidumbre.
- Procesos con comportamiento no lineal.
- Procesos en los que no se dispone de un modelo matemático preciso.

A.VI.1 Etapas del control difuso

El control difuso se compone de 3 etapas:

A.VI.1.1 Etapa de entrada

En esta etapa se realiza el mapeo de sensores u otras entradas del sistema.

A.VI.1.2 Etapa de procesamiento (fuzzificación)

La fuzzificación consiste en convertir una variable real de entrada en un grado de pertenencia que cuantifica el grado de posesión en concordancia con dicha variable [14].

Se basa en el procesamiento de una combinación de reglas lógicas con la nomenclatura de "SI-ENTONCES" (ej: Si temperatura exterior es "frio extremo", entonces "encender calefacción al máximo") [14].

La forma más habitual de las funciones de pertenencia (o funciones de membresía) es triangular (que es la forma de función de pertenencia que se ha usado en este trabajo),

sin embargo, también se usan otras como son las curvas trapezoidales y de campana. Por norma general, el número de curvas que se considera apropiadas para cubrir el rango requerido es de tres a siete (es este trabajo se han elegido cinco curvas).

A.VI.1.3 Etapa de salida (defuzzificación)

La defuzzificación es el proceso inverso a la fuzzificación, a través del cual se convierte un conjunto difuso de valores en un valor de salida numérico real.

El control difuso se caracteriza por tener muchas entradas y salidas. Estas entradas pueden combinarse con operadores difusos como son el “and”, “or” y “not”. Estas entradas pueden combinarse de varias formas como son [14]:

- Método de inferencia MAX-MIN: Se elige como valor de salida aquel para el cual la función característica del conjunto es máxima/mínima (No es un método óptimo debido a que el valor máximo de salida puede alcanzarse mediante varias entradas).

- Método del centroide o método del centro de masas: Es un método muy popular que combina el valor de las entradas para sacar un único valor de salida. Para determinar el valor de la salida, se determina el centro de gravedad de cada una de las entradas.

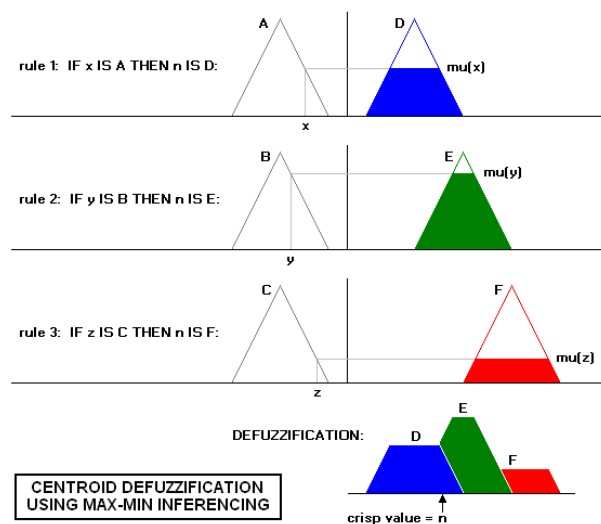


Figura 52 Método del centroide para defuzzificación usando interferencias max-min [32]

Como se puede ver a continuación, llamando a la función “Fuzzy.fis”, aparece una ventana en la que hay que en este caso concreto, se van a introducir 2 entradas (en el caso estudiado esas entradas son error de velocidad y tasa de variación del error) y hay una salida (que es la salida de la etapa de desfuzzificación).

Se toma la función triangular y se determinan los intervalos, intentando que los cortes de las 2 funciones de entrada estén aproximadamente en el 0,5. A continuación, se muestran imágenes en las que se puede apreciar las entradas u salidas del sistema, además de cuáles son las funciones que voy a tener.

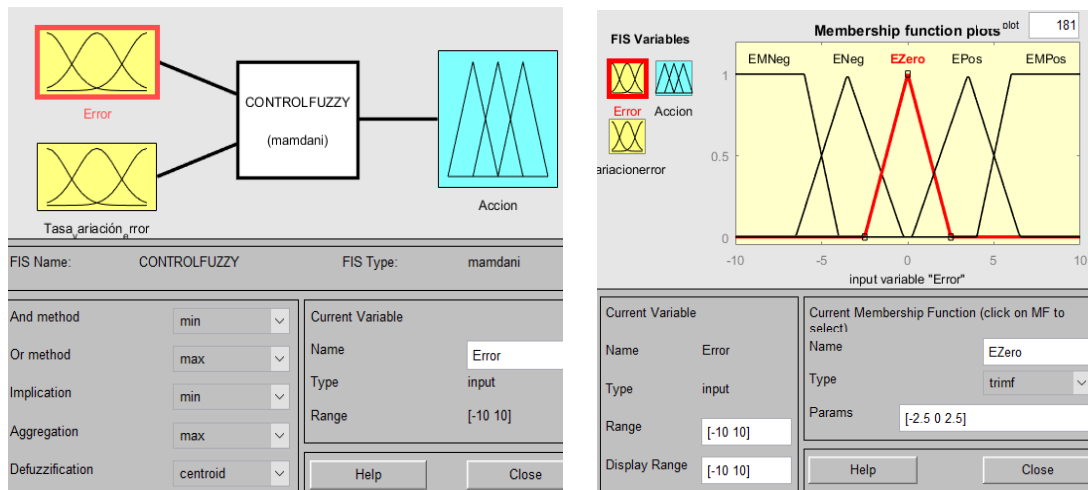


Figura 53 Llamada a la función Fuzzy.fis (izda.) Función de membresía del error de velocidad (dcha.)

Como se puede apreciar, el tramo central se intenta que sea más pequeño que el resto para intentar que el control difuso sea más exacto.

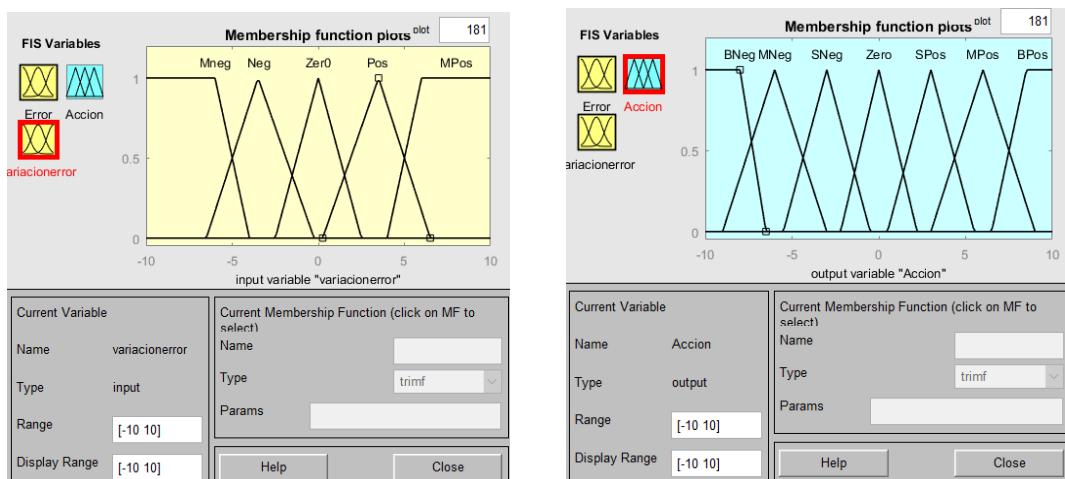


Figura 54 Función de membresía de la tasa de error de velocidad (izda.) Función de membresía de la acción o salida del control difuso (dcha.)

A continuación, se va a realizar la programación del control difuso, en la que se tiene 5 posibilidades de cada una de las dos entradas al sistema, por lo que el número total de combinaciones posibles será de 25 funciones.

Tabla 11 Combinación de entradas con la respuesta requerida del control difuso

Error/integral error	MNeg	Neg	0	Pos	MPos
EMNeg	NG	NG	NP	ZN	Z
ENeg	NG	NP	ZN	Z	ZP
EO	NP	ZN	Z	ZP	PP
EPos	ZN	Z	ZP	PP	PG
EMPos	Z	ZP	PP	PG	PG

Lo que se ha mostrado en la Tabla 11, se muestra a continuación en la Figura 55, en la que aparecen 11 de las 25 combinaciones posibles en función de las 2 entradas que entran al controlador difuso.

Por ejemplo, si el error es “ENeg” y la integral del error es “MNeg” la salida mostrará que la acción de salida del control será SNeg.

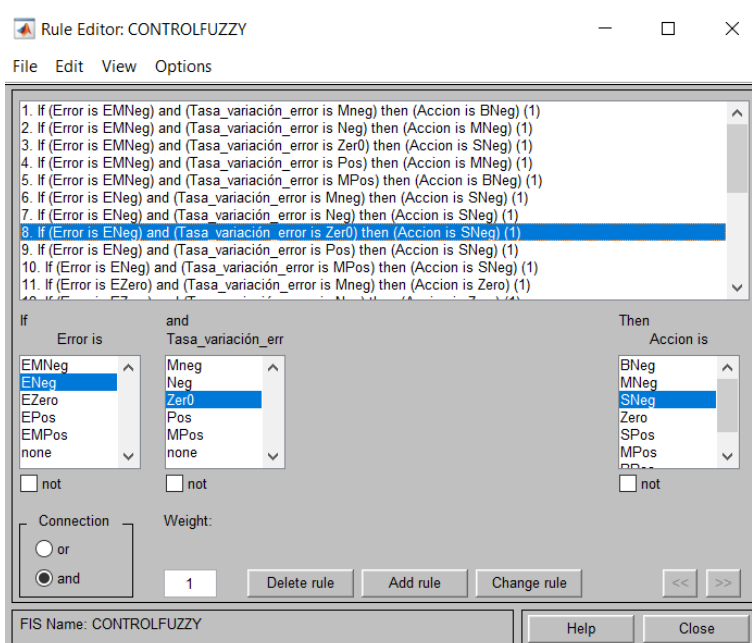


Figura 55 Programación reglas control difuso

¿Qué ocurre si se cumplen más de una condición a la vez?

Como se ha comentado en un párrafo previo, las entradas al sistema pueden combinarse con operadores difusos como son el “and”, “or” y “not”. Estas entradas pueden combinarse de varias formas como son [32]:

- Método de inferencia MAX-MIN: este método devuelve el valor de verdad generado por la premisa.

- Método del centroide o método del centro de masas: es un método muy popular que combina.

En la Figura 56 y en la Figura 57 se puede ver como se hace la combinación para aplicar el método del centroide del peso por el valor de pertenencia de la función de membresía, atendiendo a la ecuación siguiente [32] (46):

$$C = \frac{\int u z dz}{\int u dz} \quad (46)$$

Siendo:

- Z: el valor en el eje de la x de la función membresía de la entrada de la variable seleccionada.
- U: el valor en el eje de la y de la función membresía de la entrada de la variable seleccionada.

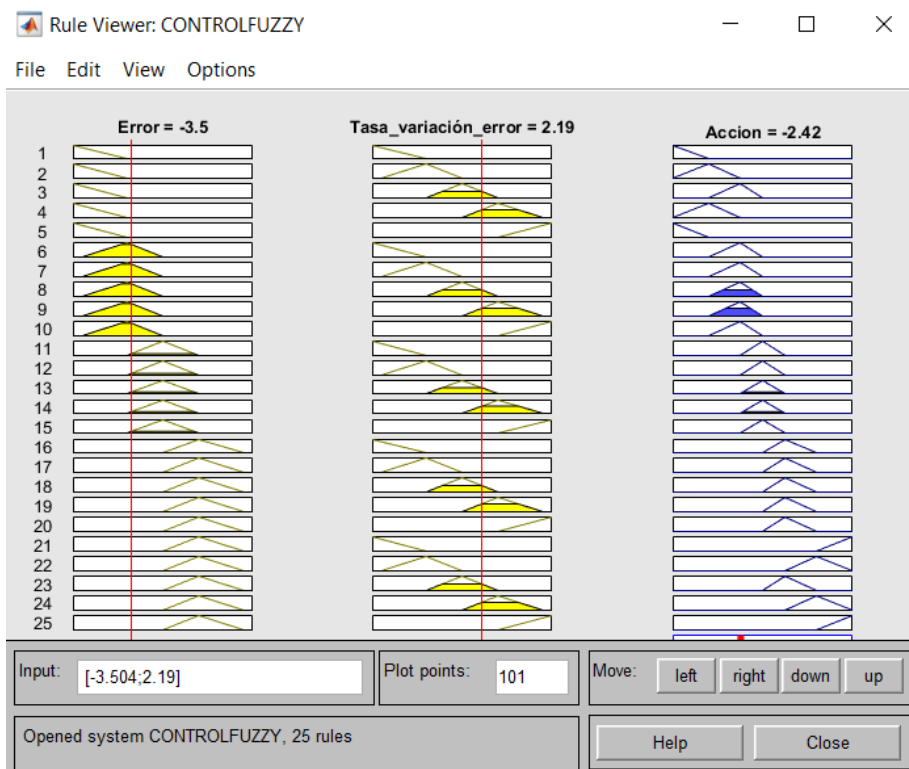


Figura 56 Visualización reglas control difuso

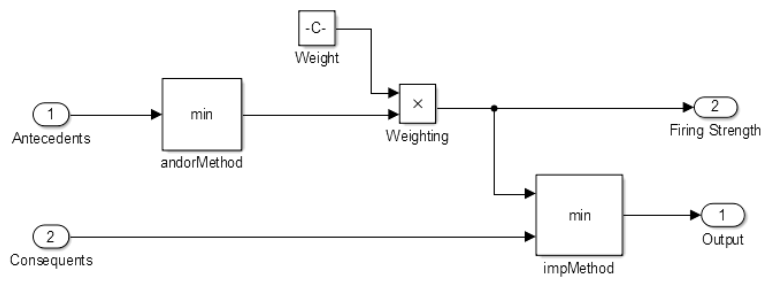


Figura 57 Aplicación del método del centroide del caso estudiado

En la Figura 58 puede apreciarse como la salida (etapa de defuzzificación) se ha realizado mediante el método del centroide que saca un único valor para las 2 entradas del sistema analizado.

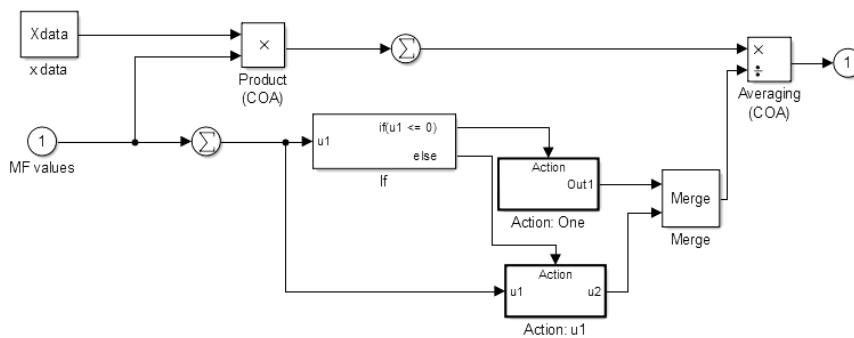


Figura 58 Método del centroide del caso estudiado

En la Figura 59 que se muestra a continuación se puede ver la salida del control difuso en función de las dos entradas expuestas.

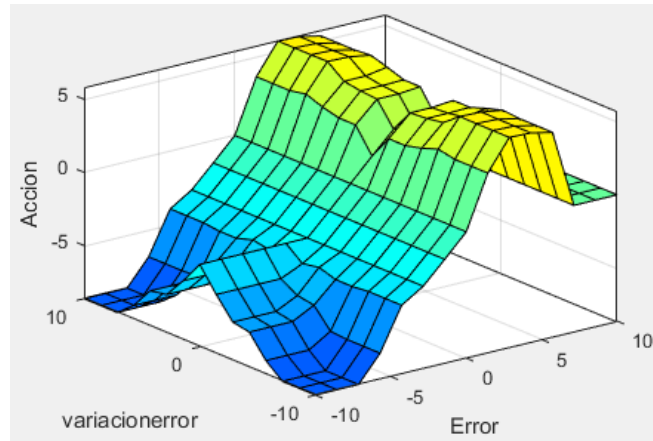


Figura 59 Visualización 3D reglas control difuso

Referencias

- [1] Katsuhiko Ogata "Ingeniería de control moderna" (1998) ISBN:970-17-0048-1
- [2] Z. Abidin, T. H. Soesilo and R. Ambarwati, "Electronic Speed Controller with fuzzy Logic and Load Cell for Electric Skateboard," 2021 International Electronics Symposium (IES), 2021, pp. 292-297
- [3] C. -H. Lin, Po-Hwa Chiang, Chi-Shin Tseng, Yi-Ling Liu and Mei-Yu Lee, "Hybrid recurrent fuzzy neural network control for permanent magnet synchronous motor applied in electric scooter," 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010, pp. 2175-2180, doi: 10.1109/ICIEA.2010.5515337.
- [4] D. Lv, Z. Zhang and W. Bian, "Study of Fuzzy PID Control of Outer-rotor Brushless DC Motor Used in Electric Vehicle," 2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/ASEMD.2018.8558994.
- [5] C. Jiefan, F. Yue and W. Hui, "Fuzzy Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor," 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, pp. 107-111, doi: 10.1109/FSKD.2009.39.
- [6] J. Ding, X. Jiao, W. Wang, Y. Gong and Z. Wang, "Fuzzy Control of Clutch during Mode Switching of Single-axis Parallel Hybrid Electric Vehicles," 2019 Chinese Control Conference (CCC), 2019, pp. 6663-6667
- [7] Y. Zhao, T. Zhang, T. Zhang and Q. Sun, "Robust fuzzy control for permanent magnet synchronous motor chaotic systems with uncertain parameters," 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2009, pp. 1340-1344
- [8] K. Sharma, A. Agrawal, S. Bandopadhyaya and S. Roy, "Fuzzy Logic Based Multi Motor Speed Control of Electric Vehicle," 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2019, pp. 1-5
- [9] J. Zhang, X. Wen and L. Zeng, "Research of parameter self-learning fuzzy control strategy in motor control system for electric vehicles," 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009, pp. 1-5

[10] B. -y. Xing, L. -y. Yu and Z. -k. Zhou, "Composite single neural PID controller based on fuzzy self-tuning gain and RBF network identification," The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 2014, pp. 606-611, doi: 10.1109/CCDC.2014.6852238.

[11] Rivas, Francklin & Rios, Addison & CASALES-ECHEVERRÍA, JEANETTE. (2001). Neural Network-based AutoTuning for PID Controllers. Neural Network World. 11.

[12] Ion Boldea, Lucian Tutelea "6.16 Preliminary Design Methodology of a 3-Phase PMSM by Example" en "Electric Machines, Steady State, Transients, and Design with Matlab" (2010, FL 33487-2742, International Standard Book Number: 978-1-4200-5572-6 (Hardback))

[13] Mathworks Help Center. Simulate Fuzzy Inference Systems in Simulink. https://es.mathworks.com/help/fuzzy/simulate-fuzzy-inference-systems-in-simulink.html#mw_f33abc3b-a3c9-4f31-b457-0e9c3b35fa51

[14] Castaño Giraldo, S. (10 de Abril) Control realimentado, control Fuzzy-Mandami-Simulink. Control-Automático-Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-fuzzy-mamdani-simulink/>

[15] S. Bentalba, A. El Hajjaji and A. Rachid. "Fuzzy control of a mobile robot: a new approach". Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 69-72. 1997

[16] P. Dassanayake, K. Watanabe, K. Kiguchi and K. Izumi. "Fuzzy behavior-based motion planning for the PUMA robot". Proceedings of Intelligent robots and systems. Vol. 3, pp. 1912-1917. 2000.

[17] Francisco Morata "Controlador Fuzzy de un Quadrotor". Universidad complutense, trabajo fin de master en sistemas inteligentes

[18] https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370401J-01/lvpidmain/fuzzy_controllers/

[19] Tibaduiza Burgos, Diego & Amaya, Ivan & Rodriguez, Silvia & Mejia, Nestor & Florez, Mario. (2011). Implementación de un Control Fuzzy para el Control Cinemático Directo en un Robot Manipulador. Ingeniare. 19. 312-322. 10.4067/S0718-33052011000300002.

- [20] C.G. Looney. "Fuzzy Petri Nets for RuleBased Decision making". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. Vol. 18, pp. 178-183. 1988.
- [21] W.A. Daxwanger and G.K. Schmidt. "Skill based visual parking control using neural and fuzzy networks". 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, pp. 1659-1664. 1995.
- [22] Productos Smartgyro (2 de Octubre de 2021) <https://Smartgyro.es/gama-pro/patinete-electrico-Smartgyro-speedway-v2.html>
- [23] Neumático todoterreno para patinete eléctrico Xiaomi M365 1S Pro, rueda caliente de 8,5 "para monopatín, cámara neumática [Imagen] (24 de enero de 2022). Aliexpress. <https://es.aliexpress.com/item/32821837142.html>
- [24] Patinete SkateFlash Echo - 350W 36V 10.4Ah, Ruedas 8.5-8", Aut. 35km, Suspensión, Freno Tambor [Imagen] (24 Enero 2022). Mi electro. <https://www.mielectro.es/patinete-skateflash-echo-8362071/#>
- [25] Resolución de 12 de enero de 2022, de la Dirección General de Tráfico, por la que se aprueba el Manual de características de los vehículos de movilidad personal (2022). Boletín Oficial del Estado, 18, de 21 de Enero de 2022, 6882 a 6915 https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-987
- [26] Benavides, L. (4 de Octubre de 2018). Si crees que el patinete eléctrico es algo nuevo, mira estas imágenes de hace 100 años. El Periódico. <https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20181004/monopatines-electricos-siglo-xx-7071427>
- [27] De Aragón, E. (10 de febrero de 2021). Aclaremos las novedades legislativas sobre vehículos de movilidad personal. Movilidad eléctrica. <https://movilidadelectrica.com/nueva-legislacion-vmp/>
- [28] Subway (27 de febrero de 2021) Origen e historia del patinete eléctrico <https://www.subway.es/blog/origen-e-historia-del-patinete-electrico/>
- [29] Rotación y Conservación de Energía <https://es.slideshare.net/wgerber/uach-bachillerato-lab-9-presentation>

[30] Design Neural Network Predictive Controller in Simulink

https://es.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-neural-network-predictive-controller-in-simulink.html?searchHighlight=predcstr&stid=srchtitle_predcstr_1

[31] D.J. Matich (Marzo de 2001), Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_ano/orientadora1/monografias/matich-redesneuronales.pdf

[32] Fuzzy control system (10 de Marzo de 2022)

https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system