



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN VEHÍCULO EQUILIBRISTA BASADO EN UNA RASPBERRY PI

Autor: Carmen Ladrón de Guevara Tapia

Director: Juan Luis Zamora Macho

Madrid

Agosto 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. _Carmen Ladrón de Guevara Tapia

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Construcción y diseño de vehículo equilibrista basado en Raspberry Pi, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE VEHÍCULO EQUILIBRISTA BASADO EN RASPBERRY PI
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017/2018. es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 31/08/2018

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.:

Fecha: 31/08/2018



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN VEHÍCULO EQUILIBRISTA BASADO EN UNA RASPBERRY PI

Autor: Carmen Ladrón de Guevara Tapia

Director: Juan Luis Zamora Macho

Madrid

Agosto 2018

Dedicado a mi familia por todo su apoyo a lo largo de estos años, a mi director por toda su ayuda y a todos mis compañeros por acompañarme durante esta carrera de fondo que finalmente hemos alcanzado.

Gracias.

CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN VEHÍCULO EQUILIBRISTA BASADO EN UNA RASPBERRI PI

Autor: Ladrón de Guevara Tapia, Carmen

Director: Zamora Macho, Juan Luis

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto pretende diseñar un robot de dos ruedas capaz de mantenerse en posición vertical para fines didácticos.

Primero, se ha realizado un estado del arte, en el que se ha hecho un análisis de los vehículos equilibristas que se encuentran actualmente en el mercado. Para este proyecto, el caso de estudio requería centrarse con énfasis en aquellos orientados a docencia ya que el objetivo del proyecto es sustituir a los ya existentes en los laboratorios de control de la universidad.

Posteriormente, se analizó cuál sería la estructura más adecuada para su estabilidad y se procedió a diseñar un prototipo en 3D con ayuda de SolidWorks. Para la estructura, se eligió el material conocido como policarbonato por diversos motivos. Entre estos, cabe destacar que es un material resistente, económico y estético. Paralelamente al diseño de la estructura se eligieron todos los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del sistema.

Una vez elegidos los componentes, se procedió a realizar el cableado de dichos componentes, la integración con el microprocesador y se comprobó que el conexionado funcionará correctamente.

Al acabar la etapa anterior, se realizó la etapa de software con su sistema de control de cabeceo, filtrado de todas las medidas y el filtro complementario como estimación de estado.

Para finalizar, se linealizó el modelo de la planta (vehículo equilibrista) y con el control de realimentación de estado y los filtros mencionados se observó en simulación un resultado adecuado.

CONSTRUCTION AND CONTROL OF A BALANCED VEHICLE BASED ON A RASPBERRI PI

Author: Thief of Guevara Tapia, Carmen

Director: Zamora Macho, Juan Luis

PROJECT SUMMARY

The present project aims to design a two-wheel robot capable of holding upright for teaching purposes.

First, a state of the art has been made, in which an analysis of the balancing vehicles that are currently on the market has been made. For this project, the case study required to focus with emphasis on those oriented oriented to teaching since the objective of the project is to replace those already existing in the control laboratories of the university.

Subsequently, it was analyzed which would be the most suitable structure for its stability and proceeded to design a prototype in 3D with the help of SolidWorks. For the structure, the material known as polycarbonate was chosen for various reasons. Among these, it should be noted that it is a resistant, economic and aesthetic material. Parallel to the design of the structure all the electronic components necessary for the operation of the system were chosen.

Once the components were chosen, the wiring of these components was carried out, the integration with the microprocessor was carried out and it was verified that the connection will work correctly.

At the end of the previous stage, the software stage was performed with its pitch control system, filtering all the measurements and the complementary filter as status estimation.

To finish, the model of the plant (equilibrist vehicle) was linearized and with the control of state feedback and the mentioned filters, an adequate result was observed in simulation.

ÍNDICE

ÍNDICE	18
ÍNDICE DE FIGURAS.....	20
ÍNDICE DE TABLAS.....	22
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	24
1. INTRODUCCIÓN	24
2. ESTADO DEL ARTE.....	26
2.1. VEHÍCULOS DE AUTO-BALANCEO PARA TRANSPORTE.....	26
2.2. VEHÍCULOS DE AUTO-BALANCEO PARA DOCENCIA.....	29
2.3. Conclusiones.....	32
3. MOTIVACIÓN.....	33
4. OBJETIVOS.....	33
5. RECURSOS NECESARIOS.....	33
5.1. SOFTWARE	33
5.2. HARDWARE	34
6. METODOLOGÍA DE TRABAJO	34
6.1. DESCRIPCIÓN.....	34
6.2. ETAPA DE SENSADO	35
6.2.1. Unidad de medición inercial (IMU).....	36
6.2.2. Giróscopo.....	37
6.2.3. Acelerómetro	38
6.3. ETAPA DE POTENCIA	39
6.3.1. Motor eléctrico para robótica.....	39
6.3.2. Driver Motor DC.....	42
6.4. ETAPA DE COMUNICACIÓN	44
6.5. ETAPA DE CONTROL.....	47
CAPÍTULO II. HARDWARE	50
1. ESTRUCTURA DEL VEHÍCULO	50
1.1. Cuerpo del robot	50

1.2.	Estructura de tracción.....	52
1.3.	Montaje final de robot.....	52
2.	COMPONENTES SELECCIONADOS	55
3.	CABLEADO.....	60
3.1.	Alimentación Raspberry pi 3	60
3.2.	Driver MD25.....	61
3.3.	Pulsador	63
CAPÍTULO III. SOFTWARE.....		64
1.	DESCRIPCIÓN.....	64
2.	MODELO NO LINEAL DE VEHÍCULO	65
3.	SISTEMA DE CONTROL.....	69
4.	ESTIMADOR DE ESTADO	70
5.	MÁQUINA DE ESTADOS.....	71
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES		72
1.	RESULTADOS	72
2.	CONCLUSIÓN	75
3.	APORTACIÓN.....	75
4.	FUTUROS DESARROLLOS	76
REFERENCIAS.....		78
ANEXOS		82
ANEXO I. PLANO DE DETALLE ESTRUCTURA		83
ANEXO I. PLANO DE DETALLE CHÁSIS.....		84
ANEXO III. MAPA PINES RASPBERRY PI 3 B		85
ANEXO IV. MAPA PINES DRIVER MD25		86
ANEXO V. PRESUPUESTO		87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Último modelo Segway I2. [2].....	24
Figura 2: Pénculo Invertido. [3]	25
Figura 3: El primer Segway. [5].....	27
Figura 4: Walkcar CocoaMotors. [8]	28
Figura 5: Scewo Prototipo. [10].....	28
Figura 6: Personal Urban Mobility and Accessibility. [11]	29
Figura 7: LegWay. [13]	30
Figura 8: Segway NXT-Way. [14]	30
Figura 9: Segway NXT-WayG. [14]	31
Figura 10: Tamaño Balanbot. [16]	32
Figura 11: Ejes Principales de Inercia [19].....	37
Figura 12: Ejemplo Motor DC 12V. [28]	40
Figura 13: Motor paso a paso para robótica. [29]	40
Figura 14: Tipo de Servomotor. [30].....	41
Figura 15: Cambios de porcnetaje en Ondas PWM. [33].....	43
Figura 16: Funcionamiento Puente en H en Motores DC.	43
Figura 17: Controlador de motores doble puente H L298N. [34]	44
Figura 18: Orden de bytes en transmisión MAVLink. [35]	45
Figura 19: Forma de la estructura del cuerpo del robot elegida.....	51
Figura 20: Chásis Robot Auto-Balanceo. [36]	52
Figura 21: Diseño final - Vista Frontal.	53
Figura 22: Diseño Final - Vista Trasera.....	53
Figura 23: Diseño Final - Vista Lateral.....	54
	20

Figura 25: Brida de nylon negra. [37]	54
Figura 24: Guía de cuadro adhesiva para cables. [48]	54
Figura 26: MPU-6000 click IMU. [37].....	55
Figura 27: PI 3 click Shield. [38]	56
Figura 28: Controlador MD25. [39]	56
Figura 29: Self-balacing KiT. [40]	57
Figura 30: Placa pi-ez connect. [41].....	58
Figura 31: Regulador UBEC CC/CC. [42]	58
Figura 32: Conversor lógico de nivel Sparkfun. [43].....	59
Figura 33: Interruptor de Palanca Q11. [45]	59
Figura 34: Pulsador de Tornillo Q27. [45]	59
Figura 35: Batería LiPo 3S 1000mAh. [44].....	60
Figura 36: Conexión Raspberry pi 3 B - Batería LiPo.....	61
Figura 37: Conexión Raspberry pi 3 B - Driver MD25.	62
Figura 38: Conexión Driver MD25 - Motores DC.	62
Figura 39: Cableado Driver MD25 - Motor DC.	62
Figura 40: Conexión Driver MD25 - Batería LiPo.	63
Figura 41: Cableado Pulsador - Raspberry pi 3 B.....	63
Figura 42: Software completo de vehículo equilibrista	64
Figura 43: Sistema Software Cabeceo.	65
Figura 44: Filtro complementario.....	70
Figura 45: Máquina de estados del sistema.....	71
Figura 46: Cotas Chasis Vehículo (mm). [38].....	84
Figura 47: Pines GPIO Raspberry pi 3 B.....	85
Figura 48: Pines MD25. Encoder y Transmisión.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Explicación de bytes de MAVLink. [35]	46
Tabla 2: Características IMU MPU-6000 click.....	55
Tabla 3: Características de PI3 click shield	56
Tabla 4: Características de controlador MD25	57
Tabla 5: Características Motores DC con chásis	57
Tabla 6: Características Terminal HAT	58
Tabla 7: Características Regulador UBEC CC/CC.....	58
Tabla 8: Características Conversor Lógico de Nivel Sparkfun.....	59
Tabla 9: Características Interruptor Q1	59
Tabla 10: Características Pulsador Q27	59
Tabla 11: Características Batería LiPo Turnigy	60

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, más del 15% de la población tiene alguna discapacidad. Más de un millón de personas no pueden andar y necesitan silla de ruedas para moverse. ¿Qué les impide moverse? ¿La silla?

Un día, el inventor Dean Kamen vio a un joven en una silla de ruedas tratando de subir una acera y se dio cuenta de que el problema no estaba en la silla de ruedas en sí, sino que la cuestión era que el mundo estaba construido para las personas que podían mantener el equilibrio. Por eso, en 1990, Dean Kamen junto a otros colaboradores crearon el iBot Movility System [1]; una silla de ruedas auto equilibrada que permite que los usuarios se muevan por superficies irregulares y suben y bajen por escaleras.

A raíz de este primer invento, se dieron cuenta de las enormes posibilidades que tienen los vehículos auto equilibrados. ¿Por qué no utilizarlo para aumentar la capacidad de un simple peatón? Así surgió el Segway (Figura 1); vehículo equilibrista.



Figura 1: Último modelo Segway I2. [2]

Un peatón que se encuentra de pie y se inclina hacia delante, llega un momento que su cerebro procesa que se va a caer y manda la orden de impulsar una pierna hacia delante y así evitar una caída. Pues el vehículo equilibrista funciona igual. En vez de piernas tiene ruedas, en vez de cerebro tiene varios microcontroladores y en vez de sentido de la inclinación tiene sensores y giróscopos. El auto balanceo se controla de la siguiente manera: al inclinarse en un Segway, para mantener el equilibrio, hace girar sus ruedas a la velocidad adecuada para desplazarse. Es un sistema dinámico cuyo comportamiento está basado en el equilibrio de un péndulo invertido como se puede observar en la Figura 2.

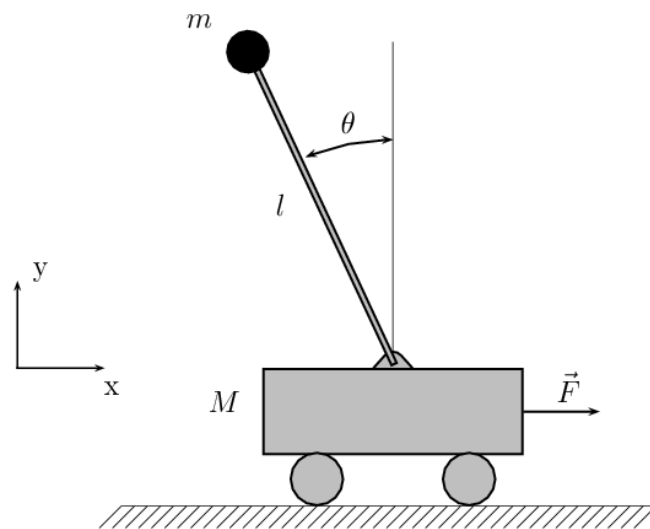


Figura 2: Péndulo Invertido. [3]

A continuación analizaremos los beneficios de un vehículo equilibrista [4]:

1.1. Vehículo eléctrico: ecológico

El calentamiento global son fenómenos graves que afectan a las personas y al medio ambiente. Es causado mayormente por las emisiones de CO_2 . Estas emisiones a su vez son causadas prácticamente en su totalidad al uso de vehículos no eléctricos, con combustibles como el diésel o la gasolina. Por eso es tan importante poner cada

uno de nosotros nuestro granito de arena y movernos con vehículos eléctricos es una manera de contribuir a bajar esas emisiones y así bajar la contaminación que hay hoy en día.

1.2. Aumenta nivel de vida

Utilizar un vehículo equilibrista como método de transporte urbano aumenta nuestro nivel de vida. Nos aporta más independencia y más tiempo ya que nos moveremos de un sitio a otro en menor tiempo y sin tráfico. También podemos ser capaces de cargar con más peso en ese trayecto. Por último, las personas de tercera edad que les cuesta andar podrán utilizarlo para moverse por la ciudad.

2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se presentará el estado de la cuestión actual de los vehículos de auto- balanceo y se clasificarán según sus aplicaciones más relevantes e importantes requeridas para el proyecto.

2.1. VEHÍCULOS DE AUTO-BALANCEO PARA TRANSPORTE

En 2002, Segway Inc [2] era el pionero de los transportadores unipersonales (TP) sacando primero el Segway inicial y tres años mas tarde el Segway Cross-Terrain Transporter. Al tener tanto éxito, y como todo mercado actual, las competencias empezaron a surgir.



Figura 3: El primer Segway. [5]

Pero no es hasta diez años después que se funda su primera competencia real: Ninebot, empresa China con sede en Beijing perteneciente al grupo Xiaomis. Aún así, Segway Inc sigue creciendo y explorando nuevos sectores de consumo. Un año después Ninebot lanza su primer producto, Ninebot E+ y tras su éxito, en 2015 deciden unir fuerzas y fusionarse.

Desde que Ninebot (Xiaomi) se hizo con Segway Inc. , las dos marcas rivales de los segways, acaparan todo protagonismo. Sus vehículos eléctricos de auto balanceo tienen excelente relación calidad-precio y son los más pioneros.

Rivales de Xiaomi existen muchos, pero que se parezcan a su calidad existen pocas. Marcas como Airwheel, Beeper o Esway son las de a día de hoy se están incorporando fuertemente al mercado.

Como es de esperar, las marcas chinas predominan en este mercado, aunque también es posible encontrar marcas en la Unión Europea que cuentan con diseños propios que son reproducidos en el gigante asiático con la garantía de abaratar los costes, a razón de unos parámetros de calidad satisfactorios [6].

Un paso más allá será utilizar esta idea revolucionaria como base para inventar nuevos productos todavía más impensables. Estos son los proyectos que se están realizando:

- WALKCAR: un sistema de transporte revolucionario que por su bajo peso se puede transportar en una mochila o bolso. Creado por Cocoa Motors Inc. y saldrá al mercado a finales de año con un precio de 800\$. Se muestra en la Figura 4 [7].



Figura 4: Walkcar CocoaMotors. [8]

- Scewo: Una silla de ruedas sin límites. Puede subir y bajar escaleras además de evitar cualquier obstáculo. Idea en proceso por Segway en colaboración de GM. Se muestra en la Figura 5 [9].



Figura 5: Scewo Prototipo. [10]

- P.U.M.A.(Personal Urban Mobility and Accessibility) : Este invento no es más que un vehículo equilibrista eléctrico en forma de coche, ver Figura 6. Funciona exactamente igual pero su forma permite un transporte más cómodo, seguro y fácil [11].



Figura 6: Personal Urban Mobility and Accessibility. [11]

2.2. VEHÍCULOS DE AUTO-BALANCEO PARA DOCENCIA

LEGO MINDSTORMS NXT es la segunda generación de productos de robótica del grupo LEGO, que lanzó la primera generación de productos de LEGO MINDSTORMS en 1998 con el sistema de invención robótica LEGO MINDSTORMS [12].

La historia de los Segways realizados con MINDSTORMS de LEGO empezó con el Legway (Figura 7) de Steve Hassenplug en 2003. El diseño ganó muchos premios e incluso era capaz de seguir una línea marcada en el suelo.

El programa para LegWay fue escrito en BrickOS (LEGOS) y utiliza EOPDs (Electro-Optical Proximity Detector) para mantener una distancia constante al suelo. A medida que la distancia disminuye, LegWay se mueve hacia adelante. A medida que aumenta la distancia, LegWay se mueve hacia atrás. Cada 50 ms, LegWay intenta volver a calcular el punto de equilibrio mediante la medición de la distancia actual y la velocidad del motor. [13]

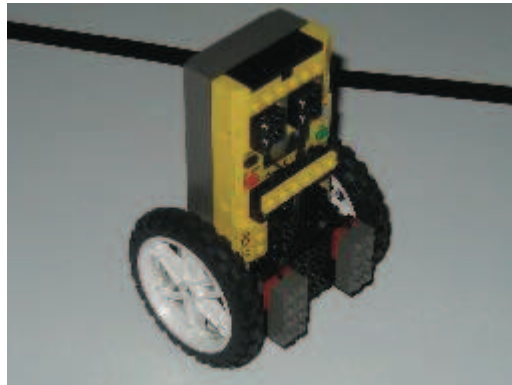


Figura 7: LegWay. [13]

Después vino el NXTWay [14] de Phillippe Hurbain, era algo impredecible en espacios exteriores y su sensor de infrarrojos era demasiado sensible a algunos tipos de luz, ver Figura 8.



Figura 8: Segway NXT-Way. [14]

El NXTWay-G es un modelo basado en los dos anteriores, la principal novedad es que se ha sustituido el sensor de infrarrojos por un giroscopio [15]. Ver Figura 9.

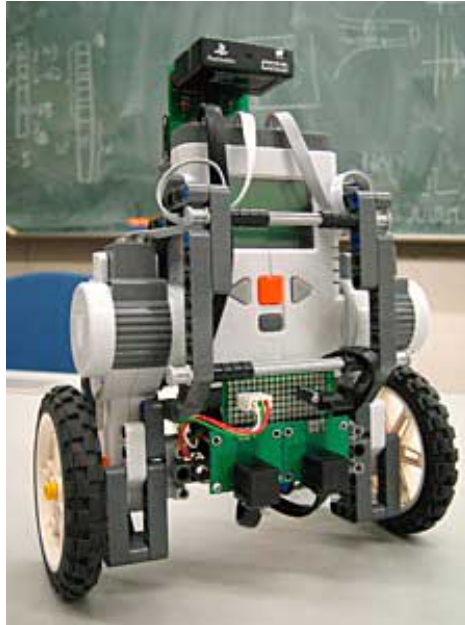


Figura 9: Segway NXT-WayG. [14]

Otro modelo que cabe mencionar es el Balanbot [16]. El Balanbot es un pequeño robot para uso académico desarrollado por un grupo de ingenieros entusiastas (Steve Chang, Ryan Quin y Bruce Chen). Éste lleva acoplado un sensor MPU6050 y se compone de una estructura prediseñada, la cual contiene un giroscopio, un acelerómetro para obtener el ángulo de inclinación, conectado a través de el protocolo de comunicación I2C. Además de este protocolo utiliza Bluetooth y/o Wifi para permitir la comunicación con otros dispositivos a través de un L298P. Su peso aproximado es de medio kilo y el robot es alimentado a través de una caja de baterías (tres pilas) y su precio actual en el mercado ronda los 100 €.

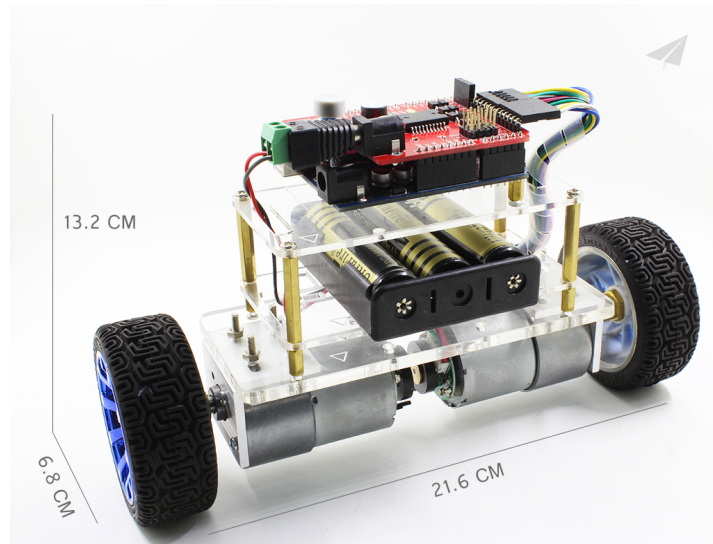


Figura 10: Tamaño Balanbot. [16]

2.3. Conclusiones

Una vez interpretados todos los modelos, contemplamos una similitud tanto en el funcionamiento de estos robots como en los conceptos de su diseño. Generalmente para medir la inclinación se utiliza un giroscopio, para las ruedas unos encoders y para los cálculos un microcontrolador.

Dichos elementos se combinan (unen) para obtener la base principal, mantener la estabilidad sobre las dos ruedas. En ocasiones se añaden acelerómetros o inclinómetros al giroscopio, se utilizan dispositivos IMU (Inertial Measurement Unit) [17], permitiendo así una señal de entrada más precisa y mucho mejor para el sistema de control.

Haciendo referencia a los algoritmos de control que se van a necesitar para el funcionamiento del sistema, serán sistemas de control lineales cuya disponibilidad y conocimientos son mayores además de una implementación más sencilla. Para esto, los sistemas más comunes son control PD O PID, que se explicarán con más detalle.

3. MOTIVACIÓN

La principal motivación de este proyecto es la construcción de un vehículo equilibrista desde cero cubriendo todas las etapas del proceso: desde la parte teórica hasta su implementación práctica. El reto que supone diseñar y ejecutar todas las fases de este proyecto, unido a su utilidad práctica que puede llegar a tener como fines docentes, son una mezcla perfecta.

4. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es el diseño de un vehículo equilibrista a escala desde cero. Para el logro del objetivo principal tenemos que dividirlo en tres objetivos claros:

1. Montaje físico del vehículo
2. Integración de toda la electrónica y sistema de comunicación
3. Diseño del sistema de control de autobalanceo

5. RECURSOS NECESARIOS

5.1. SOFTWARE

- Matlab 2018a
- Simulink
- Paquete de soporte de la Raspberry pi para Simulink
- Imagen Raspbian para la Raspberry pi 3 b adaptado a simulink

- SolidWorks

5.2. HARDWARE

- Dos motores CC (12V – 2,8A)
- Batería de polímero de litio
- Dos ruedas
- Soporte y escuadras
- Tres microbús
- Material de conexión: cables...
- Raspberry pi 3b
- Micro tarjeta SD 16GB
- IMU I2C MPV 6000 (Acelerómetros y giróscopos)
- Pantalla táctil
- Sensor de proximidad
- Altavoz
- Dispositivo para bluetooth y wifi
- Policarbonato

6. METODOLOGÍA DE TRABAJO

6.1. DESCRIPCIÓN

Como se puede observar en la Figura, el sistema del prototipo ideado para este trabajo estará compuesto por cuatro etapas distinguidas: sensado, potencia, comunicación y control.

En la etapa de sensado, el vehículo o robot obtendrá la información necesaria de sensores para su control: orientación con respecto al eje. En la fase de potencia, se recibe la señal de control generada y a través de un driver controlador de motores de continúa, se enviará la actuación adecuada necesaria para el equilibrio del robot. Para la comunicación entre usuario y otros dispositivos con el vehículo equilibrista se usará la tecnología wifi con un protocolo llamado Mavlink. Por último, en la etapa de control es dónde el microcontrolador seleccionado recibirá la información de la etapa de sensado, la procesará y transmitirá la señal de salida para el correcto funcionamiento del robot.

También se diseñará y se realizará el montaje de la estructura mecánica dónde se encontrarán los diferentes componentes del citado vehículo.

A continuación, se realizará una explicación detallada de todos los elementos correspondientes a cada etapa y su correspondiente razón que ha llevado a su elección.

6.2. ETAPA DE SENSADO

Gracias a esta etapa, el robot será capaz de conocer e interpretar el entorno que le rodea. Está compuesta por los dispositivos de instrumentación necesarios. Estos dispositivos, sensores, son uno de los elementos fundamentales de cualquier sistema a modelar ya que permiten en su control de lazo cerrado realizar la realimentación; siendo alguna de las entradas las salidas.

Para este caso particular de un modelo no lineal, unas de las variables de control son los siguientes ángulos de inclinación: el ángulo de cabeceo (pitch) y el ángulo de guiñada (yaw). Es decir su posición respecto al eje horizontal y vertical. Ya que se enviará en tiempo real al microcontrolador y así poder ejecutar el control de la planta.

La estimación de estos ángulos presenta cierta complejidad en ciertas aplicaciones debido a la precisión de dichas medidas y al no tener referencia externa para determinar

la posición y orientación. Para ello se utiliza un giróscopo junto a un acelerómetro. Este sensor es llamado IMU (Inertial Measurement Unit).

6.2.1. Unidad de medición inercial (IMU)

Una unidad de medición inercial o IMU [18], es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitatorias de un aparato o sistema, usando una combinación de acelerómetros, giróscopos y sensores gravitatorios. Las IMUs son normalmente usadas normalmente para vehículos con necesidad de equilibrio, como suele ser un vehículo aéreo, tripulado o no o un vehículo equilibrista de auto-balanceo como es este caso de uso en concreto. Es decir, el componente principal de los sistemas de navegación inercial. Para este uso, los datos recolectados por los sensores de una unidad de medición inercial permiten a un computador seguir la posición del aparato usando métodos de navegación por estima.

Su funcionamiento se basa en la detección en tiempo real de la tasa de aceleración usando los acelerómetros y en la detección de cambios en atributos rotacionales de los tres ejes ortogonales del espacio. Éstos sensores, no miden directamente ángulos o aceleraciones, estas medidas requieren cálculos para así obtener las unidades reales de medida. Para ello, contiene un procesador.

Existen unidades de medición inercial con más o menos precisión. Por un lado están las de seis grados de libertad, que lleva tres sensores por cada eje ortogonal: eje cabeceo (pitch), eje de guiñada (yaw) y eje de paso (roll). Ver Figura 11. Por otro, existen de nueve grados, que además llevan incorporadas un magnetómetro y también de menos grados de libertad que en vez de medir en los tres ejes miden en dos o en uno.

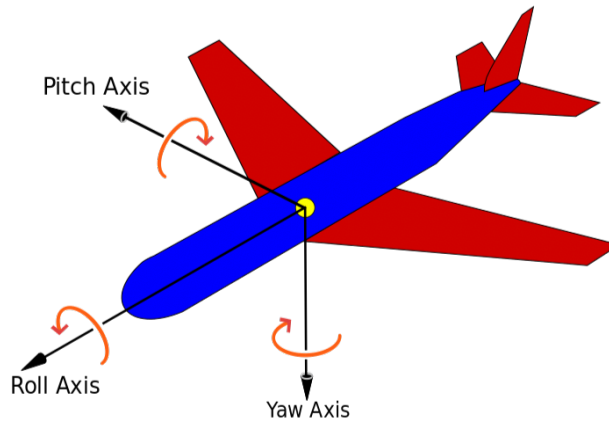


Figura 11: Ejes Principales de Inercia [19].

6.2.2. Giróscopo

El giróscopo o giroscopio, es un dispositivo electrónico que sirve para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún aparato o vehículo [20]. Proporciona información acerca de la velocidad angular (de uno, dos o tres ejes) de un cuerpo con respecto a un sistema de referencia estático.

Antaño, estos dispositivos eran voluminosos artefactos y con un altísimo coste empleados para usos militares principalmente. Gracias a la revolución digital de las últimas épocas, estos dispositivos son de tamaño pequeño y se pueden adquirir con facilidad y bajo coste.

Su funcionamiento puede parecer sencillo, pero la complejidad que hay detrás de este componente es asombrosa. Grosso modo, un giróscopo a través de un brazo de accionamiento es capaz de medir los movimientos de un dispositivo. Al haber un movimiento en el dispositivo se ejerce una vibración vertical en el brazo debido a la fuerza de Coriolis. Éstos se llaman giróscopos de estructura vibrante o de vibración de Coriolis [21]. En otras palabras, cuando un giroscopio gira, una pequeña masa se desplaza a medida que cambia la velocidad angular del dispositivo. Este movimiento se convierte en señales eléctricas de muy baja corriente que pueden ser amplificadas para ser leídas por un microcontrolador [22].

6.2.3. Acelerómetro

“Un sensor es un dispositivo capaz de dar una respuesta eléctrica a estímulos físicos externos”, así de fácil lo resume Álvaro Sánchez, ingeniero electrónico de una importante empresa del sector naval. En este caso, ese estímulo es el movimiento.

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura. La fuerza generada por la vibración o el cambio en el movimiento (aceleración) hace que la masa "comprima" el material piezoeléctrico, generando una carga eléctrica que es proporcional a la fuerza ejercida sobre él. [23]

Existen varios tipos de acelerómetros basados en distintas tecnologías (piezo-eléctricos, piezo-resistivos, mecánicos, capacitivos, térmicos, micro-electromecánicos) y varios diseños que aunque todos tienen el mismo fin, pueden ser muy distintos unos de otros dependiendo del uso y condiciones en el que el acelerómetro va a ser usado.

Por lo general, los acelerómetros encontrados en los dispositivos IMU, son los MEMS [24](sistemas micro-electromecánicos) por su estabilidad y rapidez, pequeño tamaño y bajo coste. Por otro lado, tienen como inconveniente que la señal obtenida es altamente ruidosa que no es problema ya que se podría solucionar con ayuda de buenos filtros.

Se distinguen tres categorías principales de acelerómetros de MEMS: el capacitivo de silicio, el piezo-resistivo y, finalmente, los acelerómetros térmicos. Hasta el momento, los acelerómetros capacitivos de silicio dominaban ampliamente el mercado. Estos acelerómetros contienen placas capacitivas internamente. Algunos de estos son fijos, mientras que otros están unidos a resortes minúsculos que se mueven internamente conforme las fuerzas de aceleración actúan sobre el sensor. Como estas placas se mueven en relación el uno al otro, la capacitancia entre ellos cambia. A partir de estos cambios en la capacitancia, la aceleración se puede determinar [25].

Los acelerómetros MEMS se pueden catalogar en tres diferentes tipos: capacitivo de silicio, piezo-resistivo y térmicos. Los más comunes en el mercado son los acelerómetros capacitivos de silicio. Básicamente, contienen placas capacitivas, unas móviles y otras fijas, unidas por resortes que se mueven al son de las fuerzas de aceleración que actúan sobre el sensor. Al desplazarse, la capacitancia cambia y así se mide la aceleración del mismo [26].

6.3. ETAPA DE POTENCIA

Durante la etapa de potencia se busca proporcionarle al robot el par necesario para que este mismo sea capaz de mantener una posición estable a lo largo del eje vertical. Para ello, se usarán dos motores eléctricos que serán accionados mediante un driver motor. En cuanto a la acción de control presente en esta etapa, será la responsable de ordenar en que momento y con qué fuerza deben de accionarse los motores eléctricos situados en el eje de las ruedas para mantener la posición de estable. Es por ello, que dicha etapa la está sustentada por los motores y el driver pertinente.

6.3.1. Motor eléctrico para robótica

El motor eléctrico se basa en el principio de la inducción, es decir, se trata de un máquina eléctrica que mediante el giro de un campo magnético rotatorio a través de las bobinas del estator es capaz de crear una corriente eléctrica. De esta manera se consigue obtener energía eléctrica a partir de la transformación de la energía mecánica. En el ámbito de la robótica, podemos distinguir tres tipos de motores diferentes [27]:

- Motor de corriente continua o Motor DC: Estos motores son capaces de trabajar en ambos sentidos de giro con el simple hecho de invertir la polaridad de sus bornes. El control del par y la velocidad de dichos motores resulta muy sencillo ya que simplemente basta con modificar la corriente que llega a los bornes o introducir un PWM. Sin embargo, el control de la posición resulta más

complicado. En cuanto a las desventajas de estos motores cabría destacar, que presentan una velocidad angular veloz y un par pequeño. Por lo tanto, se suele reducir la velocidad angular y aumentar el par. Para ello, es necesario añadir una caja reductora.



Figura 12: Ejemplo Motor DC 12V. [28]

- Motores paso a paso: Se trata de motores de alta precisión si se comparan con los motores de corriente continua, no solo en cuanto a la velocidad sino también en cuanto a la posición. La rotación completa del motor se divide en grados de la misma dimensión. Estos grados representan el paso del motor y cuanto menor sea el paso del motor, más preciso será este. Cabe destacar, que este tipo de motores se utilizan cuando la precisión requerida es muy grande, sin embargo, en este proyecto, no se busca tanta precisión y si un buen par, cosa que este tipo de motores no puede proporcionar.

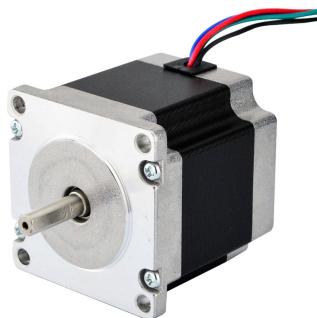


Figura 13: Motor paso a paso para robótica. [29]

- Servomotores: Este tipo de motores son capaces de girar unos grados determinados y mantener el motor fijo en dicha posición. El conjunto de elementos que componen un servomotor son, un motor DC, una reductora, una serie de circuitos eléctricos y un potenciómetro. El funcionamiento básico del motor consiste en aplicarle una serie de pulsos eléctricos y de esta manera, dependiendo de la forma de la onda cuadrada, el motor es capaz de controlar la posición del servomotor. Cabe destacar que dichos motores presentan un inconveniente fundamental y es la limitación del ángulo de giro, que suele ser de ciento ochenta grados. Esto convierte a este tipo de motor en inadecuado para la realización del proyecto.



Figura 14: Tipo de Servomotor. [30]

Es por ello, que el motor que se utilizará para la realización de dicho proyecto será el motor de corriente continua acompañado por una caja reductora. Dicho motor destaca por ser el mas sencillo de los tres y además es el que mejores prestaciones ofrece en cuanto al par.

6.3.2. Driver Motor DC

Un controlador de motor o driver motor [31] es un elemento que presenta una conexión a una fuente de alimentación o batería y a circuitos de control tales como señales analógicas o digitales. Dicho dispositivo permite administrar el rendimiento de un motor eléctrico, en concreto para este proyecto, de un motor DC. Este dispositivo tendrá las siguientes funciones:

- Entrega la energía necesaria para el funcionamiento adecuado del motor
- Para iniciar y parar el motor es posible utilizar un accionamiento automático o manual.
- Proporciona flexibilidad en cuanto a la facilidad de cambio del sentido de giro del motor.☐
- Proporciona la alternativa de regular la velocidad, así como también de regular o limitar el par.
- Proporciona protección contra cualquier posible fallo inclusive contra sobrecargas.

I. PWM (Pulse Width Modulated)

Un método muy utilizado para regular la velocidad como el par de un motor DC es el PWM. Este sistema se encarga de regular el ancho del pulso de la corriente de alimentación. De esta manera, se crea una onda cuadrada que dependiendo de su forma es capaz de regular de manera muy satisfactoria la corriente de entrada al motor. Dicha corriente disminuye de manera proporcional a la relación entre la parte alta y baja del ciclo de la onda cuadrada [32] .

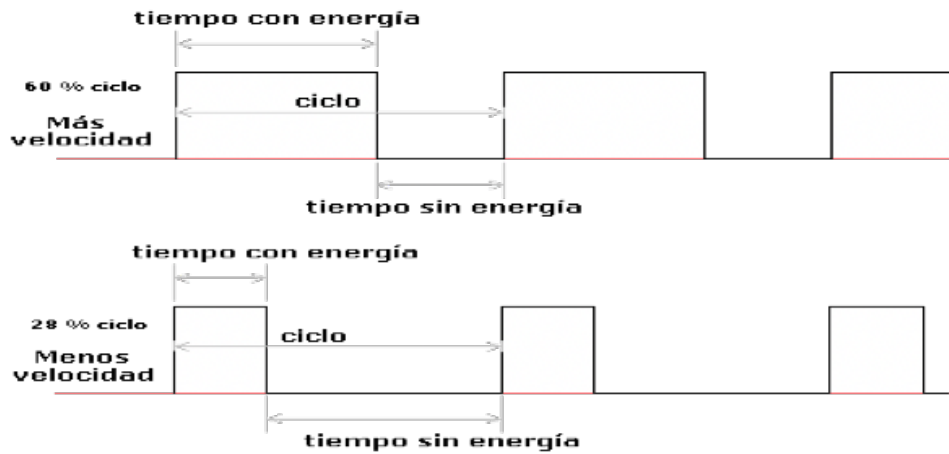


Figura 15: Cambios de porcnetaje en Ondas PWM. [33]

II. Puente en H

Cuando se precisa cambiar el sentido de un motor, se utiliza el circuito electrónico denominado puente en H. Dicho circuito presenta cuatro interruptores que bien pueden ser mecánicos o transistores y se van abriendo y cerrando dependiendo del sentido que se quiera que recorra la corriente en el interior del motor. El nombre de puente en H viene por la forma del circuito electrónico, que puede venir integrado con el motor o puede construirse externamente [33].

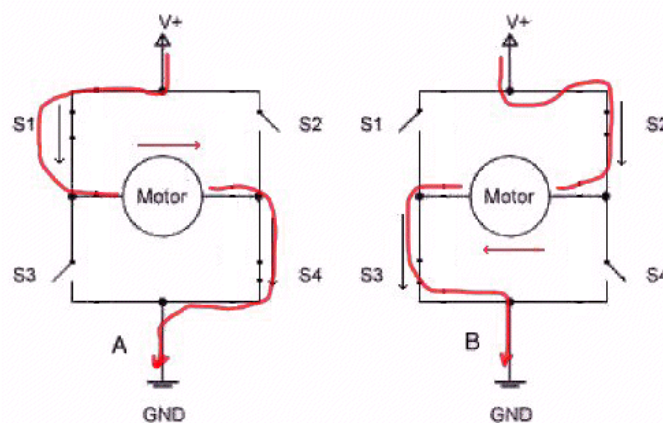


Figura 16: Funcionamiento Puente en H en Motores DC.

Se procede ahora a explicar el funcionamiento del motor, ver Figura. Si se cierran los interruptores S1 y S4, y se abren los interruptores S2 y S3, esto quiere decir, que se está aplicando una tensión positiva en los bornes del motor, y de esta manera el motor gira en un sentido. Por otro lado, se abren los interruptores S1 y S4, y se cierran los interruptores S2 y S3 se estaría invirtiendo el voltaje en los bornes, y el motor estaría girando en el otro sentido.

Actualmente, hay una gran diversidad de drivers controladores de motores de corriente continua, todos ellos muy completos y montados sobre tarjetas electrónicas como se puede observar un ejemplo en la Ilustración 32.



Figura 17: Controlador de motores doble puente H L298N. [34]

6.4. ETAPA DE COMUNICACIÓN

La finalidad de esta etapa es dar la capacidad al robot de transmitir y recibir información de otros dispositivos inalámbricamente. Existen varios tipos de tecnologías estándar como puede ser Bluetooth o Zigbee. En este caso se ha elegido la tecnología WIFI.

WIFI [20] es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica mediante ondas más utilizada en el momento. El funcionamiento de la red es sencillo, sólo hace falta un

enrutador WIFI como Gateway y un terminal conectado al robot. Dicha terminal se encuentra en la Raspberry pi 3 b. El ordenador se conectará al WIFI deseado y a través de una conexión SSH con una IP fija, previamente configurada en la Raspberry pi, ya se tendría la conexión inalámbrica entre el ordenador y el vehículo equilibrista requerida.

Por otro lado, es imprescindible la elección de un protocolo de comunicación. Los protocolos [21], son instrucciones, normativas o reglas que permiten guiar una acción imponiendo ciertas bases para su correcto procedimiento. Los protocolos de comunicación, son pues, el conjunto de pautas que posibilitan el intercambio de información. Fijan los parámetros que determinan cuál es la semántica y sintaxis que debe emplearse en el proceso comunicativo. Entre otros, existe el protocolo MAVLink.

MAVLink [22], es un protocolo de comunicación inventado para el intercambio de información entre la estación de control de tierra y micro UAVs (Vehículo aéreo no tripulado). Se basa en una pequeña librería que contiene dichas pautas necesarias para la comunicación. Toda esta información se encuentra empaquetada en .xml facilitando su integración. La definición de los mensajes se realiza mediante headers(cabeceras) en lenguaje C. El paquete consiste en una secuencia codificada de bytes. Ver Figura.... Como todo protocolo, posee una licencia: LGPL (GNU Lesser General Public License). Una de las ventajas de esta licencia es la posibilidad de poder trabajar en close-source u open-source.

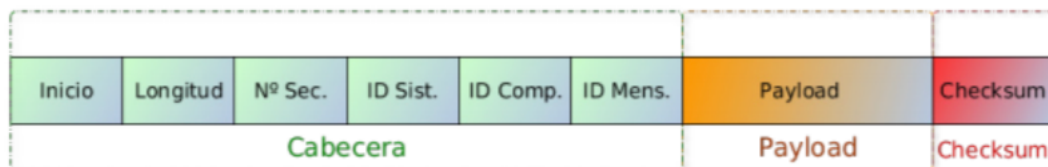


Figura 18: Orden de bytes en transmisión MAVLink. [35]

La cabecera está compuesta por un conjunto de 6. Bytes, como se puede ver en la figura anterior. La función de cada byte se explica en la Tabla 1.

BYTE	EXPLICACIÓN
Inicio	Este byte indica el comienzo del paquete MAVLink.
Longitud	Indica el número de bytes que se van a enviar como payload del mensaje. Puede tomar valor entre 0 y 255.
Número de secuencia	Muestra el numero de paquete enviado según pertenencia a la secuencia de los mismos con el con el objetivo de reordenar éstos en el destino (por si fuera éste de gran tamaño) o detectar paquetes perdidos. Puede tomar valor entre 0 y 255.
Identificación del sistema	Identifica el sistema, mediante un numero natural, que ha enviado el mensaje permitiendo diferenciar entre varios sistemas de la misma red. Puede tomar valor entre 0 y 255.
Identificación del componente del sistema	Señala, mediante un número natural, el componente de dicho sistema que ha enviado el mensaje permitiendo de este modo diferenciar varios componentes dentro del mismo sistema. Puede tomar valor entre 0 y 255.
Identificación del mensaje	Indica el tipo de mensaje enviado, señalando cómo se tiene que leer el payload que viene a continuación. Utilizando un símil es una leyenda que indica cómo se debe leer y traducir la carga útil del mensaje. Puede tomar valor entre 0 y 255.

Tabla 1: Explicación de bytes de MAVLink. [35]

6.5. ETAPA DE CONTROL

Esta etapa es la que se encarga de mantener el robot en estado vertical. Para el desarrollo de este control se ha de seleccionar el microcontrolador y el software necesario para su programación.

Con respecto al software, el programa seleccionado ha sido Matlab por diversas razones. Sobre todo por la herramienta que incorpora gráfica que permite una interfaz sencilla y visual entre microcontrolador y código.

Para empezar a desarrollar este epígrafe, se ha optado por explicar lo que es un microcontrolador de manera muy abreviada. Un microcontrolador es un circuito integrado programable, que tiene la capacidad de efectuar las ordenes grabadas en su memoria.

Ahora se explicará lo que es la Raspberry Pi y el modelo concreto que se ha utilizado en este proyecto. La Raspberry Pi fue creada en 2011 por la universidad de Cambridge en un intento de crear un ordenador de pequeño tamaño que pudiera ser utilizado para la docencia. Cabe destacar que su venta al público comenzó en el año 2012.

La Raspberry Pi incluye diversos componentes que se van a enumerar a continuación:

- Un Chipset Broadcom BCM2835, que contiene un procesador central (CPU) ARM1176JZF-S a 700 MHz (el firmware incluye unos modos Turbo para que el usuario pueda hacerle overclock de hasta 1 GHz sin perder la garantía),
- Un procesador gráfico (GPU) VideoCore IV
- Un módulo de 512 MB de memoria RAM (aunque originalmente al ser lanzado eran 256 MB).
- Un conector de RJ45 conectado a un integrado lan9512 -jzx de SMSC que nos proporciona conectividad a 10/100 Mbps
- 2 buses USB 2.0

- Una Salida analógica de audio estéreo por Jack de 3.5 mm.
- Salida digital de video + audio HDMI
- Salida analógica de video RCA
- Pines de entrada y salida de propósito general
- Conector de alimentación microUSB
- Lector de tarjetas SD

Entre todos los modelos de raspberry pi que existen este proyecto se ha centrado en el tipo Familia ya que otros tipos como puede ser el modelo Zero se quedan cortos. Hay que destacar que dentro del modelo Familia, hay tres versiones deiferentes, el modelo Raspberry Pi 1,2 y 3. A continuación se va a explicar las dos últimas versiones.

El modelo Raspberry Pi 2 es una versión mejorada del modelo Raspberry Pi B en el que se consigue una potencia de cálculo mayor. Por otro lado, el modelo Raspberry Pi 3 es una versión mejorada en el que se consigue conectividad mediante Bluetooth 4.1 y Wifi 802.11n. Por su capacidad de procesamiento y su sistema de conectividad además de tener bloques específicos en Simulink se ha seleccionado como microcontrolador el modelo 3 B.

CAPÍTULO II. HARDWARE

Una vez presentada en el apartado anterior, la tecnología que se emplea en este Trabajo Fin de Grado, empieza el diseño y desarrollo de hardware, así como la descripción del modo en el que se emplea dicha tecnología. En este apartado se procede a explicar los pasos que se han seguido para el diseño y cableado del prototipo final.

1. ESTRUCTURA DEL VEHÍCULO

El diseño de la estructura se ha dividido en dos partes:

1. El diseño del cuerpo del robot
2. El eje de tracción

1.1. Cuerpo del robot

La estructura robótica se diseñó y fabricó como previamente se ha mencionado. Existen herramientas de diseño gráfico 3D que facilitan la representación de formas y objetos. En este caso se ha utilizado el programa SolidWorks 2018 para el diseño del mismo.

La estructura seleccionada se ha elegido por diversos motivos que explicaremos a continuación. En primer lugar, dicha estructura permite la protección de los componentes electrónicos frente a caídas. En segundo lugar, la coordenada vertical del centro de gravedad no ha sido desplazada, coincidiendo con el eje de simetría. Esto garantiza la pérdida de equilibrio en un sólo eje. Por último, se han añadido dos “brazos” a los lados para hacer posible una futura ampliación en la que se añadan sensores a los lados. Éstos son simétricos para, una vez más, garantizar la estabilidad. En la siguiente figura

se puede observar el diseño en 3D de SolidWorks. El plano de detalle se encuentra en el ANEXO I.

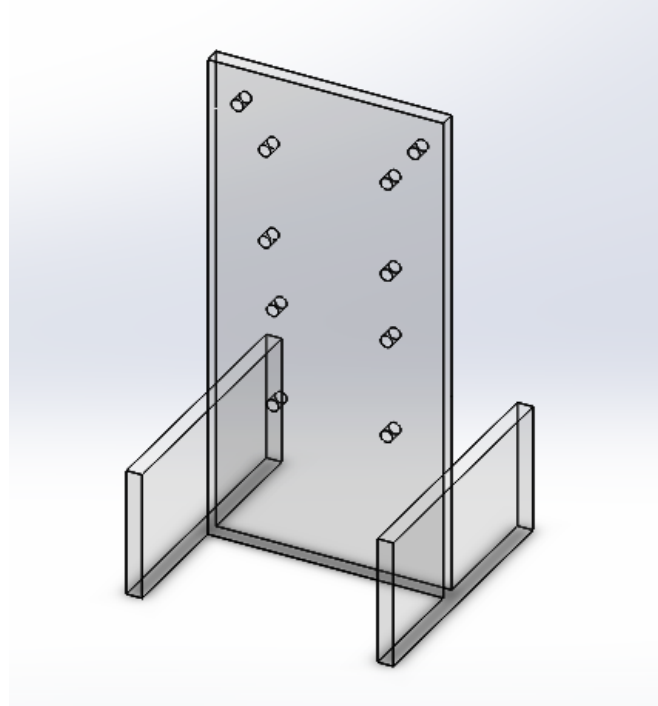


Figura 19: Forma de la estructura del cuerpo del robot elegida

Como se puede observar en la figura, el material escogido es Policarbonato. Dicho material es económico y altamente resistente. En cuanto a los agujeros, es importante discernir el uso de cada uno. Los dos agujeros superiores son para atornillar el pulsador y el interruptor. Por otro lado, los cuatro centrales son para anclar el controlador MD25. Por último, los cuatro inferiores se usarán para el anclaje del microcontrolador Raspberry pi 3.

1.2. Estructura de tracción

La estructura escogida es robusta y del mismo fabricante que los motores para asegurar su correcto funcionamiento. En la siguiente figura se puede observar, para más detalle: ANEXO V [36].

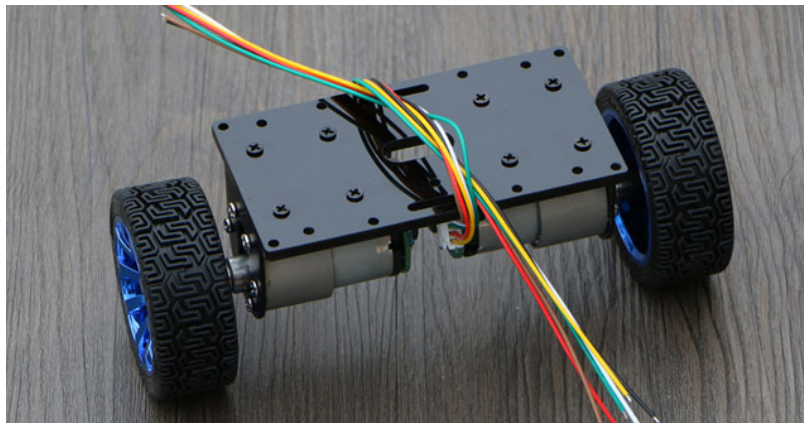


Figura 20: Chásis Robot Auto-Balanceo. [36]

1.3. Montaje final de robot

El robot está compuesto por las dos partes explicadas anteriormente que han sido atornilladas con soportes en L de acero. Además, se encuentran anclados los diversos componentes electrónicos y otros enganchados con ayuda de guía cables adhesiva y bridas (Ver Figuras 24 y 25). El montaje final es el siguiente:

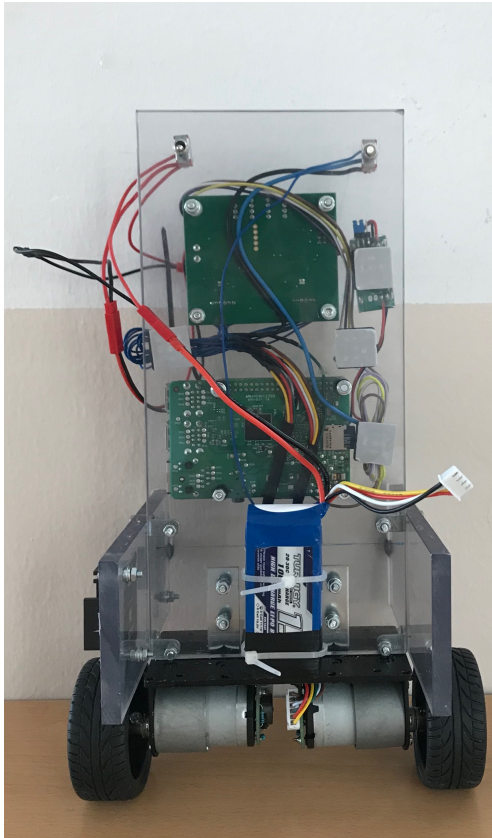


Figura 21: Diseño final - Vista Frontal.

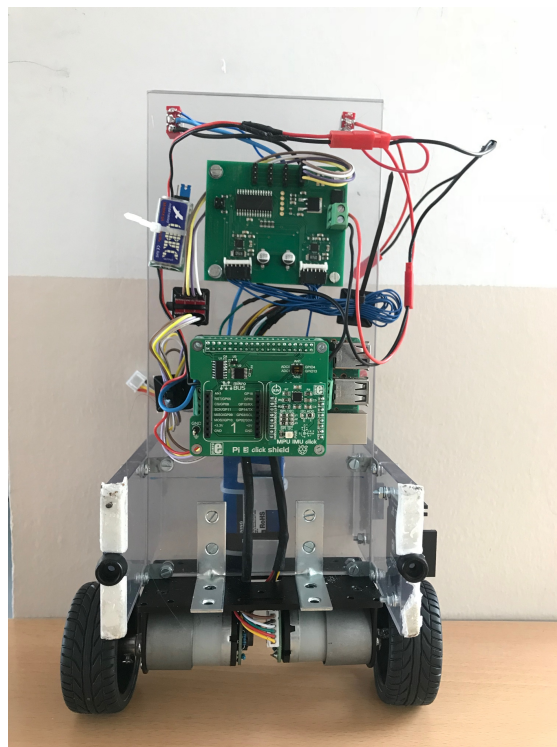


Figura 22: Diseño Final - Vista Trasera.

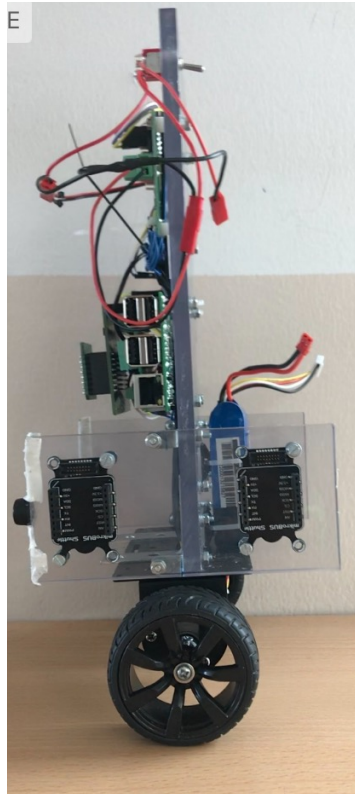


Figura 23: Diseño Final - Vista Lateral.



Figura 25: Brida de nylon negra. [37]



Figura 24: Guía de cuadro adhesiva para cables. [48]

2. COMPONENTES SELECCIONADOS

A continuación, se va a mostrar en las siguientes tablas la elección de todos los componentes mencionados necesarios para la elaboración del robot.

IMU	
MODELO	MPU-6000 click
MARCA	MikroElektronika
Nº DE EJES	6-ejes
INTERFACES	SPI, I2C , GPIO
VOLTAJE DE ENTRADA	3,3V
COMPATIBILIDAD	mikroBUS
TAMAÑO	28.6 x 25.4 mm
PRECIO	33,55€

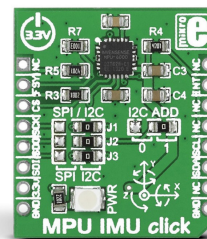


Tabla 2: Características IMU MPU-6000 click

Figura 26: MPU-6000 click IMU. [40]

MikroBUS	
MODELO	PI 3 click shield
MARCA	MikroElektronika
Nº DE BUSES	2
COMPATIBILIDAD	Raspberry pi 3 B
PRECIO	10,32€

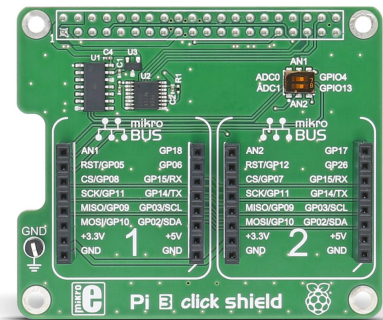


Figura 27: PI 3 click Shield. [41]

Tabla 3: Características de PI3 click shield

DRIVER	
MODELO	MD25
MARCA	Devantech
Nº DE MOTORES	2
INTERFACES	I2C , SERIE
VOLTAJE DE ALIMENTACION	3,3V
VOLTAJE DE ENTRADA	12V
OTROS	Lectura de encoders y puente en H

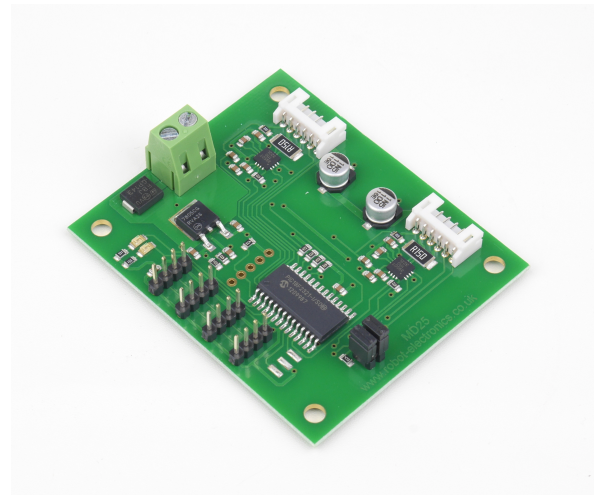


Figura 28: Controlador MD25. [42]

TAMAÑO	71 x 60 mm
PRECIO	47,98€

Tabla 4: Características de controlador MD25

MOTORES	
MODELO	MOTOR DC
Nº DE MOTORES	2
ENCODER	SI
VOLTAJE	12V
VOLTAJE DE ENTRADA	5V
POTENCIA	4.32W
CORRIENTE MAXIMA	2.8A
RATIO DE REDUCCIÓN	1:30
DIAMETRO	6mm
PRECIO (con chásis incluido)	40.54€

Tabla 5: Características Motores DC con chásis



Figura 29: Self-balacing KiT. [38]

Terminal HAT	
MODELO	Pi-ez Connect
MARCA	Adafruit
COMPATIBILIDAD	Raspberry pi 3 B
PRECIO	17,16€

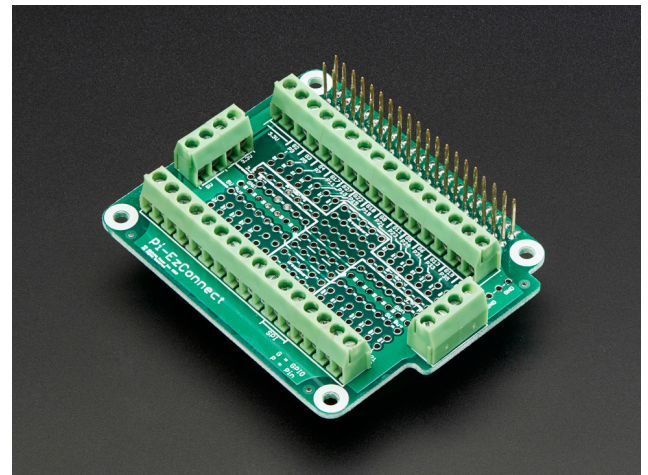


Figura 30: Placa pi-ez connect. [43]

Tabla 6: Características Terminal HAT

REGULADOR DE TENSIÓN CC/CC	
MODELO	Ubec
MARCA	HobbyWing
COMPATIBILIDAD	LiPo 3s-4s
USO	Salida de voltaje siempre constante
PRECIO	2,29€



Figura 31: Regulador UBEC CC/CC. [44]

Tabla 7: Características Regulador UBEC CC/CC

CONVERSOR LÓGICO DE NIVEL	
MARCA	Sparkfun
VOLTAJE	3,3V / 5V
PRECIO	2,29€

Tabla 8: Características Conversor Lógico de Nivel Sparkfun

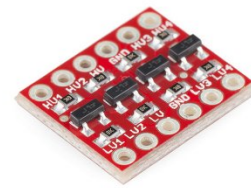


Figura 32: Conversor lógico de nivel Sparkfun. [45].

INTERRUPTOR	
MARCA	Ronglan
MODELO	Q11
PRECIO	0,84€

Tabla 9: Características Interruptor Q1

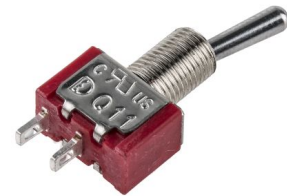


Figura 33: Interruptor de Palanca Q11. [47]

PULSADOR	
MARCA	Ronglan
MODELO	Q27
PRECIO	1,73€

Tabla 10: Características Pulsador Q27



Figura 34: Pulsador de Tornillo Q27. [47]

BATERÍA LiPo	
MARCA	Turnigy
MODELO	11V2-1000
CELDAS	3S
VOLTAJE DE CARGA	11.1V
DESCARGA CONSTANTE	20C
CAPACIDAD MÍNIMA	1000mAh
TAMAÑO	77x33x20mm
PRECIO	8,35€



Figura 35: Batería LiPo 3S 1000mAh. [46]

Tabla 11: Características Batería LiPo Turnigy

3. CABLEADO

A continuación, se va mostrar el conexionado de todos los componentes que integran el robot con el microcontrolador.

3.1. Alimentación Raspberry pi 3

El diseño del robot se ha realizado de tal manera que la alimentación del microcontrolador se pueda realizar de forma externa (por el puerto micro usb) o

mediante la batería LiPo. Por seguridad, esta última conexión, se ha hecho a través de un conmutador ya que mantiene el voltaje de salida completamente constante.

Para hacer esa selección se ha integrado un interruptor dónde se activa o desactiva la carga de la batería, ver Figura. Una vez desactivada, se podrá conectar por el puerto microusb el cable de encendido. Para información completa de los pines del microcontrolador ver ANEXO II.

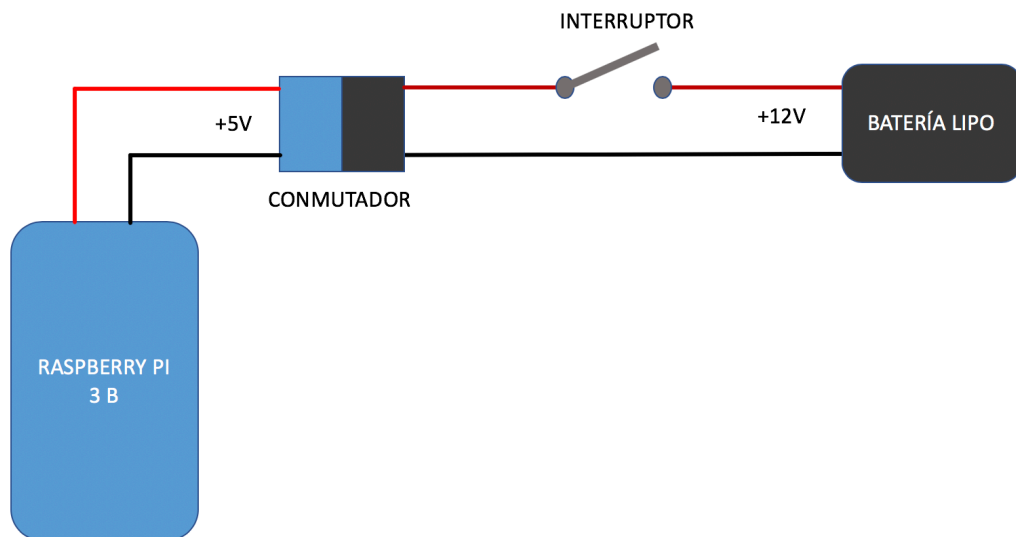


Figura 36: Conexión de Raspberry pi 3 B - Batería LiPo.

3.2. Driver MD25

El controlador seleccionado tiene dos interfaces de comunicación a elegir. Para este proyecto se ha elegido la comunicación por I2C. Debido a que los puertos GPIO de entrada/salida de la Raspberry pi están fijados a un voltaje de 3,3V y los pines de transmisión/recepción del controlador están fijados a 5V, es necesario la instalación de

un conversor lógico de nivel, que transformará el voltaje bidireccionalmente del driver al microcontrolador. En la siguiente figura se mostrará dicho cableado.

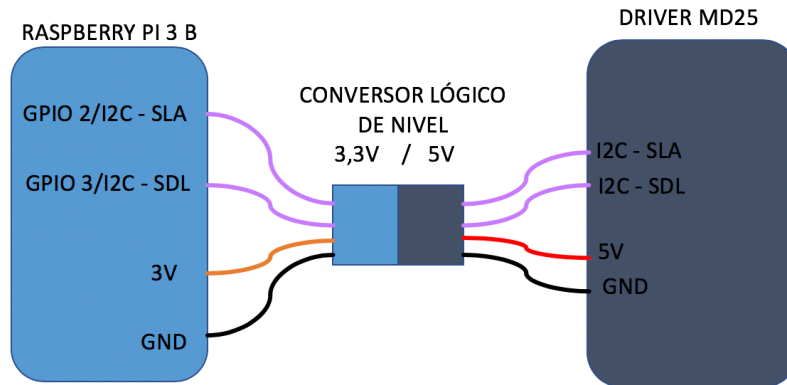


Figura 37: Conexión Raspberry pi 3 B - Driver MD25.

Por otro lado, también se ha llevado a cabo el conexionado del controlador con los motores y encoders del robot. Cabe mencionar, que el orden de conexión de los cables difería entre ambos dispositivos electrónicos. Para ver mapa de pines, ANEXO III.

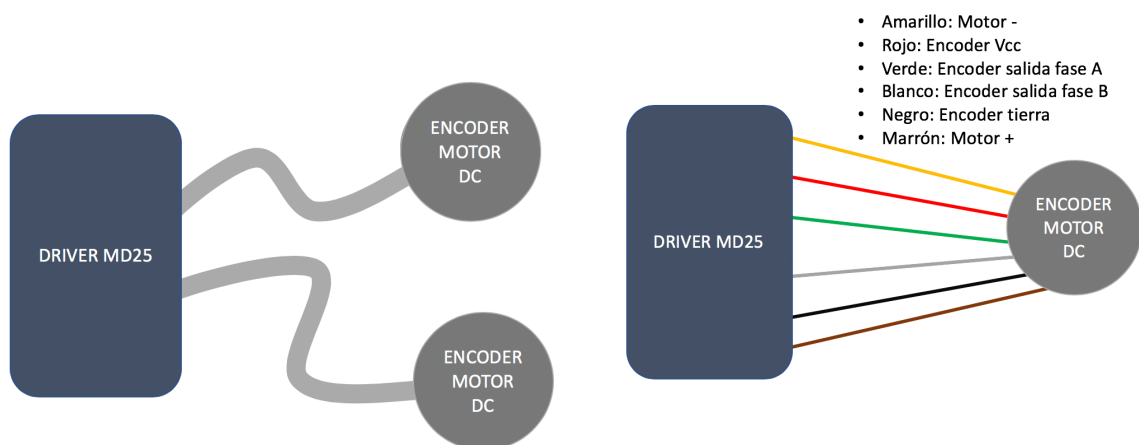


Figura 38: Conexión Driver MD25 - Motores DC.

Figura 39: Cableado Driver MD25 - Motor DC.

Por último, en la siguiente figura se muestra la conexión entre el driver y la fuente de alimentación. Entre ambos dispositivos se encuentra un interruptor que permite desconectar la batería del controlador para optimizar su descarga.

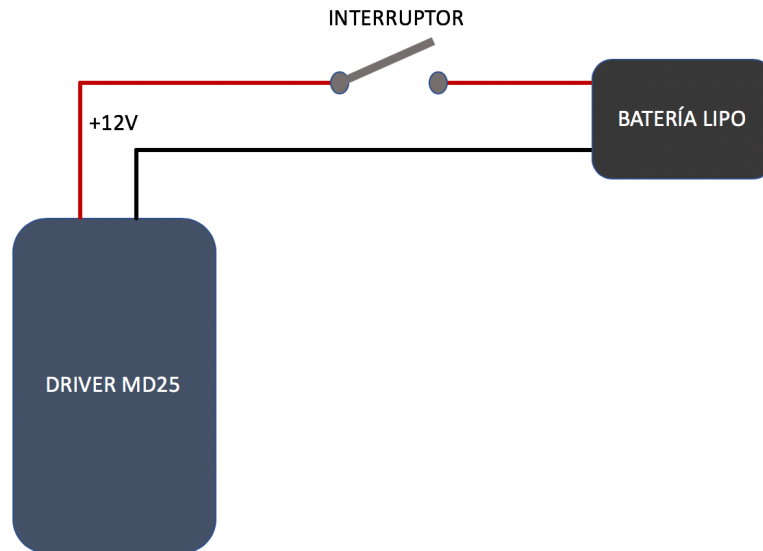


Figura 40: Conexión Driver MD25 - Batería LiPo.

3.3. Pulsador

La función del pulsador se explicara más adelante. Se ha optado por una conexión normalmente abierta, es decir, al pulsar se obtiene un uno (3,3V).

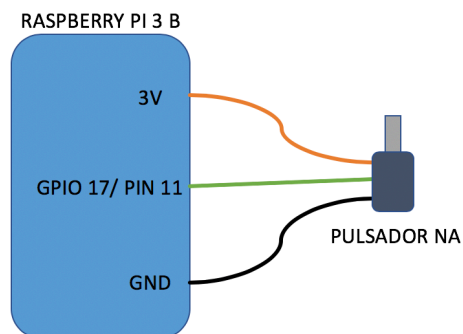


Figura 41: Cableado Pulsador - Raspberry pi 3 B

CAPÍTULO III. SOFTWARE

1. DESCRIPCIÓN

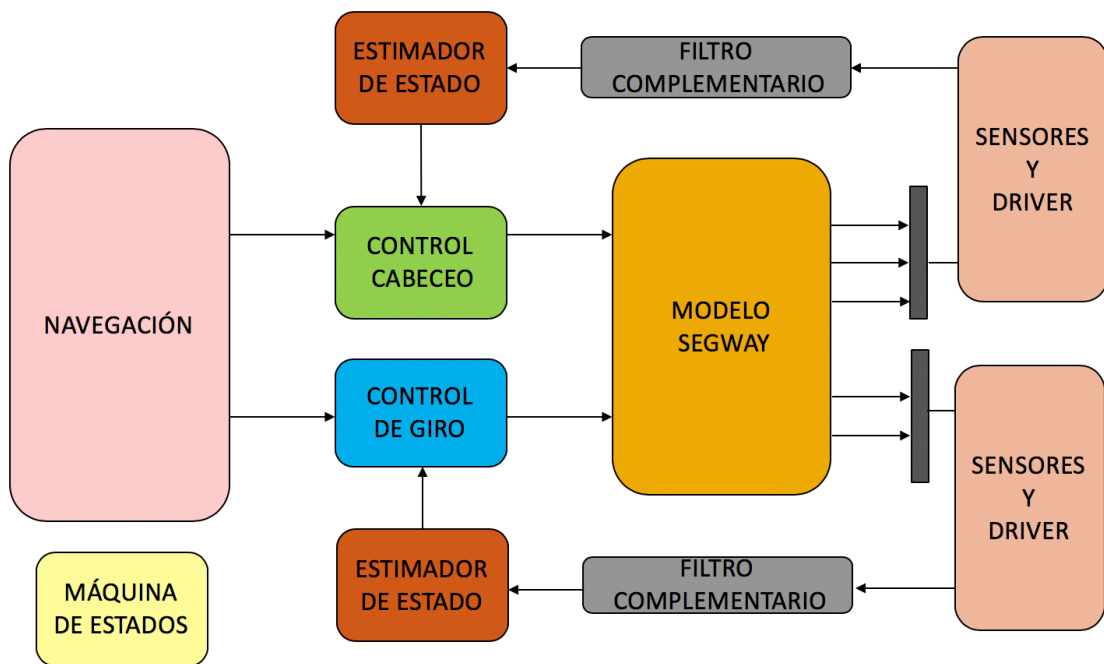


Figura 42: Software completo de vehículo equilibrista

Este proyecto se ha centrado en el control de cabeceo del modelo (ver Figura 43). Es decir las variables de estado son las tres primeras salidas del modelo que son:

θ : Ángulo de cabeceo. $d\theta = w_{\theta}$: Velocidad angular de cabeceo

v : Velocidad de avance del modelo

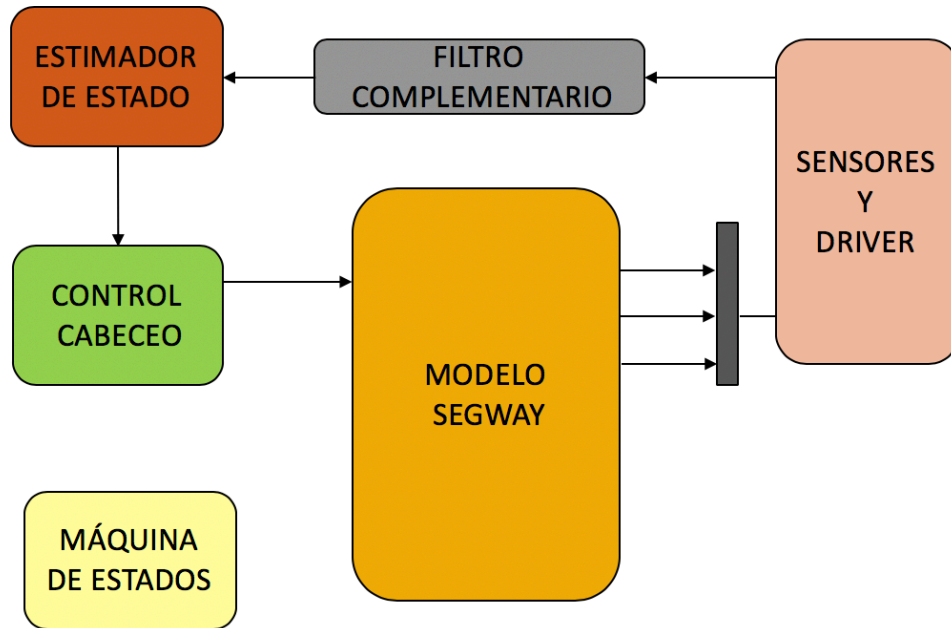


Figura 43: Sistema Software Cabeceo.

2. MODELO NO LINEAL DE VEHÍCULO

El objetivo de dicho apartado es la obtención de un modelo matemático no lineal en tiempo continuo que represente el movimiento del vehículo a dos ruedas y que puede ser de gran utilidad a la hora de elaborar las distintas estrategias de control a través de la simulación del mismo.

Es muy importante destacar que al mantener el equilibrio del vehículo a dos ruedas la vibración respecto al ángulo de cabeceo va a ser mínima. Esto permite utilizar un modelo linealizado en la posición de estabilidad que permite sintetizar el diseño del control. Obviamente, el control creado con ayuda del modelo linealizado únicamente va a trabajar de manera correcta con ciertos valores del ángulo que presenta el vehículo a

dos ruedas comparado con el eje vertical. El número máximo que pueda obtener dicho ángulo será testeado mediante simulación.

Las distintas variables geométricas y mecánicas que van a participar en el modelo de vehículo a dos ruedas son:

- Las variables del motor: resistencia R_m , constantes eléctrica K_e y mecánica K_t , la constante de fricción viscosa D_m , la relación de engranajes n y el par de fricción máximo T_{Rmax} .
- La masa M del chasis.
- La masa m de cada rueda, incluyendo el rotor del motor.
- El momento de inercia I_θ de cabeceo del chasis respecto del eje principal correspondiente que pasa por su centro de gravedad.
- El momento de inercia I_ψ de giro del segway, suponiendo que el chasis está en posición vertical.
- El momento de inercia $I_{mr} = n^2 I_m + I_r$ del conjunto motor más rueda referido al eje externo del motor (eje de salida del sistema de engranajes). El momento de inercia del motor es I_m y el de la rueda I_r .
- La distancia h al centro de gravedad del chasis medida desde el eje de las ruedas.
- La distancia W de separación entre las ruedas.
- El radio R de las ruedas.

Para los actuadores se van a emplear motores DC con imanes permanentes. Estos motores presentan las siguientes ecuaciones:

- Ecuación eléctrica del rotor:

$$U = R_m i + L_m \frac{di}{dt} + e$$

Donde la u representa la tensión de alimentación, e es la F.E.M inducida en el rotor, i la intensidad, R_m la resistencia del rotor y L_m la inductancia de dispersión.

- Ecuaciones electromecánicas

$$T_m = k_t i$$

$$e = k_e w_m$$

Hay que mencionar que T_m representa el par motor que viene provocado por la intensidad del motor, w_m la velocidad de giro entre el rotor y el estator, k_t y k_e las constantes de par y eléctrica respectivamente. Cabe destacar que ambas k tienen un valor parecido.

- Ecuación mecánica:

$$T = T_m - T_R - D_m w_m$$

Donde T representa el par neto en el eje del motor, T_R el par de la fuerza de rozamiento, D_m el coeficiente de fricción viscosa. El par de la fuerza de rozamiento T_R presenta el mismo valor que el par motor si $v = 0$ y T_m es menor que T_{Rmax} . Si atendemos al par motor T_m , en cuanto este supere a T_{Rmax} , el motor empieza a funcionar girando, y en ese mismo instante, T_R presenta su máximo valor, siendo positivo o negativo según el signo que indique el par motor. En el momento en el que el motor gire, T_R mantiene un valor igual a T_{Rmax} y su signo depende de la velocidad de giro del motor. En otro lugar, hay que considerar que la velocidad de giro relativa entre estator y rotor corresponde a la siguiente ecuación:

$$w_m = n w_R - \frac{d\theta}{dt}$$

Dicha ecuación presenta varios términos, w_R representa la velocidad de giro de las ruedas, θ es el ángulo de cabeceo y $\frac{d\theta}{dt}$ es la variación de dicho ángulo con respecto al tiempo, es decir, su velocidad.

En cuanto a la cinemática y dinámica de las ruedas:

- Cinemática de las ruedas:

Si consideramos que no existe deslizamiento en las ruedas, la w_R tiene una relación directa con la velocidad en el eje horizontal de la rueda v_R . Esto se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$w_R = \frac{v_R}{R}$$

- Dinámica de las ruedas:

T , representa el par neto en el eje (la desigualdad entre el par motor que empuja las ruedas y el par de fricción que las está frenando). Esto se puede ver perfectamente en la siguiente ecuación dinámica:

$$nT - F_R R = I_{mr} \frac{dw_R}{dt} = \frac{I_{mr}}{R} \frac{dv_R}{dt}$$

Es muy importante tener en mente que para adquirir las ecuaciones del modelo, hay que dejar bien claro que el avance en el eje horizontal del vehículo de dos ruedas tiene que estar desacoplado del giro de dicho vehículo. La tensión que se suministra a los motores controla tanto el avance en el eje horizontal como el cabeceo del vehículo de dos ruedas. La tensión diferencial es la que controla el giro. En los siguientes apartados se muestran los distintos modelos de control.

3. SISTEMA DE CONTROL

Como sistema de control se ha elegido pues un Regulador de Realimentación de estado. Insertando todos los datos del modelo no lineal anterior calculados se obtiene las siguientes matrices linealizadas:

$$\begin{array}{l} \text{matA} = \\ \begin{array}{ccc} -1.8359e+02 & 4.6609e-03 & -4.5900e+00 \\ 1.8239e+03 & -4.6306e-02 & 1.3755e+02 \\ 0 & 1.0000e+00 & 0 \end{array} \\ \\ \text{matB} = \\ \begin{array}{c} 4.6609e-01 \\ -4.6306e+00 \\ 0 \end{array} \\ \\ \text{matC} = \\ \begin{array}{ccc} 1.0000e+00 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000e+00 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000e+00 \end{array} \\ \\ \text{matD} = \\ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \end{array}$$

Una vez linealizado el modelo, se obtiene la planta requerida (variable de estado theta con respecto a la tensión común):

$$\text{Pth} = \frac{-4.6306 \text{ s}}{(s+183.9)(s+9.458)(s-9.707)}$$

Por último, con una configuración de polos Butterworth se calcula la matriz de realimentación:

$$\text{Ka} = \begin{array}{cccc} -4.0142e+02 & -7.8021e+00 & -8.4536e+01 & 4.0880e+00 \end{array}$$

4. ESTIMADOR DE ESTADO

Como estimador de estado se ha elegido un filtro complementario. Su función es después de filtrar las medidas del giróscopo y acelerómetro, sacar un ángulo estimado mucho más preciso que el medido con el giróscopo. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo.

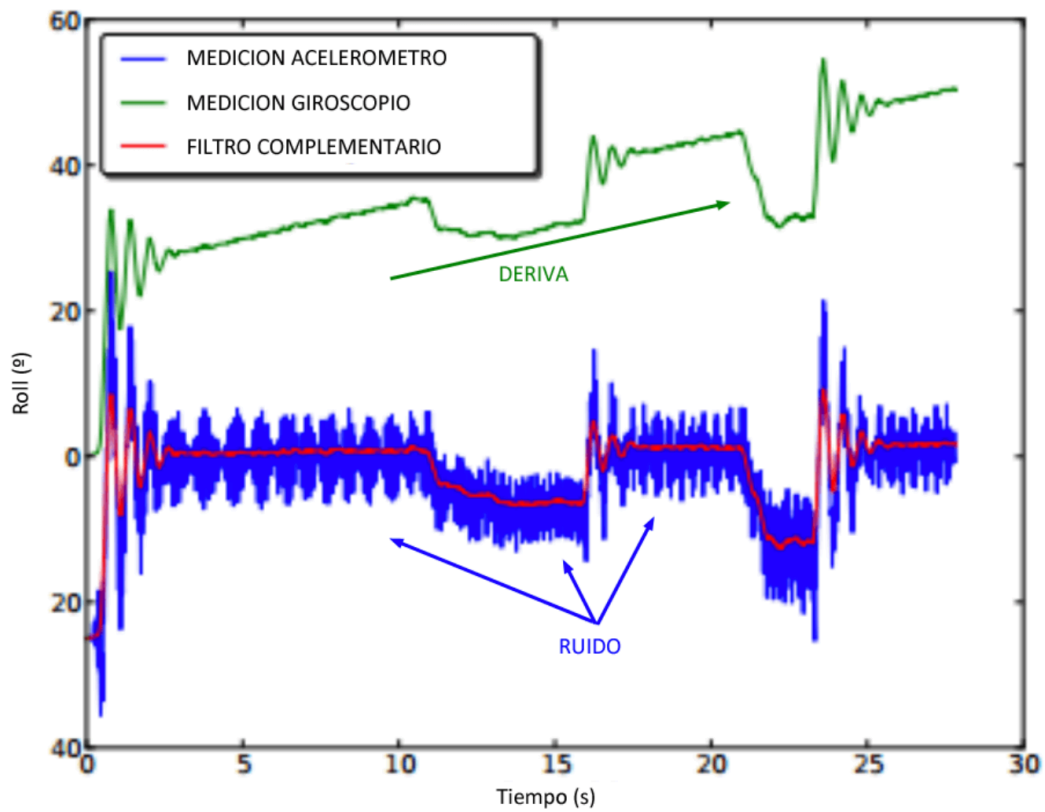


Figura 44: Filtro complementario.

5. MÁQUINA DE ESTADOS

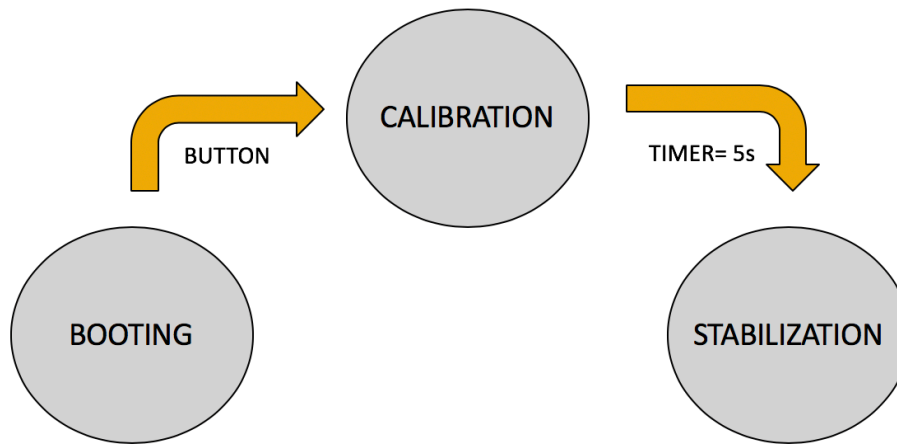
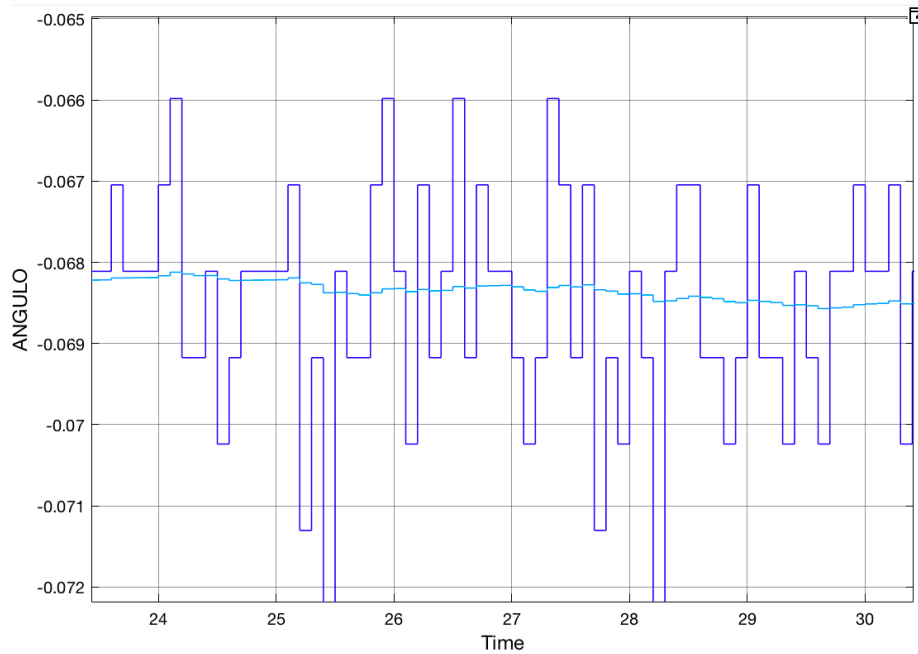


Figura 45: Máquina de estados del sistema

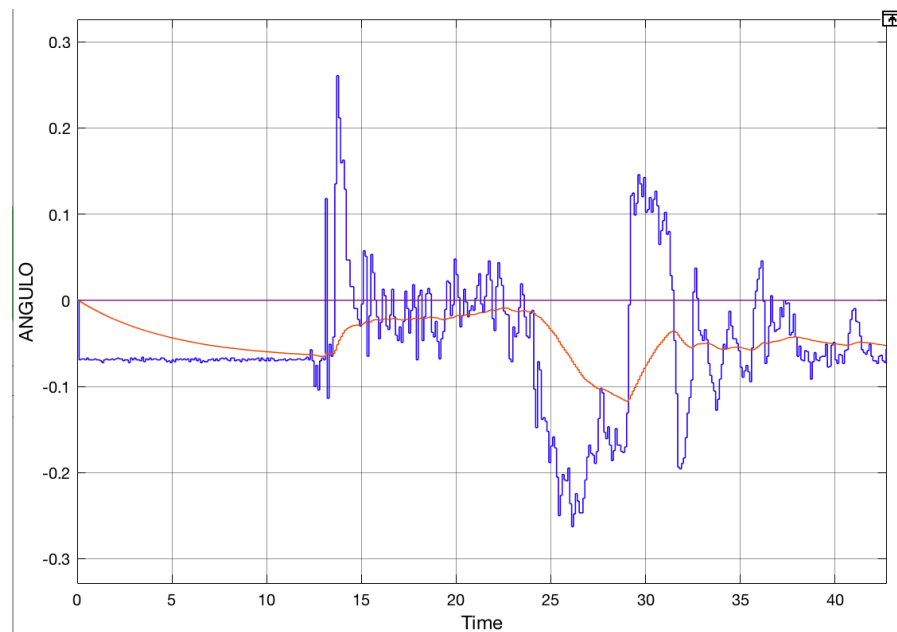
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

1. RESULTADOS

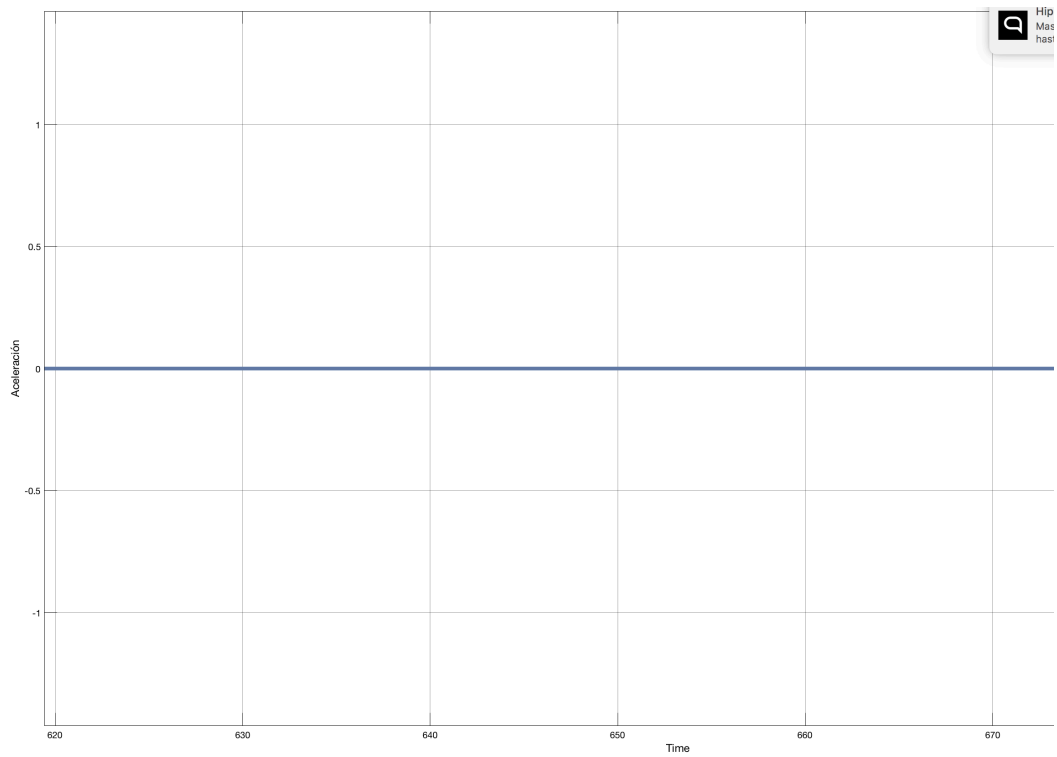
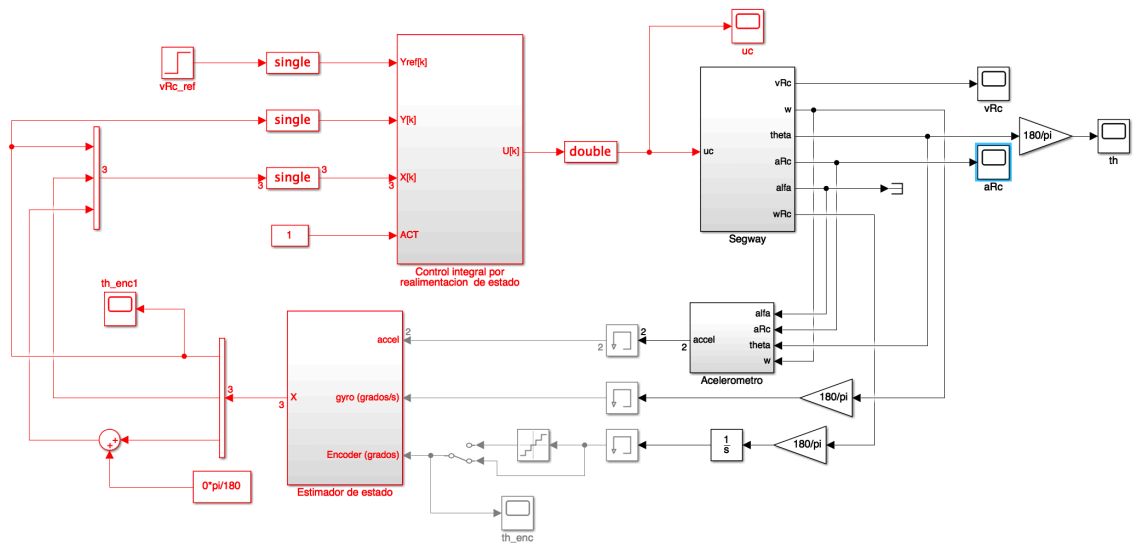
MEDIDA DEL GIRÓSCOPO CON Y SIN FILTRO PASO BAJO

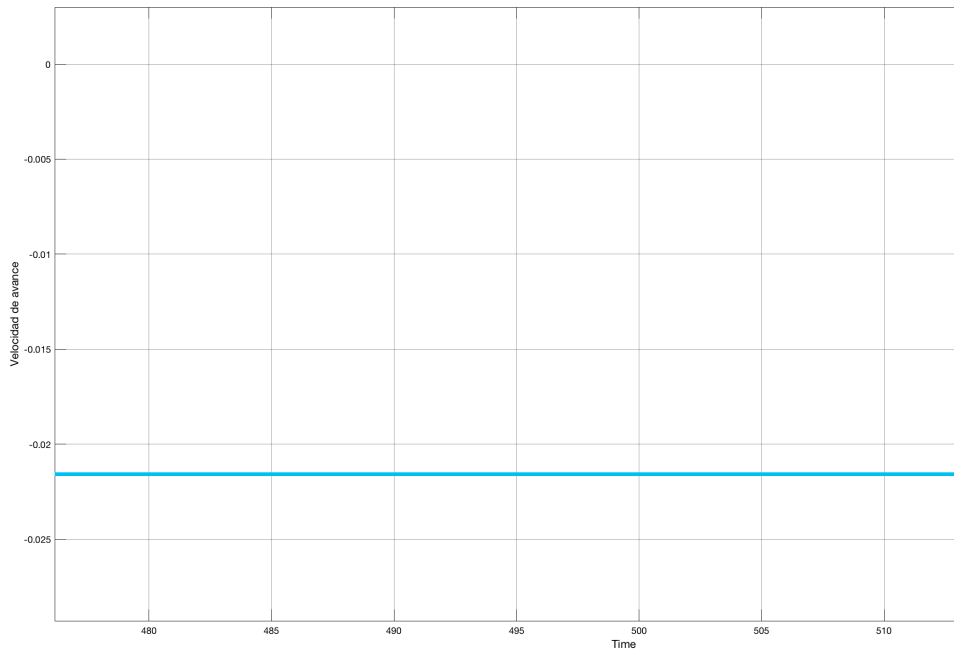
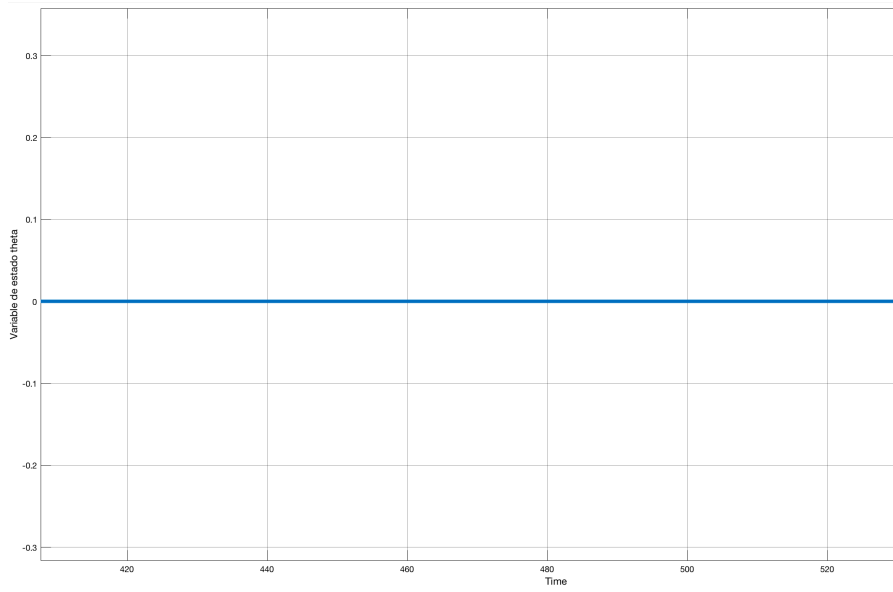


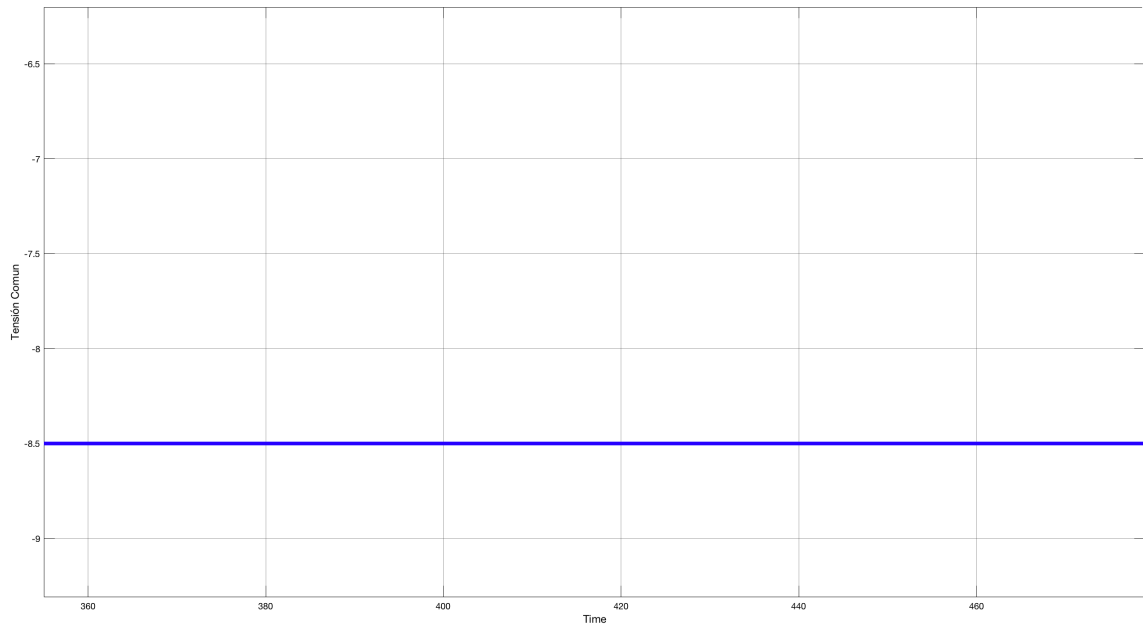
MEDIDA DE ENCODER CON Y SIN FILTRO PASO BAJO



MEDIDAS Y COMPROBACIÓN EN SIMULACIÓN DE SISTEMA COMPLETO







2. CONCLUSIÓN

Se ha obtenido resultados satisfactorios. Individualmente todo funciona a la perfección.

A la hora de implementar el conjunto entero se han obtenido resultados que resultan lógicos pero al no haberse implementado en el vehículo no se ha podido comprobar el funcionamiento real.

3. APORTACIÓN

Con la construcción del vehículo a dos ruedas se han conseguido numerosas aportaciones que comentaremos en este apartado.

En primer lugar, hay que destacar que se trata de un prototipo completamente nuevo, no hay ningún vehículo equilibrista en el mercado con el material utilizado y a un precio tan competitivo. Ver presupuesto en el ANEXO IV.

Se ha buscado mejorar vehículos existentes que funcionaban con otros microcontroladores y con otro tipo de comunicación. En concreto, el referente ha sido el segway NXT Way de LEGO MINDSTORMS. Dicho vehículo como ordenador presenta el microcontrolador NXT que está muy lejos de los microcontroladores más avanzados que se pueden ver hoy en día en el mercado, como por ejemplo, la Raspberry Pi 3 B. Además, la única comunicación que tiene integrada este robot es por bluetooth, en un ambiente donde existen interferencias, como puede ser un laboratorio de un colegio o universidad, esta comunicación es muy débil; los motores son de poca potencia y la estructura del Lego no es robusta.

No solo se está mejorando el diseño si no que se está ayudando a nivel académico a introducir el uso de raspberry que es el microordenador más utilizado en la actualidad.

Para finalizar, crear un vehículo eléctrico aunque sea a pequeña escala es un paso adelante hacia los vehículos de energías limpias.

4. FUTUROS DESARROLLOS

Este proyecto representa la fase 0 de un proyecto más avanzado en el que se pretende mejorar el diseño de la estructura del protoripado. Se busca un prototipo mas compacto en el que los componentes estén más protegidos frente a cualquier golpe que se pudiera ocasionar.

También se podría estudiar la eliminación de una rueda. Esto supondría un nuevo reto, muy interesante y que no existe para uso didáctico. Esto supondría un nuevo grado de libertad en el eje ortogonal restante. Se pasaría de un sistema en una como en el caso de una moto.

Otro posible desarrollo, sería el control del vehículo a dos ruedas mediante un mando a distancia o una APP. La funcionalidad que se le ha otorgado al vehículo mediante el conexionado a través de una red wifi, podría abrir el campo de los dispositivos inalámbricos en un futuro.

Para finalizar, se podrían añadir nuevas funcionalidades al vehículo de dos ruedas. Algunas propuestas podrían ser, el seguimiento de una pared, movimiento autónomo en un recinto cerrado o el seguimiento de una trazada en el suelo.

REFERENCIAS

- [1] Wikipedia, «iBot,» 18 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/IBOT>.
- [2] F. Magacine, 2018. [En línea]. Available: <http://2.bp.blogspot.com/-Wc6qblyfwzk/UJffXn9ZAgI/AAAAAAAAEAY/Ik5a-bfMHng/s1600/i2-Base.jpg>.
- [3] «Estudio del pénculo invertido,» 2013. [En línea]. Available: <http://matlabyoctave.appspot.com/invpend/invpend.html>.
- [4] Segway, 2016. [En línea]. Available: <http://es-es.segway.com/>.
- [5] Demimetro, «BlogSpot,» 3 Junio 2012. [En línea]. Available: http://1.bp.blogspot.com/-8FTpY-ndy68/T8uEf6s9zDI/AAAAAAAAAOE/hhU-26Rv_pk/s1600/171segway+pt.jpg.
- [6] BlogTecnocio, «Guía para comprar segways baratos al mejor precio,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.tecnocio.com/blog/guia-para-comprar-segways-baratos-mejor-precio/>.
- [7] C. M. Inc., 2016. [En línea]. Available: <https://www.cocoamotors.com>.
- [8] C. M. Inc., <https://www.cocoamotors.com>, 2016. [En línea].
- [9] SCEWO, 2018. [En línea]. Available: <https://scewo.ch/?lang=en>.
- [10] Scewo, 2018. [En línea]. Available: <https://scewo.ch/?lang=de>.
- [11] P. Evans, «GM and Segway Join forces to reinvent urban transportation,» 2009. [En línea]. Available: <https://newatlas.com/segway-car-project-puma/11413/>.
- [12] «LEGO,» [En línea]. Available: <https://www.lego.com/es-es/mindstorms>.
- [13] «Team HassanPlug,» [En línea]. Available: <http://www.teamhassenplug.org/robots/legway/>.
- [14] «PhiloHome,» [En línea]. Available: <http://www.philohome.com/nxtway/nxtway.htm>.
- [15] «Engadget,» [En línea]. Available: <https://www.engadget.com/2007/03/13/lego-mindstorms-nxtway-g-much-cooler-than-segway/?guccounter=1>.

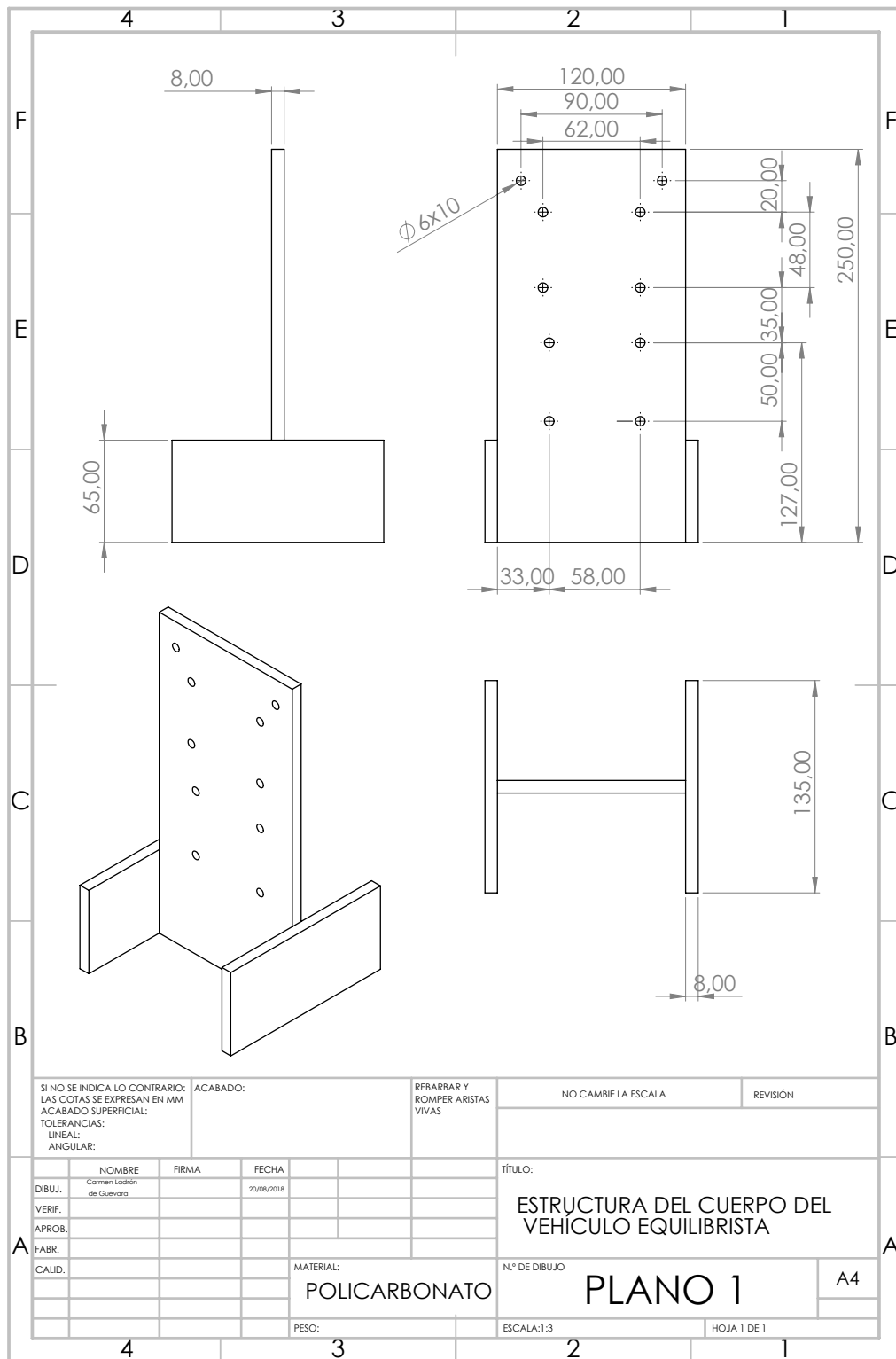
- [16] «MAKERSTUDIO,» [En línea]. Available: http://makerstudio.cc/index.php?main_page=product_info&products_id=347.
- [17] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit.
- [18] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_medici3n_inercial.
- [19] «Aircraft principal Axes,» 15 Julio 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_principal_axes.
- [20] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Gir3scopo>.
- [21] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Gir3scopo_de_estructura_vibrante.
- [22] «MCI,» [En línea]. Available: <http://cursos.olimex.cl/giroscopio/>.
- [23] «MEGA,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>.
- [24] «Sistemas Microelectromecánicos,» [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/213/4/A4.pdf>.
- [25] «IoT Agenda,» [En línea]. Available: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/micro-electromechanical-systems-MEMS>.
- [26] «Aula Clic, Comunicación Inalámbrica,» [En línea]. Available: <https://www.aulaclic.es/articulos/wifi.html>.
- [27] «Arduino Verkstad Education,» [En línea]. Available: <http://ctc-dev.verkstad.cc/es/course-literature/tipos-de-motores/>.
- [28] AliExpress, «Motor DC,» [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/775-DC-Motor-DC-12V-36V-3500-9000-RPM-Ball-Bearing-Large-Torque-High-Power-low/32814556057.html>.
- [29] ElectroniLAB, 2018. [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/motor-paso-a-paso-nema-23-125-oz-in-200-pasos-vuelta/>.
- [30] «Raspberry pi Tutorials: Servomotor Cycle,» 2018. [En línea]. Available: <https://tutorials-raspberrypi.com/raspberry-pi-servo-motor-control/>.

- [31] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_controller.
- [32] «Robots Arg.,» [En línea]. Available: http://robots-argentina.com.ar/MotorCC_ControlAncho.htm.
- [33] «Org. Arte y Medios,» [En línea]. Available: <http://arteymedios.org/tutoriales/item/76-controlar-motores-de-corriente-continua-con-puente-h>.
- [34] «Controlador de Motores de doble puente H L298N,» 2018. [En línea]. Available: <https://tienda.bricogeeek.com/motores/285-controlador-de-motores-doble-puente-h-l298.html>.
- [35] Xdrones, «MAVLink: protocolo de comunicación para drones,» [En línea]. Available: <http://www.xdrones.es/mavlink/>.
- [36] SINONING, «Coche robot auto-equilibrio Kit Chasis,» [En línea]. Available: https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1t_9sJVXXXXXHXVXXq6xXFXXd/self-balancing-robot-car-2WD-Chassis-Kit-large-motor-balanced-car-chassis.jpg_640x640.jpg.
- [37] «Brida,» 2018. [En línea]. Available: https://www.bricolemar.com/4839-large_default/brida-nylon-negra-100x25-bolsa-100-unidades-damesa-cofil.jpg.
- [38] «Self balancing Frame Smart Car,» [En línea]. Available: <https://m.banggood.com/Self-balancing-Frame-Smart-Car-Balance-Car-Chassis-p-1020680.html>.
- [39] [En línea]. Available: http://1.bp.blogspot.com/-8FTpY-ndy68/T8uEf6s9zDI/AAAAAAAAAOE/hhU-26Rv_pk/s1600/171segway+pt.jpg.
- [40] MikroElektronica, 2018. [En línea]. Available: <https://www.mikroe.com/mpu-imu-click>.
- [41] MikroElektronika, «Pi 3 Shield,» [En línea]. Available: <https://www.mikroe.com/pi-3-click-shield>.
- [42] Robotshop, «Devantech M25 Dual 12V,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.robotshop.com/en/devantech-md25-dual-h-bridge-dc-motor-driver.html>.
- [43] Adafruit, «Pi-EZ Connect,» [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/2711>.
- [44] GearBest, «Redulador UBEC,» [En línea]. Available: https://es.gearbest.com/esc/pp_1403871.html?wid=1433363¤cy=EUR&vip=14489724&gclid=Cj0KCQjwn4ncBRCaARIsAFD5-gVn-ST4iFE617eaBQ4b7YqGwaoxfRkWJcHESc41GpC6dVD8Apkl-XIaAj4AEALw_wcB.

- [45] Sparkfun, «Conversor Lógico de nivel,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/12009>.
- [46] HobbyelecTronics, «Turnigy Nano-Tech 11.2V LiPo Battery,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.hobbytronics.co.uk/turnigy-11v2-1000-lipo>.
- [47] RS, «Interruptores y pulsadores,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com>.
- [48] BikeVillage, «Guía cables,» 2018. [En línea]. Available: https://www.thebikevillage.com/9051-large_default/guia-de-cuadro-adhesiva-para-cables-de-freno-disco.jpg.

ANEXOS

ANEXO I. PLANO DE DETALLE ESTRUCTURA



ANEXO I. PLANO DE DETALLE CHÁSIS

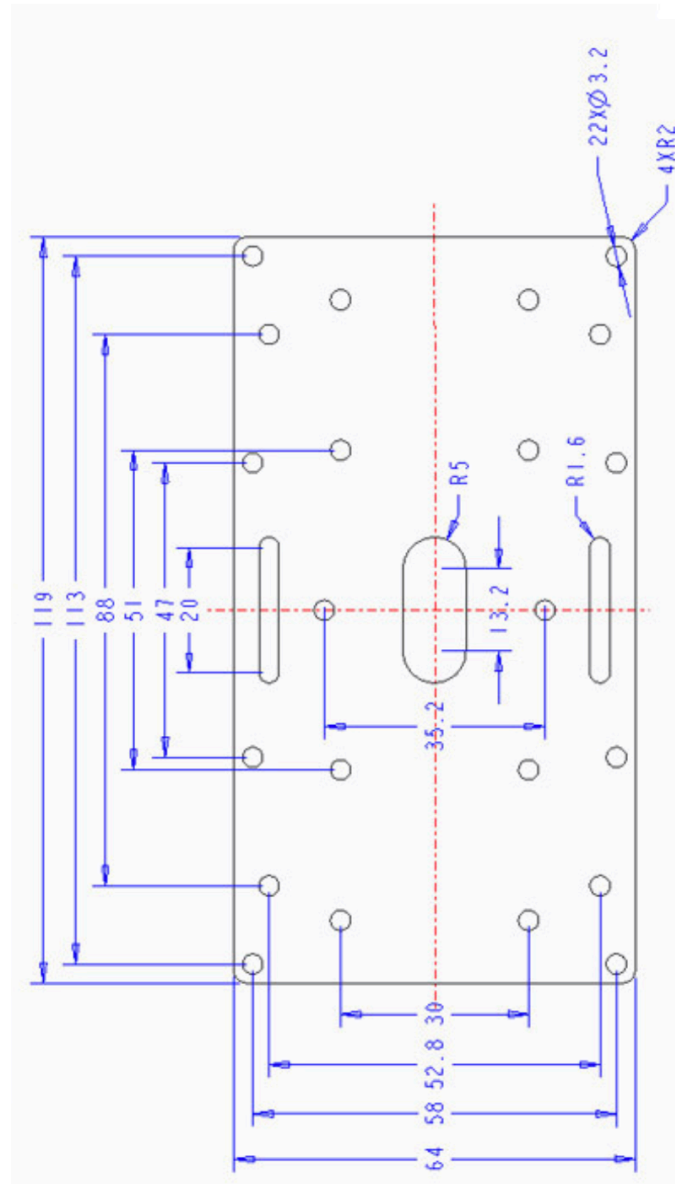


Figura 46: Cotas Chásis Vehículo (mm). [38]

ANEXO III. MAPA PINES RASPBERRY PI 3 B

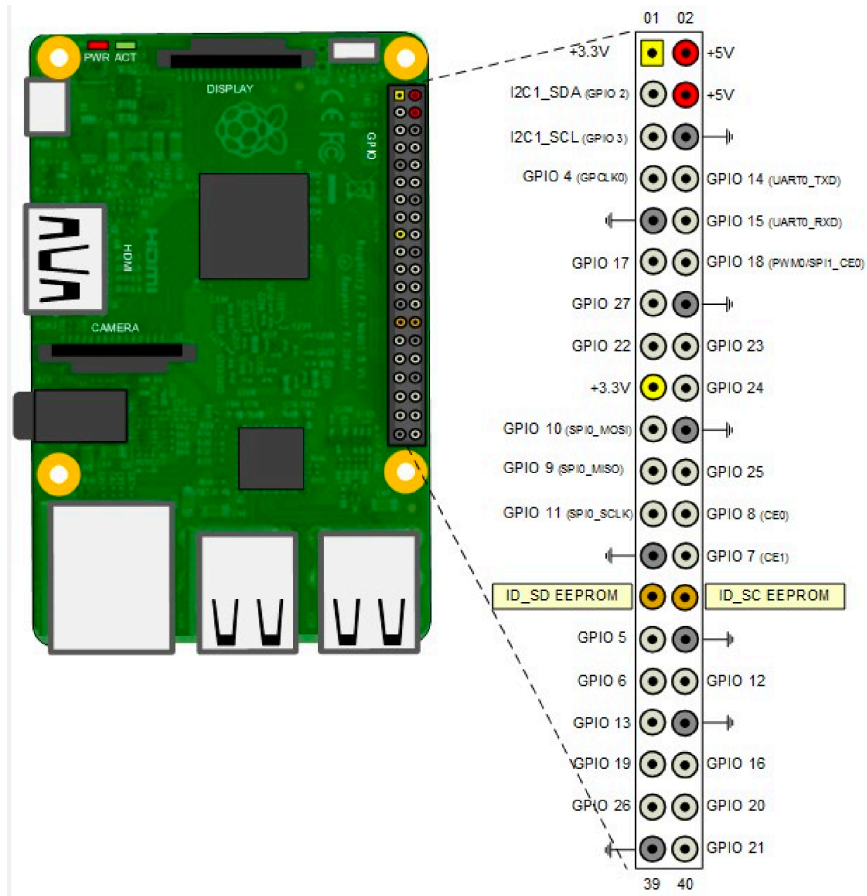


Figura 47: Pines GPIO Raspberry pi 3 B

ANEXO IV. MAPA PINES DRIVER MD25

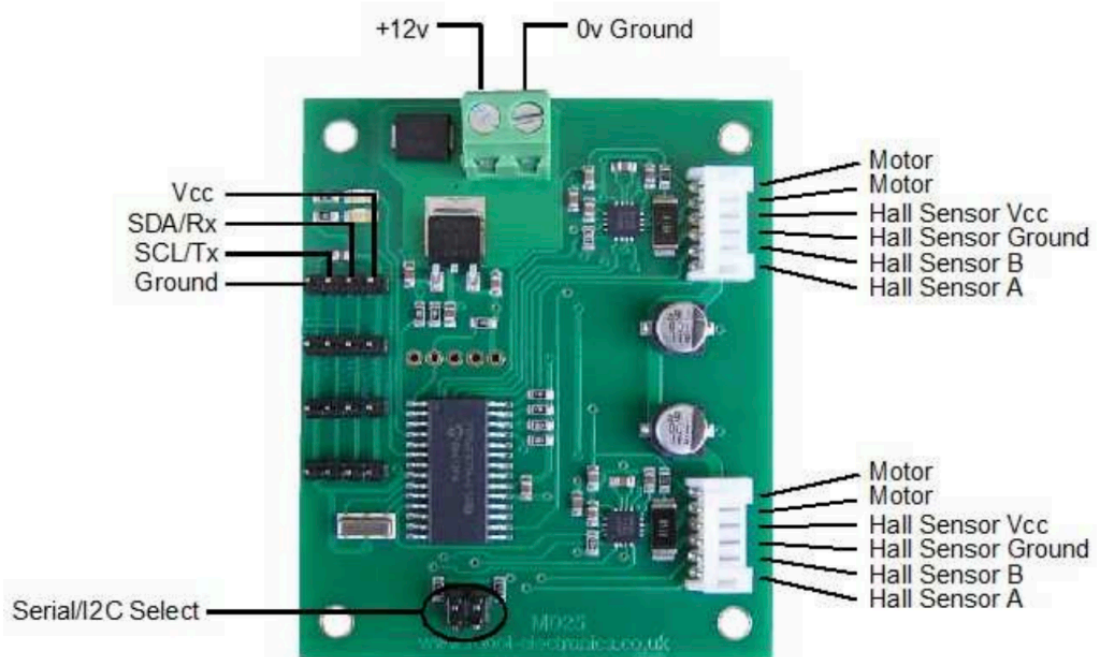


Figura 48: Pines MD25. Encoder y Transmisión.

ANEXO V. PRESUPUESTO

COMPONENTES HARDWARE

Componente	Cantidad	Precio Unitario (€)	Coste Parcial (€)
Raspberry Pi 3B	1	39	39
IMU MPU9250	1	33,55	33,55
Motores DC (+ chásis)	1	40,54	40,54
Driver MD25	1	47,58	47,58
Pi 3 Click Shield	1	10,32	10,32
Pi 3 Hat	1	17,56	17,56
Regulador de tensión UBEC	1	2,29	2,29
Convertor lógico de nivel	1	2,29	2,29
Pulsador	1	1,73	1,73
Interruptor	1	0,84	0,84
Batería LiPo 3s 1000 mAh	1	8,35	8,35
		TOTAL	204,05

COMPONENTES SOFTWARE

Programa	Cantidad	Precio Unitario (\euro)	Coste Parcial (\euro)
Matlab/Simulink estudiante versión	1	125	125
		TOTAL	125

ESTRUCTURA DEL VEHÍCULO

Componente	Cantidad	Precio Unitario (\euro)	Coste Parcial (\euro)
Plicarbonato Lados	2	1,4	2,8
Plicarbonato Vertical	1	5,23	5,23
Tornillos 6mm	12	0,05	0,6
Otros			5
		TOTAL	13,63

PRESUPUESTO FINAL

Elemento	Suma Parcial
Estructura del vehículo	13,63
Componentes hardware	204,05
Programas software	125
TOTAL	342,68

