



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL ELECTROMECAÁNICO

*SISTEMA DE TRACCIÓN Y DE GESTIÓN
DE LA BATERÍA DE UN VEHÍCULO
ELÉCTRICO PARA PAÍSES EN VÍAS DE
DESARROLLO*

AUTOR:

Carla Lamadrid Orús

DIRECTORES:

Carlos Castejón de Castro

Álvaro Sanchez Miralles

MADRID

JULIO 2018

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

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

El autor: D.^a _____ CARLA LAMADRID ORÚS

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: _____
"SISTEMA DE TRRACCIÓN Y DE GESTIÓN DE LA BATERÍA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO"
_____, 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) Reproducir 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.

6°. 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.

Madrid, a 25 de JULIO de 2018

ACEPTA

Fdo. 

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
"Sistema de tracción y de gestión de la batería de un vehículo eléctrico para
países en vías de desarrollo"

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.: Carla Lamadrid Orús

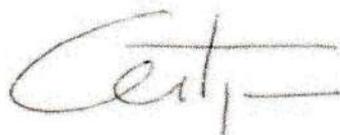
Fecha: 20 / 07 / 2018

Autorizada la entrega del proyecto
LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: ~~Alvaro Sánchez Miralles~~

Fecha: 20 / 07 / 2018



Fdo.: Carlos Castejón de Castro

Fecha: 20 / 07 / 2018

RESUMEN

Introducción

En un mundo en el que la brecha tecnológica entre países desarrollados y países en vías de desarrollo crece de forma exponencial, provocando un aumento en las desigualdades entre ambos, cada vez más proyectos encuentran su motivación en la posibilidad de ayudar a combatir o mitigar ese desequilibrio.

Dada la naturaleza del presente proyecto y su área de aplicación, será interesante resaltar ciertos aspectos sobre el acceso a la energía y el transporte en países en vías de desarrollo, respaldando la ejecución del mismo.

El acceso a la energía es un bien imprescindible para el desarrollo de un país en ámbitos tan importantes y necesarios como la educación, la sanidad, el transporte o el agua potable, entre otros. Y, sin embargo, a día de hoy, según datos del Banco Mundial de la Energía, todavía 1060 millones de personas en el mundo viven sin acceso a electricidad [1]. Por otra parte, los vehículos son otro bien escaso en estos países donde un bajo porcentaje de la población disfruta del uso de un medio de transporte ya sea público o privado. Las razones se suman, desde la escasez de unidades, la dificultad de conseguir combustible, o la falta y baja calidad de infraestructura hasta el alto coste que supone su compra y mantenimiento.

Un vehículo eléctrico ofrece numerosas ventajas frente a las barreras de crecimiento y uso expuestas anteriormente. Se liberan de la dependencia de los combustibles fósiles, reducen costes tanto en mantenimiento, gracias a la simplicidad y bajo número de componentes de un vehículo eléctrico, como en el uso diario debido al bajo precio de la energía eléctrica como combustible. Además, con las modificaciones y añadidas que se van a presentar en este proyecto, serán capaces de transportar energía y suministrarla allá donde vayan, presentando una solución a la barrera del acceso a la energía.

Metodología

Habiéndose expuesto los argumentos que motivan el desarrollo de este proyecto, se presentan los detalles de su ejecución.

El proyecto consiste en el diseño, construcción y validación de un modelo real a escala 1:3 de un vehículo eléctrico todoterreno con extensor de autonomía capaz de almacenar, transportar y entregar energía electromecánica allá donde se desplace. Por ello, los principales objetivos del proyecto serán el control de la tracción y cinemática de los cuatro motores en rueda y el control y gestión de la carga y descarga de la batería. La Figura 1 representa el diseño a diseñar mostrando los componentes para el alcance de ambos objetivos.

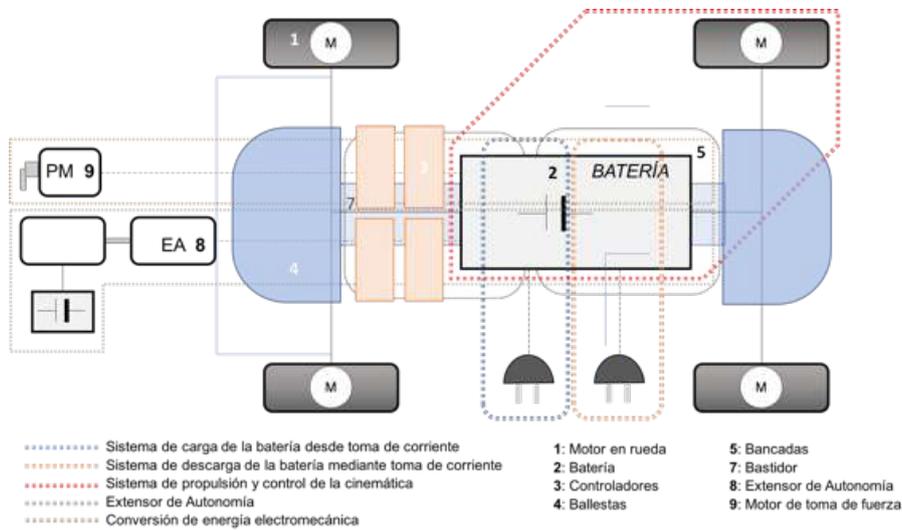


Figura 1: Esquema del vehículo a implementar con los elementos del control cinemático y de la gestión de la batería

Se construirá un vehículo inspirado en la estructura de los todoterrenos militares, tipo el Jeep Willys, y los todoterrenos Rover, tipo el vehículo lunar en las misiones Apollo 15, 16 y 17 [2]. Se eligen estos vehículos por tener una mecánica simple, robusta y muy fiable, características mecánicas que se busca lograr en el diseño del modelo. Puesto que el objetivo último de este proyecto es el de validar el funcionamiento del modelo para la posterior construcción de un vehículo real a escala 1:1, las especificaciones de diseño se derivarán de las deseadas en dicho vehículo real.

El modelo se compondrá del mínimo de elementos, un bastidor flexible que permita la eliminación de la suspensión de las ruedas, y unas piezas para la sujeción de las mismas que permitan su libre giro. La potencia del vehículo provendrá de los cuatro motores en rueda que estarán alimentados por una batería de alta capacidad y alto número de ciclos de carga.

El control de la tracción y de la cinemática se conseguirá mediante el uso de cuatro controladores y un microcontrolador. El microcontrolador generará la señal de control de la velocidad de cada motor en función de sus variables de entrada. Estas serán la lectura de la velocidad de avance demandada al vehículo y el giro del mismo, por un lado, y la petición o no, del freno, del retroceso del vehículo o del giro sobre sí mismo. Por tanto, las cinemáticas con las que se dotará al modelo serán la cinemática simple de *Ackermann*, siendo las ruedas delanteras las directrices, y la posibilidad de rotar sobre sí mismo para tomar cualquier trayectoria.

Por otro lado, la gestión de la batería supondrá el control sobre sus estados de carga y descarga. Los posibles métodos de carga serán desde una toma de corriente mediante su cargador, mediante la entrega de un par mecánico desde el exterior y mediante un extensor de autonomía. Los dos últimos métodos forman parte del Trabajo de Fin de Grado asociado al presente Trabajo de Fin de Master y, por tanto, su explicación quedará fuera del alcance de este proyecto. Así mismo, los modos de descarga serán a través de una toma de corriente, haciendo que el vehículo sea una fuente de energía segura, mediante la propulsión del vehículo o mediante la entrega de un par mecánico al exterior.

Resultados

Tras el diseño e implementación del modelo descrito, Figura 2, se valida su funcionamiento, primero sobre un solo motor y, más adelante, sobre dos motores ya que no se recibió la batería a tiempo para poder alimentar los cuatro al mismo tiempo. Ambas pruebas resultaron satisfactorias comprobando el diseño del acondicionamiento de señales analógicas para el control del motor y la programación de la Máquina de Estados para la gestión de su comportamiento.

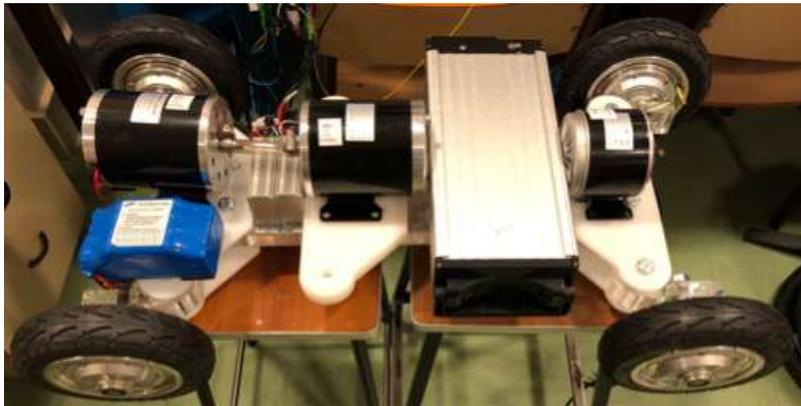


Figura 2: Montaje final del vehículo eléctrico

El giro del vehículo se lee de un potenciómetro acoplado a la rueda delantera izquierda. El resto de consignas se manejan desde un mando de control donde la velocidad de los motores se controla mediante un potenciómetro, dos pulsadores generan la petición de freno y de Giro sobre sí mismo, respectivamente, y un interruptor pide el cambio de giro de los motores para hacer retroceder al vehículo.

Los motores aumentan y reducen su velocidad acorde con el valor del potenciómetro y, en ambos casos, lo hacen de forma progresiva con la programación de rectas de aceleración y frenado. Para las cinemáticas que precisen invertir el sentido de giro de dos o los cuatro motores, Giro sobre sí mismo y retroceso del vehículo, respectivamente, se obliga al previo frenado por completo del vehículo para proteger los motores. Por último, el giro sobre sí mismo implicará rotar las ruedas aproximadamente 45° en sentido antihorario, asignarles las mismas velocidades e invertir el sentido de giro a dos de sus motores, los izquierdos en esta implementación.

Los estados de carga condicionan la cinemática del vehículo. Si se está produciendo la carga de la batería mediante un par externo o el cargador, se fuerza al frenado por completo del vehículo hasta que no exista dicha fuente de energía. De forma análoga, la descarga de la batería siendo el vehículo una toma de corriente o para entregar un par externo, invalidará la posibilidad de avance del mismo.

Conclusiones

Habiendo validado el diseño y funcionamiento del control de la cinemática del vehículo eléctrico y de la gestión de los estados de carga y descarga de la batería, se puede concluir que el modelo a escala supone la comprobación de que el vehículo final a escala 1:1 cumplirá satisfactoriamente con sus objetivos.

Será un vehículo simple y robusto, gracias al mínimo de piezas exigidas por un vehículo eléctrico y a una cinemática simple y fiable, abaratando los costes de producción y de mantenimiento y haciéndolo fácil y seguro de manejar.

Será un vehículo capaz de transitar por terrenos complicados gracias a una estructura resistente y flexible, a la potencia entregada por una batería de alta capacidad y a la cinemática con la que se dota al vehículo. Gracias a ello se cree en el potencial del vehículo para servir de ayuda en tareas de mantenimiento en zonas de difícil acceso, en catástrofes naturales, entre otros.

Por último, será capaz de transportar, almacenar y entregar energía allá donde vaya gracias a la batería de alta capacidad y de su alto número de ciclos de recarga, y a los distintos medios de conversión electromecánica con los que cuenta el vehículo.

Referencias

- [1] Banco Mundial, 2018. Available: <http://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>.
- [2] C. S. W. C. M. Earnest, «Lunar Roving Vehicle Navigation System Performance Review,» Whashington DC, 1973.
- [3] A. M. Morote, «Diseño de extensor de autonomía y gestión de la batería de un vehículo eléctrico,» 2018.

ABSTRACT

INTRODUCTION

In a world where differences among developed countries and developing ones is growing apart at a fast pace, an increasingly number of projects find their motivation in the possibility of helping these to mitigate or erase some inequalities.

Given the nature of this project and its application area, it is interesting to point out some important aspects about access to energy and transportation in developing countries, supporting the execution of this work.

As it is known, access to energy has a vital impact on the development of a country in such important aspects as education, healthcare, transportation or drinking water, among others. Despite this, there are still 1060 million people in the world living without access to electricity, according to the World Bank [1]. Also in these countries, exists a lack of vehicles, where a high percentage of the population have no access to the use of transportation methods, private nor public. Some reasons are the shortage of vehicles, the difficulties to get fuel, the low quality or lack of infrastructure or the high cost related to maintenance and purchase.

An electric vehicle offers many advantages to overcome the unbalances and difficulties that were just mentioned. It first gets rid of the dependency over fossil fuels, it then reduces costs related to maintenance, due to the simplicity and a minimum number of elements this kind vehicle needs, and daily use, due to the low price of electricity as fuel. Moreover, thanks to the extra elements of design that will be presented in this project, the vehicle will be able to transport and deliver energy wherever it goes, becoming a potential solution to the lack of energy access.

METHODOLOGY

The project consists on the design, construction and validation of a real model at scale 1:3 of an electric vehicle with a range extender that is capable of storing, transporting and delivering electromechanical energy wherever it goes. In consequence, the main objectives are, kinematics and traction control of the four motor-wheels and the managing of the battery's charge. Figure 1 represents the design of both control systems that want to be developed with all the pertinent elements to achieve both goals.

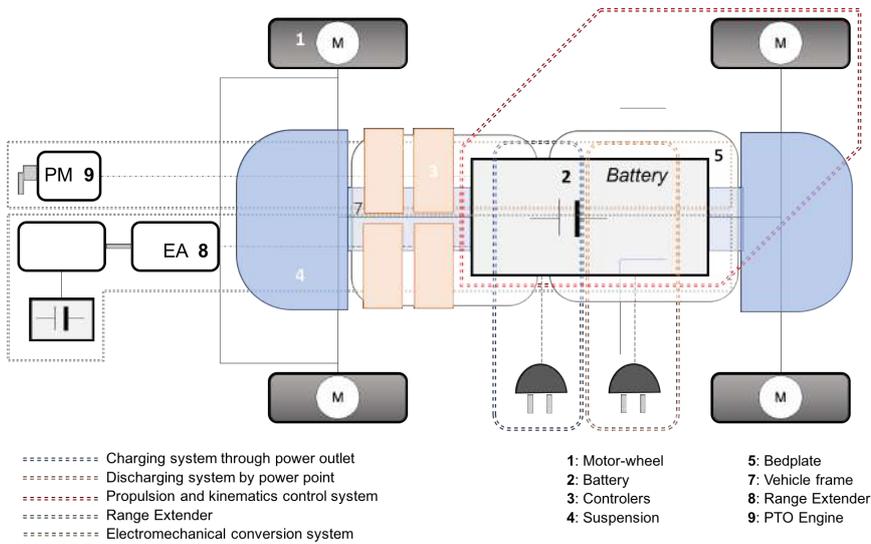


Figure 1: Vehicle's schematic design with all necessary elements for the traction control and the battery management

The design will be inspired in the structure of military all-terrain vehicles, as Jeep Willys, and rover vehicles such as the Lunar Roving Vehicle of Apollo missions 15, 16 and 17 [2]. These were chosen because of the simplicity, ruggedness and reliability of their designs, characteristics sought to be implemented in the design of this vehicle.

Given that the ultimate goal of the project is to validate the functioning of this model to continue with the construction of a real vehicle scale 1:1, the design specifications will be derived from the ones wanted in the real final vehicle.

This model will be completed with the minimum number of elements, a flexible vehicle frame, that will annul the necessity of wheel suspension parts, and wheel supporting elements that allow them to turn freely.

The vehicle's power will be provided by the four electric motors embedded in the wheels which will be powered by a deep cycle battery with high number of charging cycles for long lasting use.

Kinetics and traction control will be accomplished using four motor controllers and a microcontroller. The last one, will generate the output signals to control each motor depending on the inputs values. These inputs will be, on the one hand, the measurement of the front wheel's angle and the moving speed demanded to the vehicle and, on the other hand, the existence or non-existence of a Stop, Reverse or Rotate over its own axis demand. Therefore, the provided kinematics are Simple *Ackermann*, where the front wheels are the steering wheels, and Rotate over its own axis to redefine to any possible trajectory.

The battery charging control will imply the managing of its charge and discharge. The possible charging sources will include a power point from the charger, the use of a range extender and a mechanical torque coming from a power take-off engine (PTO engine). The last two, constitute the TFG [3] associated to this TFM and thus won't be subject to be analyzed in this dissertation. The discharge methods will be the own propulsion of the vehicle, a power outlet, where the vehicle itself becomes a secure power point, and, again, the delivery of a torque through the PTO engine.

Results

After the design and assembly of the described model, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., the first validation took over one motor, continued by validations over two motors powered simultaneously. The four couldn't be powered at the same time due to a delay in the battery delivery.

Both tests were run successfully, proving that the conditioning of Hardware signals and the programming of the Finite-State Machine that describes the behavior of the system, were correctly achieved.

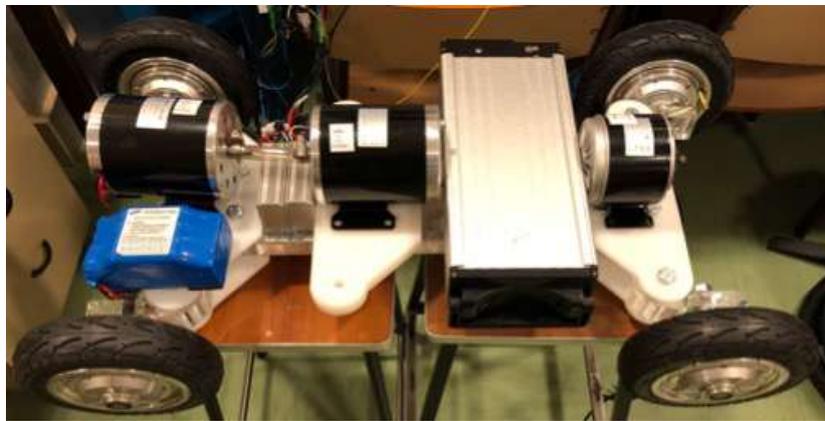


Figure 2: Final assembly of the electric vehicle and its components

The angle of the vehicle is measured by a potentiometer assembled in the left front wheel. The remaining variables will be controlled from a control panel where the moving speed is set by another potentiometer, two push-buttons generate the Stop or Turning over its own axis requests and a switch enables to reverse the spinning direction of the four wheels.

Motors accelerate and decelerate gradually according to the potentiometer's value. Both transitions are programmed to follow an acceleration or deceleration line, respectively. For kinematics that need of a wheel to reverse its turning direction, Rotate over its own Axis and Reverse, the vehicle is first obliged to stop to protect its motors from blocking. Finally, Rotate over its own axis is defined by the same speed in every wheel, inverting left wheel's turning direction and by rotating all wheels 45° counter clockwise.

Vehicle's kinematics is conditioned by the charging state of its battery. This is, if there exist a torque in the PTO engine, whether its charging or discharging the battery, the vehicle will be forced to have null velocity. The same will happen if the battery is getting charged by the charger or if it is getting discharged through a power point.

Conclusions

Having had validated the design and the well-functioning of the kinetics control and the managing of the vehicle' battery, it can be concluded that the scaled model confirms that the real final vehicle at scale $1:1$ will succeed in reaching its objectives.

This will be a simple and robust vehicle thanks to a minimum of necessary elements in the construction of an electric vehicle and to a simple and stable kinematics control system. These will reduce maintenance and production costs as well as making the drive easy and secure.

The vehicle will be able to transit through rough land due to the resistant and flexible structure it is made off, to the power delivered by a deep cycle battery and to the kinematics with which the vehicle is endowed. All of this supports the idea of the design to procure a potential help during maintenance work in restricted or hazardous areas, in non-accessible areas or during natural disaster missions, among other applications.

Lastly, the vehicle will be capable of storing, transporting and delivering electromechanical energy wherever it goes, thanks to the deep cycle battery, the high number of charging cycles and the different energy conversion methods the vehicle is provided with.

References

- [1] Banco Mundial, 2018. Available: <http://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>.
- [2] C. S. W. C. M. Earnest, «Lunar Roving Vehicle Navigation System Performance Review,» Whashington DC, 1973.
- [3] A. M. Morote, «Diseño de extensor de autonomía y gestión de la batería de un vehículo eléctrico,» 2018.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL ELECTROMECAÁNICO

*SISTEMA DE TRACCIÓN Y DE GESTIÓN
DE LA BATERÍA DE UN VEHÍCULO
ELÉCTRICO PARA PAÍSES EN VÍAS DE
DESARROLLO*

AUTOR:

Carla Lamadrid Orús

DIRECTORES:

Carlos Castejón de Castro
Álvaro Sanchez Miralles

**MADRID
JULIO 2018**

PARTE I
MEMORIA

ÍNDICE

PARTE I	I
MEMORIA	I
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estado de la Cuestión.....	4
1.2 Motivación	8
1.3 Objetivos	9
1.4 Metodología de Trabajo	11
1.5 Recursos	13
2. ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y ARQUITECTURA DEL VEHÍCULO	15
2.1 Especificaciones	15
2.1.1 Carga/ Descarga.....	15
2.1.2 Cinemática.....	17
2.2 Arquitectura	19
2.2.1 Cinemática.....	19
2.2.1.1 Mando de Control.....	20
2.2.1.2 Cinemáticas.....	21
2.2.2 Carga y Descarga de la Batería.....	25
2.2.2.1 Carga.....	25
2.2.2.2 Descarga	26
3. DISEÑO DEL VEHÍCULO	27
3.1 Criterios de diseño	29
3.1.1 Dimensiones.....	29
3.1.2 Potencia.....	30
3.1.3 Estructura.....	30
3.1.3.1 Bastidor.....	30
3.1.3.2 Ballesta.....	31
3.1.3.3 Soporte de las ruedas	32
3.1.4 Cinemática del vehículo	33

3.1.5	Suministro de energía del vehículo	33
3.1.5.1	Cargador de la batería	34
3.1.5.2	Extensor de Autonomía.....	34
3.1.5.3	Toma de fuerza externa	35
3.2	Componentes principales	36
3.2.1	Motor rueda.....	36
3.2.1.1	Motor DC Brushless	36
3.2.2	Controladores.....	39
3.2.2.1	Aceleración y Reverse.....	40
3.2.2.2	Self- learning	41
3.2.2.3	Display	41
3.2.2.4	Conexiones de los motores.....	41
3.2.3	Batería	42
3.2.3.1	Baterías Plomo-Ácido.....	42
3.2.4	Microcontrolador.....	44
3.2.4.1	I/O.....	45
3.2.4.2	Timers.....	46
3.2.4.3	PWM.....	47
3.2.4.4	ADC.....	48
4.	CONTROL DEL VEHÍCULO.....	51
4.1	Cinemática del Vehículo	51
4.1.1	<i>Ackermann</i> Simple.....	51
4.1.1.1	Giro en sentido horario	52
4.1.1.2	Giro en sentido antihorario.....	54
4.1.2	Giro sobre sí mismo	56
4.1.3	Aplicación al código	57
4.1.3.1	Velocidad	57
4.1.3.2	Giro.....	60
4.2	Pruebas Previas	62
4.2.1	Pruebas iniciales.....	62
4.2.2	dsPIC33FJ32MC.....	63
4.2.2.1	Descripción del funcionamiento.....	63

4.2.2.2	Arquitectura del código fuente	65
4.3	Hardware	71
4.3.1	Conversión de señal PWM digital a analógica (<i>D/A</i>)	71
4.3.2	Etapa amplificadora	73
4.3.3	Señal de control de la velocidad de los motores	74
4.3.4	Estado de carga/descarga de la batería	75
4.3.4.1	Cargador de la batería	76
4.3.4.2	Par de Fuerza Externo.....	76
4.3.4.3	Extensor de Autonomía.....	81
4.4	Software	82
4.4.1	Conexión del microcontrolador	82
4.4.2	Máquina de Estados	85
Entradas	85	
Salidas	86	
Variables de estado	86	
Acciones.....	87	
Transiciones.....	90	
4.4.3	Código	95
Main	95	
Tarea Idle	96	
Función Vehículo	96	
Tarea MotorControl	99	
5.	ENSAMBLAJE.....	105
5.1	Electrónica.....	105
5.1.1	Caja externa de electrónica	105
5.1.2	Motores y Controladores	107
5.2	Mecánica	108
5.2.1	Bastidor flexible.....	108
5.3	Montaje Final	110
6.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS	111
6.1	Pruebas sobre un motor.....	111
6.1.1	Montaje.....	III

6.1.2	Pruebas de velocidad	112
6.1.3	Pruebas de giro sobre sí mismo y <i>reverse</i>	113
6.1.3.1	Reverse.....	113
6.1.3.2	Giro sobre sí mismo.....	113
6.1.4	Pruebas sobre estados de carga	114
6.1.5	Conclusiones	114
6.2	Pruebas sobre dos motores	115
6.2.1	Montaje.....	115
6.2.2	Pruebas de velocidad	116
6.2.3	Pruebas de giro sobre sí mismo y <i>reverse</i>	117
6.2.3.1	Reverse.....	117
6.2.3.2	Giro sobre sí mismo.....	117
6.3	Conclusiones.....	119
6.4	Futuros desarrollos	120
7.	BIBLIOGRAFÍA	123
	ANEXO I - CÓDIGO FUENTE.....	127
	PARTE II.....	II
	PRESUPUESTO	II
1.	MEDICIONES.....	III
1.1	Vehículo.....	III
1.2	Caja de electrónica.....	IV
1.2.1	Tarjeta de control.....	IV
1.2.2	Mando de control	IV
1.3	Equipo y herramientas.....	V
1.4	Software	V
1.5	Mano de obra.....	VI
2.	PRECIOS UNITARIOS	VII
2.1	Vehículo.....	VII
2.2	Caja de electrónica.....	VIII
2.2.1	Tarjeta de control.....	VIII
2.2.2	Mando de control	VIII

2.3	Equipo y herramientas.....	IX
2.4	Software	IX
2.5	Mano de obra.....	X
3.	SUMAS PARCIALES	XI
3.1	Vehículo.....	XI
3.2	Caja de electrónica.....	XII
3.2.1	Tarjeta de control.....	XII
3.2.2	Mando de control	XII
3.3	Equipo y herramientas.....	XIII
3.4	Software	XIII
3.5	Mano de obra.....	XIV
0	PRESUPUESTO GENERAL.....	XV

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: VEHÍCULO OX.....	6
FIGURA 2: VEHÍCULO BUV.....	6
FIGURA 3: WATT-R DISEÑO.....	7
FIGURA 4: ESQUEMA DEL SISTEMA DE CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA CON TODAS LAS FUENTES Y CARGAS	16
FIGURA 5: ESQUEMA DEL VEHÍCULO A DISEÑAR CON TODOS SUS COMPONENTES	17
FIGURA 6: ESQUEMA CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL DEL VEHÍCULO	19
FIGURA 7: RECTA DE ACELERACIÓN DEL VEHÍCULO	22
FIGURA 8: RECTA DE FRENADO DEL VEHÍCULO.....	24
FIGURA 9: VEHÍCULO ROVER LUNAR UTILIZADO EN LAS MISIONES DEL APOLO 15, 16 Y 17 [19]	27
FIGURA 10: JEEP WILLYS CJ-3B DE 1953	28
FIGURA 11: PLANO DEL BASTIDOR DEL VEHÍCULO.....	30
FIGURA 12: PLANO DE LA BALLESTA DEL VEHÍCULO (COTAS EN CM).....	31
FIGURA 13: MONTAJE DE BASTIDOR MÁS TRES PARES DE BALLESTAS PARA SEIS RUEDAS	32
FIGURA 14: PLANO DE LA PIEZA DE SOPORTE DE LAS RUEDAS DEL VEHÍCULO (COTAS EN CM).....	32
FIGURA 15: EXTENSOR DE AUTONOMÍA COMPUESTO POR DOS MOTORES DE CONTINUA SIN ESCOBILLAS 36V 500W [21].....	34
FIGURA 16: TOMA DE FUERZA EXTERNA FORMADO POR UN MOTOR DE CONTINUA DE 36V 300W [22]...35	
FIGURA 17: PLANO DE LA RUEDA MOTOR [23]	36
FIGURA 18: CAMPOS MAGNÉTICOS DE EXCITACIÓN E INDUCIDOS DEL ESTATOR Y ROTOR, RESPECTIVAMENTE, DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.	37
FIGURA 19: MOTOR EN RUEDA CON CINCO PARES DE POLOS Y SENSORES EFECTO HALL.....	38
FIGURA 20: ACTIVACIÓN DE LAS ESPIRAS SEGÚN EL ÁNGULO ELÉCTRICO Y SEÑALES DE LOS SENSORES EFECTO HALL CORRESPONDIENTES.....	38
FIGURA 21: SEÑALES DE DOS DE LOS SENSORES DE EFECTO HALL DESFASADOS 120°.....	39
FIGURA 22: CONTROLADOR DEL MOTOR RUEDA.....	40
FIGURA 23: POTENCIÓMETRO DE MANO DEL MOTOR RUEDA.....	41
FIGURA 24: BATERÍA PLOMO-ÁCIDO DE ARRANQUE [26]	42
FIGURA 25: BATERÍA PLOMO-ÁCIDO DE CICLO PROFUNDO [26].....	43
FIGURA 26: BATERÍAS AGM DE 12V [24].....	44
FIGURA 27: DIAGRAMAS DE PINES DEL MICROCONTROLADOR DSPIC33FJ32MC202 [29]	45
FIGURA 28: GIROS PERMITIDOS EN LAS RUEDAS DIRECTRICES DEL VEHÍCULO	52
FIGURA 29: CINEMÁTICA DE ACKERMANN SENTIDO HORARIO.....	52

<i>FIGURA 30: CINEMÁTICA DE ACKERMANN SENTIDO ANTIHORARIO.....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA 31: CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO EN GIRO SOBRE SÍ MISMO.....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 32: ESQUEMA DE LAS CONVERSIONES PERTINENTES ENTRE LA VELOCIDAD DEMANDADA POR EL POTENCIÓMETRO Y LA VELOCIDAD DE CADA MOTOR.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 33: RANGO DE LOS CICLOS DE TRABAJO DE LAS SEÑALES PWM EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AVANCE Y PARA UN GIRO DE 45° EN SENTIDO ANTIHORARIO.....</i>	<i>59</i>
<i>FIGURA 34: RANGO DE LOS CICLOS DE TRABAJO DE LAS SEÑALES PWM EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AVANCE Y PARA UN GIRO DE 45° EN SENTIDO HORARIO.....</i>	<i>59</i>
<i>FIGURA 35: RELACIÓN DEL GIRO DE LOS MOTORES CON LA LECTURA DEL POTENCIÓMETRO DE GIRO ..</i>	<i>60</i>
<i>FIGURA 36: PLACA PicTRAINER CON EL MICROCONTROLADOR DSPIC33FJ32MC INSTALADO JUNTO CON LOS COMPONENTES SOLDADOS PARA LAS PRUEBAS INICIALES.....</i>	<i>65</i>
<i>FIGURA 37: SEÑAL PWM.....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 38: DESCOMPOSICIÓN DE LA SEÑAL PWM EN SU COMPONENTE CONTINUA Y UNA SEÑAL CUADRADA DE PERIODO T.....</i>	<i>72</i>
<i>FIGURA 39: FILTRO PASO BAJO DE PRIMER ORDEN.....</i>	<i>72</i>
<i>FIGURA 40: OPERACIONAL AMPLIFICADOR TLC272 CONEXIONADO PARA GANANCIA UNITARIA CON FILTRO PASO BAJO.....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 41: CONEXIONADO DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR DE GANANCIA UNIDAD CON EL FILTRO PASO BAJO.....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 42: SEÑAL FILTRADA Y OPTIMIZADA PARA UN NIVEL BAJO DE CICLO DE TRABAJO Y UN NIVEL MEDIO-ALTO DE CICLO DE TRABAJO.....</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 43: DIVISOR DE TENSIÓN PARA EL CARGADOR DE LA BATERÍA.....</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 44: CONFIGURACIÓN DE PINES DEL LM311-MIL.....</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 45: CIRCUITO COMPARADOR CON HISTÉRESIS.....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 46: EFECTO DE HISTÉRESIS DE UN COMPARADOR SCHMITT TRIGGER.....</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 47: CIRCUITO LM311 COMPARADOR CON HISTÉRESIS.....</i>	<i>80</i>
<i>FIGURA 48: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL COMPARADOR CON HISTÉRESIS CON UNA ENTRADA TRIANGULAR.....</i>	<i>80</i>
<i>FIGURA 49: DIVISOR DE TENSIÓN DE LA SEÑAL ANALÓGICA DEL EXTENSOR DE AUTONOMÍA.....</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 50: DIAGRAMA DE PINES DEL DSPIC33FJ32MC202.....</i>	<i>82</i>
<i>FIGURA 51: CONEXIONADO DEL MICROCONTROLADOR CON EL RESTO DE ELEMENTOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES.....</i>	<i>84</i>
<i>FIGURA 52: DIAGRAMA DE LA MÁQUINA DE ESTADOS A IMPLEMENTAR.....</i>	<i>87</i>
<i>FIGURA 53: MANDO DE CONTROL CON EL HARDWARE IMPLEMENTADO.....</i>	<i>106</i>
<i>FIGURA 54: MICROCONTROLADOR CON TARJETA PicTRAINER Y PLACA CON LAS SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA Y COMPONENTES DE ACONDICIONAMIENTO.....</i>	<i>107</i>

<i>FIGURA 55: BASTIDOR FLEXIBLE FORMADO POR EL BASTIDOR DE METACRILATO Y LAS BALLESTAS DE POLIETILENO.....</i>	<i>108</i>
<i>FIGURA 56: DETALLE DE LA UNIÓN ENTRE BASTIDOR Y BALLESTAS CON LOS TORNILLOS PASANTES.....</i>	<i>108</i>
<i>FIGURA 57: SUJECIÓN ENTRE LOS MOTORES Y LAS BALLESTAS DEL BASTIDOR.....</i>	<i>109</i>
<i>FIGURA 58: IMAGEN FRONTAL DEL BASTIDOR CON LOS CUATRO MOTORES ENSAMBLADOS.....</i>	<i>110</i>
<i>FIGURA 59: PLANTA DEL VEHÍCULO CON LOS MOTORES Y EL BASTIDOR.....</i>	<i>110</i>
<i>FIGURA 60: MONTAJE PANEL DE CONTROL, CONTROLADOR Y MOTOR PARA PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SOBRE UN MOTOR.....</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 61: MONTAJE DEL VEHÍCULO CON LOS CUATRO MOTORES SOBRE SOPORTE PARA LAS VALIDACIONES.....</i>	<i>115</i>
<i>FIGURA 62: CONEXIONADO DE LOS MOTORES CON SUS RESPECTIVOS CONTROLADORES, CON EL MANDO DE CONTROL Y CON LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....</i>	<i>116</i>

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN DE TECNOLOGÍAS SU AUTONOMÍA Y SU TRACCIÓN. 5

TABLA 2: PLAN DE TRABAJO DEL TFM 12

TABLA 3: COMPARATIVA DE ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE VEHÍCULOS TODOTERRENO..... 29

TABLA 4: RESUMEN DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL MICROCONTROLADOR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE LA TRACCIÓN Y LA CINEMÁTICA DEL VEHÍCULO 84

TABLA 5: VARIABLES DE ENTRADA DE LA MÁQUINA DE ESTADOS 85

TABLA 6: VARIABLES DE SALIDA DE LA MÁQUINA DE ESTADOS 86

TABLA 7: VARIABLES DE CONTROL DE LA MÁQUINA DE ESTADOS 86



1. INTRODUCCIÓN

Cada día es más evidente y serio el problema de la contaminación a la que se enfrentan los países de prácticamente todo el mundo. Esto lleva al creciente desarrollo e implementación de energías limpias y renovables, sobre todo en los países desarrollados, y la a transición a sistemas que hacen uso de las mismas. Mientras tanto, los países en vías de desarrollo carecen de las medidas y/o el dinero necesario para adoptar estas medidas. Es más, dichos países se enfrentan a un problema de base que es el acceso a la energía, el cual genera aislamiento y pobreza e impide el desarrollo de estos países. Por otra parte, los habitantes de estos países no solo no disfrutan de ciudades con electrificación estable o siquiera existente, sino que en numerosas ocasiones tampoco cuentan con medios de transporte privados o redes de transporte públicos al alcance de su día a día, lo que engravece la situación de aislamiento y estancamiento. Este proyecto nace con la intención de ser una ayuda tecnológica concreta para combatir o mitigar varios de los problemas mencionados anteriormente.

Desde diciembre de 2015 en el Acuerdo de París se establece un objetivo común de los países firmantes de limitar el crecimiento de la temperatura global del planeta por debajo de dos grados por encima de los niveles preindustriales, lo que se conoce por 2DS (2 Degree Scenario) y el esfuerzo de los países por limitar la subida de la temperatura a un máximo de un grado y medio sobre los niveles preindustriales, conocido como RTS (Reference Technology Scenario) según la Agencia Internacional de la Energía. Según datos de la IEA extraídos del Global EV Outlook 2017 [1], actualmente, el sector del transporte es responsable de la emisión del 23% de los gases de efecto invernadero, lo que pone a dicho sector en el punto de mira de los países si quieren conseguir el objetivo firmado. Siguiendo el desarrollo hacia el objetivo de los dos grados, se prevén 1,2 miles de millones de coches eléctricos, lo cual representarían el 60% del stock de coches de pasajeros en circulación. Demostrando la gran impulsión que tiene hoy en día la tecnología de este tipo de vehículos.

El desarrollo de energías limpias y renovables, dejando atrás la quema de combustibles fósiles, el carbón, el petróleo y el gas, fomentan que cada vez avance más el mercado de los coches eléctricos puros o híbridos. La electrificación del transporte produce una importante reducción de emisiones locales de contaminantes y ruido, además de aportar una energía segura, con mayor diversificación y más eficiente. Según una evaluación comparativa entre coches eléctricos puros, híbridos y de motor de combustión sobre el CO₂ emitido, los coches eléctricos puros e híbridos ya, a día de hoy, emiten menos por kilómetro que un coche con motor de combustión. Un coche de motor de combustión genera alrededor de 180 g CO₂/km mientras que un coche



eléctrico puro, en el peor de los casos, generaría alrededor de 80g CO₂/km, es decir, menos de la mitad [1].

La otra gran ventaja del coche eléctrico es el ahorro económico que supone a la hora de recargar el coche y en el mantenimiento. Según datos de Endesa [2], la recarga de un coche eléctrico puede costar aproximadamente 2€/ 100 km frente a unos 7€/ 100 km que cuesta aproximadamente llenar un depósito estándar de gasolina en España. En relación con el mantenimiento, el ahorro viene dado por la simplicidad y robustez del motor eléctrico frente al de combustión lo que se traduce en mínimos cuidados de tipo preventivo como el cambio de neumáticos, sustitución del líquido de frenos y el refrigerante de las baterías o el filtro del aire [2].

Cabe destacar que la tendencia hacia este tipo de vehículos y tecnologías está en auge en los países desarrollados, pero no en los países emergentes. Como principales inconvenientes encontramos las regulaciones y políticas respecto a esta tecnología y la infraestructura de puntos de recarga y electrificación de la red [3].

En los países desarrollados existen subvenciones, ventajas y ayudas para incentivar la transición hacia los vehículos eléctricos. Sin embargo, este tipo de ayudas no existen en países en vías de desarrollo, lo que también afecta y pone de manifiesto la escasez de infraestructura y electrificación capaz de soportar esta nueva tecnología. La recarga de muchos vehículos eléctricos al mismo tiempo supondría, muy posiblemente, un aumento de carga insostenible para este tipo de redes. Por último, los precios suponen otra barrera o inconveniente a la hora de adoptar esta tecnología. Aunque el mantenimiento de este tipo de vehículos es bastante más reducido que el de un tradicional coche de motor de combustión, el precio inicial debido al coste de las baterías sigue siendo elevado. En este sentido habrá un avance en los próximos años gracias al abaratamiento que se está experimentando en este tipo de baterías [4].

En cuanto al acceso a la energía, según datos del Banco Mundial de la Energía, a día de hoy todavía existen 1060 millones de personas que sobreviven sin acceso a la energía, 300 millones que depende de la quema de biomasa para calefacción y cocina, lo que contamina la atmósfera y el aire que respiran provocando aproximadamente 4.3 millones de muertes al año [5]. El acceso a la electricidad no solo es importante para la mejora de la calidad de vida de las personas, sino que es imprescindible para el crecimiento de un país en temas de agricultura, agua potable, sanidad, educación, comunicación, transporte e industria, entre otras. Queda reflejado, por tanto, la necesidad e importancia del acceso a la energía. En países desarrollados la electrificación y, por ende, el acceso a la electricidad llega a un 90% de la población, en contraste con el 40% de habitantes que siguen sin disfrutar de este bien en países



en vías de desarrollo, ya sea por vivir en áreas remotas o aisladas o por tener una electrificación pobre e inestable. Sin embargo, según datos de International Energy Outlook 2017 [6], la mayoría del incremento de la demanda de energía en los próximos años provendrá de países no pertenecientes a la OECD¹, en su mayoría países en vías de desarrollo, por su fuerte crecimiento económico, creciente acceso a la energía y rápido aumento de la población.

¹ OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), visitar el informe de la IEA, International Energy Outlook 2017 para ver un listado de los países no pertenecientes a la OECD [6].



1.1 *Estado de la Cuestión*

El proyecto supone, como visión global, el diseño, ensamblaje y puesta a punto de un vehículo eléctrico de autonomía extendida capaz de almacenar y proporcionar energía electromecánica y de desplazarse por casi cualquier terreno para entregar dicha energía donde se requiera. Por ello, habrá que estudiar, por un lado, la evolución del coche eléctrico puro e híbrido y, por otro, las soluciones tecnológicas diseñadas para países en vías de desarrollo con el fin de mejorar el acceso a la electricidad o medios de transporte para zonas aisladas o de difícil acceso.

Los coches eléctricos pueden clasificarse en eléctricos puros, híbridos o de autonomía extendida. A continuación, se presenta una breve explicación de los mismos y sus respectivas autonomías.

Los ***coches eléctricos*** son aquellos cuya propulsión proviene de uno o más motores eléctricos alimentados con energía eléctrica, la cual se suele almacenar en una batería recargable. En muchos casos el frenado es regenerativo, es decir, se aprovecha la energía del frenado para cargar dicha batería. La autonomía conseguida a día de hoy está cerca de los 500 km en coches de gama alta y los 150-200 km en coches de gama estándar [7], aunque en un uso real esta autonomía suele ser de unos 100 km menos que la especificación técnica.

Los ***coches eléctricos híbridos*** son aquellos cuya propulsión proviene tanto de un motor eléctrico como de un pequeño motor de combustión interna. Estos modelos suelen tener una baja autonomía eléctrica alrededor de los 5km [8] ya que están pensados para trayectos urbanos y, simplemente, reducen el consumo del motor de combustión y sus correspondientes emisiones. Según la disposición de los motores se pueden clasificar en [9]: *serie*, aquellos cuyos motores eléctrico y de combustión están conectados a la batería y esta suministra la potencia al coche; *paralelo*, ambos motores pueden suministrar potencia al coche de manera independiente; y en *serie-paralelo*, el motor de combustión tiene un sistema de acoplamiento que hace que sea posible tanto la impulsión directa del vehículo a través de dicho motor, como la recarga de la batería a través de un generador eléctrico.

Coche eléctrico híbrido enchufable, PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), estos vehículos son como los definidos anteriormente con la distinción de que la batería también se puede cargar mediante la conexión a la red eléctrica. Esto hace que la



autonomía aumente considerablemente hasta valores entre los 30km y los 60km. También suele incorporarse el frenado regenerativo como una carga adicional de la batería [8].

Coche eléctrico de autonomía extendida, se denomina de esta manera a aquellos vehículos eléctricos que contienen otra fuente de energía para aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico puro. Esta nueva fuente de energía puede ser electroquímica, como las celdas de combustible que usan hidrógeno para generar electricidad, o electromecánica, como sería un motor de combustión con un generador eléctrico. Esta tecnología es capaz de aumentar la autonomía hasta unos 450 km [10]-600 km [11]. Y, como sucede con los demás modelos, suelen integrar frenado regenerativo para cargar la batería.

Un resumen del tipo de tecnología, su autonomía y el tipo de impulsión se recopila en la

Tabla 1:

Tipo Coche	Autonomía	Impulsión
EV	500 km - 150 km	Motor eléctrico
HEV	4 km - 5 km	Motor de combustión interna + pequeña capacidad de baterías
PHEV	30 km - 60 km	Baterías + motor de combustión interna
REHEV	450 km - 600 km	Baterías + extensión del motor de combustión

Tabla 1: Resumen de tecnologías su autonomía y su tracción.

Por otro lado, algunas de las soluciones contra el restringido acceso a la electricidad y el transporte en países en desarrollo son las siguientes:

Torquil Norman creó hace unos años **Global Vehicle Trust (GVT)** [12] y diseñó el **OX**, un vehículo accesible para países en vías de desarrollo. Se trata de una camioneta desmontable que llega en una caja con todas las piezas necesarias junto con unas instrucciones que especifican el montaje paso a paso, el cual se puede completar en unas 12 horas. Es un vehículo simple, robusto, barato y rápido de montar que, gracias a su tracción delantera y robustez, puede circular sin problema por cualquier terreno, en principio, solo transitable por un 4x4. Su autonomía es de unos 1000 kilómetros, sin



embargo, se propulsa con motor diésel lo que se aleja de uno de los propósitos de este proyecto.



Figura 1: Vehículo OX

El *Institute for Affordable Transportation (IAT)* [13] es una organización sin ánimo de lucro que ha diseñado un vehículo (BUV) simple y barato para permitir el desarrollo de comunidades de países en vías de desarrollo. Entre las utilidades y usos más habituales de este vehículo se encuentran: camiones de reparto, autobuses escolares, transporte de agua y comida, ambulancias, la agricultura, la construcción, taxi y para misiones sanitarias. El vehículo se diseñó centrándose solo en las características más importantes que debía tener para abaratar costes, entre ellas encontramos la autonomía, un mantenimiento fácil y que fuese poco costoso, la capacidad de carga y que pudiese transitar por terreno complicado, así nació el vehículo *BUV (Basic Utility Vehicles)* de motor diésel que se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Vehículo BUV

Watt-r, un carro propulsado por paneles solares que tiene ruedas motorizadas y cuyo objetivo es el de recoger agua en países en desarrollo, es la propuesta del diseñador automotriz Jose Paris. Se espera que el prototipo sea capaz de contener unos veinte litros de agua. Además, el carro sirve al mismo tiempo para la recarga de dispositivos electrónicos de pequeño tamaño. Los paneles solares cada vez tienen precios más



reducidos, sin embargo, para mantener los costes bajos se decidió usar impresión 3D para algunas de las partes del diseño. Está pensado para moverse por zonas relativamente planas y que conlleven poco esfuerzo para mantener el gasto de energía reducido, además la velocidad que alcanza es tal que una persona puede seguirle el paso [14]. La Figura 3 muestra el diseño/ prototipo de lo que se quiere construir [15].

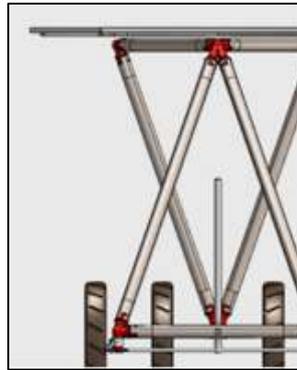


Figura 3: Watt-r diseño

Ingenieros de Oxford están diseñando un *motor Stirling* que transforma calor en energía aprovechable. El motor es capaz de funcionar quemando residuos, es decir, no depende de la quema de combustible, con una eficiencia entre el 30% y 40% y una potencia entre 1kW y 100kW, lo que permitiría su uso personal o a nivel de comunidad [16].



1.2 Motivación

Este proyecto nace con la intención de ofrecer soluciones a problemas reales del mundo en el que vivimos que necesitan ser abordados de manera sencilla, poco costosa y factible. Uniendo las problemáticas del cambio climático generado por la contaminación ambiental y atmosférica, el restringido acceso a la energía y las dificultades de transporte en, todavía, un gran número de países, se vio la posibilidad de construir un sistema que pudiese enfrentarse a estos tres retos al mismo tiempo.

En el apartado anterior hemos visto como los problemas del transporte y acceso a la energía en países en vías de desarrollo están siendo abordados cada vez de forma más eficiente, menos costosa y más simple, pero en todos los casos, tratando cada problema por separado. La idea es, por qué no unir, en un mismo sistema, una solución a ambos retos y que, al mismo tiempo, esté ayudando a mitigar la contaminación gracias a la utilización de motores eléctricos y baterías en vez de motores de combustión.

Un vehículo eléctrico cuida del medio ambiente y potencia el desarrollo de esta tecnología que, además, se prevé experimente un crecimiento en países en desarrollo en los próximos años [6]. Además, reduce costes, lo que lo convierte en más asequible para dichos países que así podrían contar con esta posibilidad para combatir la falta de transporte en estos lugares. Al mismo tiempo, gracias a las diferentes tomas de energía y de los distintos mecanismos de conversión de energía electromecánica del vehículo, este será capaz de proporcionar energía en cualquier lugar y en cualquier momento, abordando así el tema de acceso a la energía. Por último, al ser un vehículo estable y robusto, junto con las características descritas anteriormente, se cree en el potencial del mismo para ser utilizado, no solo por poblaciones o ciudadanos de a pie, sino más bien por ONG u organizaciones para ayudar en zonas sin acceso a la energía o geográficamente aisladas o remotas, en desastres naturales, trabajos de campo en zonas de acceso complicado o trabajos de mantenimiento, entre otras aplicaciones.

Por tanto, la versatilidad y el potencial del proyecto para abordar todas las cuestiones descritas anteriormente con un solo sistema simple, robusto, fácil de manejar y cuidando su precio, son los principales motores de impulsión para la ejecución del presente proyecto.



1.3 Objetivos

El proyecto consistirá en el diseño, la construcción, las pruebas y la validación de un sistema electrónico de control que gestionará la carga y descarga de una batería de un modelo real, a escala de un vehículo todoterreno eléctrico en función de su energía almacenada. La carga almacenada se controlará mediante la conexión directa a la red eléctrica, mediante el intercambio de energía electromecánica con el exterior y mediante el empleo de un sistema extensor de autonomía que consiste en un pequeño motor de combustión acoplado a un generador eléctrico. La posibilidad de conectar el vehículo directamente a la red se conoce como V2G (Vehicle to Grid) y da la ventaja y posibilidad de usar el coche como una batería en sí mismo, desplazándola para que sea capaz de suministrar esa energía como electricidad o como par mecánico donde esta se requiera.

Como objetivos globales, el vehículo será capaz de, a partir de una fuente de energía eléctrica de frecuencia y tensión constante o no, generar energía mecánica de potencia constante. Por otro lado, a partir de energía mecánica de potencia constante o no, cargar la batería o suministrar energía eléctrica de frecuencia, tensión y corriente controlada. Por último, el vehículo podrá proporcionar energía tanto eléctrica como mecánica a partir de la batería o al mismo tiempo que se carga la batería, ya sea mediante un par mecánico, frenado regenerativo o mediante una fuente de energía eléctrica.

El vehículo descrito se completará como parte de dos proyectos, por un lado, el diseño y ensamblaje del sistema de carga y descarga de la batería y del sistema de conversión de energía electromecánica, el cual no forma parte del presente proyecto. Y, por otro lado, el diseño, ensamblaje y puesta en marcha de un sistema de propulsión y de control de la cinemática del vehículo.

Concretamente los objetivos de este proyecto global son los siguientes:

- i. Objetivos del presente Trabajo de Fin de Master
 - a. Control de la dirección y tracción de los cuatro motores en rueda mediante:
 - i. Máximo ángulo de giro de cada rueda.
 - ii. Velocidad máxima de cada rueda.
 - iii. Tipos de cinemática posibles.
 - b. Control de la carga y descarga de la batería.



2. Objetivos del Trabajo de Fin de Grado asociado con el presente TFM:
- a) Control del motor de corriente continua por el que se libera o absorbe energía mecánica.
 - b) Control de la marcha/paro del motor eléctrico acoplado al motor de combustión que forma el extensor de autonomía.

Finalmente, el diseño y ensamblaje será de un modelo real a escala 1:4 con la posibilidad de convertirse en vehículo anfíbio u oruga, gracias a su diseño o a un añadido de superficie de las ruedas, respectivamente.



1.4 Metodología de Trabajo

Como se ha dicho anteriormente, al tratarse de un proyecto ambicioso este se compone de dos proyectos de menor escala que se realizan de forma paralela para conseguir el objetivo final. Al mismo tiempo, un taller mecánico se encargará ensamblar la carrocería del vehículo de acuerdo al diseño, las especificaciones y el dimensionamiento que se hayan decidido, y con su aportación sobre elección de materiales.

Mediante reuniones rutinarias se empezará por elegir las dimensiones del vehículo que determinarán las especificaciones para la búsqueda de componentes. Además de las dimensiones, al principio habrá que hacer un análisis de la configuración más óptima del vehículo. Para ello se tendrán en cuenta vehículos ya existentes y como abordaron temáticas como: simple y robusto, vehículo anfíbio y oruga, que pueda girar sobre sí mismo, que no vuelque, que sea lo más ligero posible, pocos elementos para facilitar el mantenimiento. Una vez comprados y recibidos los motores rueda, la batería y los motores servo para la dirección del coche, se procederán a las primeras pruebas de uso de cada elemento por separado. Al mismo tiempo, teniendo estos elementos, se podrán ir especificando el resto de dimensiones del vehículo, donde se alojarán estos elementos, para que el taller pueda ir avanzando. Una vez en posesión de todos los elementos a controlar, ruedas, servos, batería, onduladores, motor eléctrico de marcha/paro y motor eléctrico de par mecánico, se procederá al diseño y definición del interfaz con el usuario para el control de dichos elementos y el desarrollo de una tarjeta de control, el algoritmo de control y la programación de la tarjeta de control. Que más adelante, cuando el vehículo esté modelado por completo, habrá que montar y conectar en el vehículo. Para entonces el vehículo estará listo para las primeras pruebas de funcionamiento de sus elementos por separado, luego pruebas de funcionamiento integrado y, por último, pruebas de funcionamiento del vehículo en su totalidad. Llegados a este punto, se realizarán pruebas en campo para analizar las posibles mejoras, llevar a cabo las modificaciones pertinentes y, por último, validar el modelo.

A lo largo de todo el proceso se deberán ir documentando todos los pasos dados que irán conformando la memoria del proyecto.

A continuación, se muestra una organización temporal de las tareas a desarrollar:



MES	TAREA	DURACIÓN
Septiembre	Dimensionamiento	1 semana
	Búsqueda de componentes	2 semanas
	Elección y compra ruedas y batería	1 semana
Octubre	Estado del arte	3 semanas
	Estudio del diseño del vehículo	4 semanas
Noviembre	Estado del arte	1 semana
	Elección del generador eléctrico	2 semanas
Diciembre	Control de un motor/rueda	1 semana
	Control de un servo	0.5 semanas
Enero	Definición interfaz con el usuario	3 semanas
	Pruebas con los cuatro motores/ruedas y los cuatro servos	3 semanas
Febrero	Desarrollo tarjeta para el control de 4 motores y los 4 servos	2 semanas
	Definición del algoritmo de control y programación de la tarjeta	1 semana
Marzo	Estructura y modelado	3 semanas
Abril	Montaje de la tarjeta de control y conexionado	0.5 semanas
	Pruebas de funcionamiento individual	1 semana
	Pruebas de funcionamiento integrado	1 semana
	Pruebas funcionamiento total	2 semanas
Mayo	Pruebas campo	1 semana
	Modificaciones y validación final	1 semana

Tabla 2: Plan de trabajo del TFM



1.5 Recursos

Los recursos a emplear en el presente proyecto son esencialmente las instalaciones y equipos de los laboratorios de electrónica de la Escuela Pontificia Comillas ICAI, el ordenador portátil personal y los ordenadores de la mencionada escuela por el acceso a algún programa con licencia académica, como pueden ser visores de CAD y software de programación.





2. ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y ARQUITECTURA DEL VEHÍCULO

En este capítulo se pretende ilustrar qué sistema se va a diseñar, cuáles serán sus modos de funcionamiento y cómo se va a controlar. Partiendo de las características que se quieren conseguir se establecerán las especificaciones de diseño para lograr dicho sistema. Se ha de tener en mente que, el objetivo final del proyecto es el de diseñar un vehículo robusto y sencillo capaz de transitar por cualquier terreno para llegar a su destino y que, al mismo tiempo, sea capaz de convertir, transportar y almacenar energía.

2.1 Especificaciones

Se detallará y explicará cómo se desea que el vehículo funcione y qué objetivos se pretenden lograr con el diseño. Para mayor claridad, se distinguirán entre las especificaciones de funcionamiento de la cinemática del vehículo por un lado y de carga y descarga de la batería por otro.

2.1.1 Carga/ Descarga

Puesto que el transporte y almacenamiento de energía es uno de los principales objetivos del presente proyecto, el vehículo y su diseño estarán fuertemente influenciados por los sistemas elegidos para dotar al vehículo con estas capacidades.

Se desea, principalmente, que el vehículo tenga la posibilidad de:

1. Almacenar energía.
2. Transportar energía.
3. Convertir la energía:
 - a. De una fuente de energía mecánica, de par constante o no, a energía eléctrica de tensión constante.
 - b. De energía eléctrica, almacenada en la batería, a energía mecánica mediante un par de fuerza constante.
 - c. De una fuente de energía eléctrica con tensiones y frecuencia poco estables, a una fuente de tensión segura.

Para abordar los tres puntos mencionados, se plantea la necesidad de que el diseño cuente con una batería de alta capacidad y con alto número de ciclos de carga y descarga. Adicionalmente, se deberá buscar un elemento que convierta energía mecánica en eléctrica y viceversa, y se deberá dotar al vehículo de la posibilidad de



2.1.2 Cinemática

La cinemática del vehículo debe ser robusta y muy estable, por tanto, la prioridad no será la de optimizar su precisión cinemática sino de que el vehículo responda satisfactoriamente y con alta fiabilidad a las consignas de demanda.

Una vez dicho esto, se desea que el vehículo sea capaz de avanzar en cualquier dirección, para ello se desea incluir la posibilidad de que gire sobre su centro de gravedad, también debe poder retroceder y regular la velocidad. El proceso de frenado y aceleración debe ser progresivo para evitar movimientos bruscos y se debe priorizar la seguridad en el control del vehículo. Es decir, no cambiar el sentido de giro de los motores si estos no estaban previamente parados y no permitir el giro sobre sí mismo del vehículo si, de nuevo, los motores no estaban previamente parados.

Adicionalmente, se discute la posibilidad de añadir la configuración oruga. Esta no se llegó a implementar por el volumen de trabajo que ya significaba el proyecto. Sin embargo, se tendrá en cuenta como una posibilidad de desarrollo futuro.

La Figura 5 representa el esquema del vehículo que se quiere diseñar teniendo en cuenta todos los componentes del control de la cinemática.

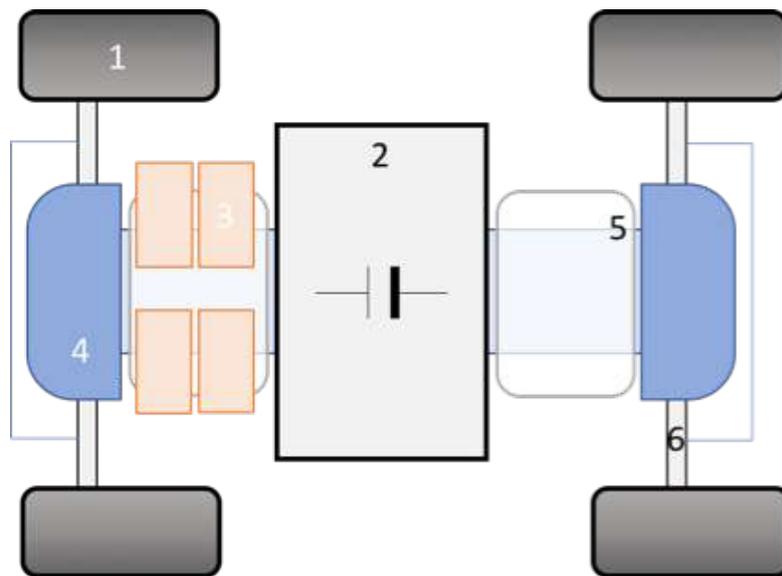


Figura 5: Esquema del vehículo a diseñar con todos sus componentes

A continuación, se listan los componentes numerados en la imagen, los cuales se explicarán en detalle a lo largo del presente capítulo.

1. Motor en rueda ($x 4$)
2. Batería principal
3. Controladores ($x 4$)
4. Ballestas ($x 4$)



5. *Bancadas (x 2)*
6. *Sujeción de las ruedas (x 4)*

Sin numeración quedan, las *varillas* que unen los motores rueda dos a dos y el *bastidor*, pieza longitudinal sobre la que apoyan el resto de componentes y une la parte frontal y trasera del vehículo.



2.2 Arquitectura

Teniendo en cuenta las especificaciones descritas anteriormente, se procede a detallar cómo y con qué elementos específicos se alcanzarán dichas características de trabajo. Así mismo, se explicará el comportamiento que el vehículo, como conjunto, presentará una vez finalice su construcción y puesta a punto.

En la Figura 6 se encuentran representados todos los elementos necesarios para el control de los motores en rueda y de la batería del vehículo, y sus interacciones con los restantes elementos.

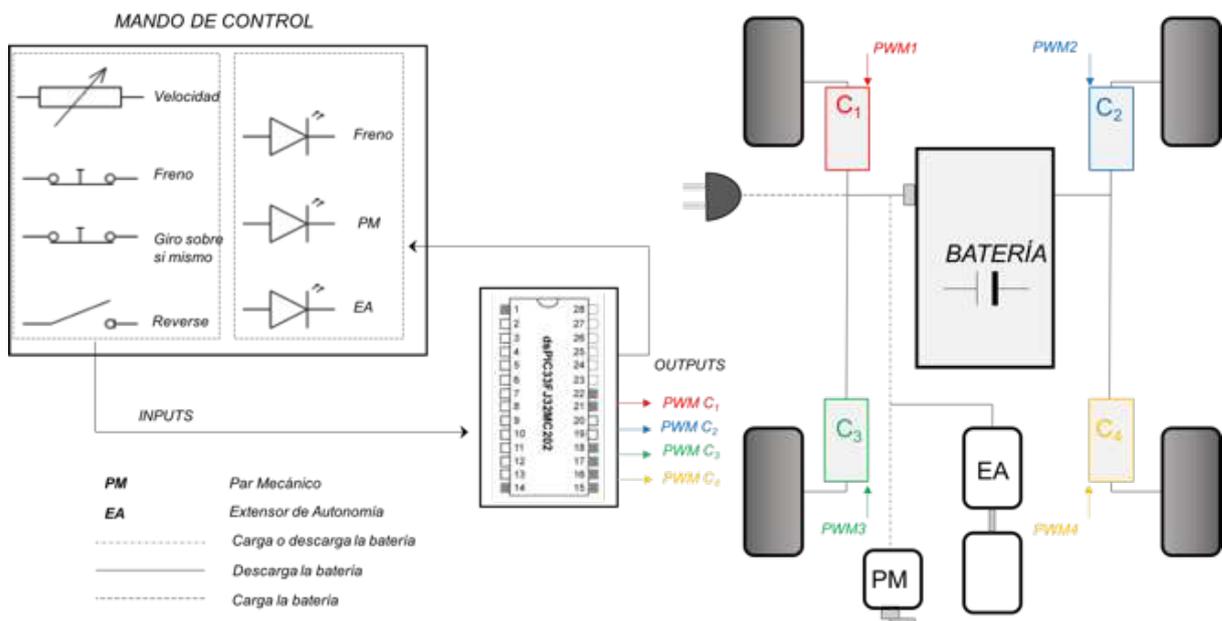


Figura 6: Esquema conceptual del funcionamiento del control del vehículo

Del mismo modo que se abordó el análisis de las especificaciones de diseño, con el fin de que la explicación sea clara y sencilla, se hará distinción entre el control sobre la cinemática y su funcionamiento y, por otro lado, el estado de carga y descarga de la batería y sus consecuencias y limitaciones.

2.2.1 Cinemática

El objetivo del proyecto, como se ha mencionado en repetidas ocasiones, es el de diseñar un vehículo robusto y sencillo que sea capaz de transitar cualquier terreno para



llegar a su destino. Por ello, el control no se centrará tanto en la precisión de las consignas como en la satisfactoria ejecución del movimiento demandado por las variables de control.

2.2.1.1 Mando de Control

En este primer prototipo del modelo, se decide hacer las pruebas finales del vehículo sobre un soporte que lo mantenga en alto. De esta forma no se necesitará un control remoto, donde las comunicaciones y conexiones inalámbricas podrían sumar problemas y dificultades, pudiéndose gestionar el control del vehículo desde un panel externo. Esto se asemeja al control del vehículo final a escala 1:1, en cuanto a que el control del vehículo estará integrado en el mismo.

Velocidad

La consigna de velocidad se tomará desde un potenciómetro conectado a una entrada analógica del microcontrolador. El micro recibirá una tensión entre 0V y 3,3V a lo que corresponderá un valor entre 0 y 1023.

Freno

Un pulsador normalmente cerrado (NC) dará la orden de freno. Al ser NC el vehículo queda protegido ante cualquier fallo de la tarjeta, si el pulsador deja de estar alimentado el vehículo frenará automáticamente en vez de quedar la posibilidad de freno invalidada como pasaría en caso contrario. El vehículo, sin importar en qué modo de funcionamiento esté, se deberá parar y mantener frenado mientras el freno esté pulsado.

Reverse

La señal *Reverse* del controlador tiene un *Enable*, mientras vale '1' los motores giran en su sentido directo de giro y cuando cambia a '0' giran en sentido inverso. El interruptor del mando de control llamado también Reverse, al cerrar el circuito (tensión no nula en el pin del micro) pondrá a '0' la señal *Enable* de todos los controladores siempre que en el instante de antes el vehículo estuviese parado. Del mismo modo, solo devuelve la señal *Enable* a '1' si antes el vehículo estaba parado. Esto significa que, aunque el interruptor cambie de posición, el control no hará caso a la señal hasta que no se frene por completo el vehículo. Esto ha de ser así porque los motores, ante una petición de cambio del sentido de giro, se bloquean por protección si estos no estaban antes parados.



Giro sobre sí mismo

Pulsador NC que pide el cambio de la señal de salida *Enable* a '0' de las ruedas izquierdas y pone la misma consigna de velocidad en todas las ruedas. De nuevo, esto solo sucederá mientras el pulsador este pulsado (variable de entrada a '0') y se haya frenado el vehículo. Una vez en este funcionamiento, aunque se deje de pulsar el *Giro sobre sí Mismo* no saldrá de la cinemática hasta que se vuelva a frenar el vehículo.

2.2.1.2 Cinemáticas

El vehículo contará con la posibilidad de acelerar, frenar, girar las ruedas delanteras manualmente para modificar suavemente la dirección y de girar sobre sí mismo para hacer un cambio de dirección cerrado. El giro del vehículo se fijará de forma manual y un potenciómetro situado en la rueda delantera izquierda recogerá la medida de giro en cada momento.

De cara a, más adelante, entender de forma rápida y sencilla la Máquina de Estados a implementar en el Software, se distinguirá entre cinco cinemáticas nombradas igual que los cinco estados.

Mantener

Estado en el cual la consigna de la velocidad medida del potenciómetro coincide con la velocidad instantánea del vehículo y, por tanto, no se han de modificar las señales PWM que controlan los motores. Se ha definido un rango de incertidumbre de unos $48mV$ aproximadamente para que ante ligeras variaciones entre lecturas no se modifique constantemente la consigna.

Acelerar

Se define una recta de aceleración para evitar picos de corriente y saltos bruscos de velocidad en el motor. Para ello se ha de conocer el punto de la recta en el que se comienza, variable nombrada como *dc* y la velocidad que se desea alcanzar, directamente la lectura del potenciómetro. La variable *dc* representa la velocidad que el vehículo tenía en el instante que se aumenta la consigna del potenciómetro, se hará referencia a ella como la velocidad instantánea del vehículo a lo largo del documento.

Para definir la recta se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- *Rango del potenciómetro: [0 – 1023]*
- *Rango del ciclo de trabajo del PWM: [0 – 100]%*
- *Tarea Idle, tiempo de ejecución de cada ciclo de scan: 10 ms*

Y se debe elegir el tiempo en el que se quiere pasar de $DC=100\%$ a $DC = 0\%$



- **Aceleración:** de 0% a 100% en 3000 ms en saltos de 10 ms

Por tanto, la ecuación de la recta con la que se obtiene el ciclo de trabajo en porcentaje en función del número de ciclos de *scan*, lo cual se traduce en tiempo multiplicando por los *10 ms* que tarda cada ciclo, es la siguiente:

$$DC(\%) = \frac{100}{3000} \cdot (n^{\circ} \text{ ciclos} \cdot 10 \text{ ms}) = \frac{1}{3} \cdot n^{\circ} \text{ ciclos}$$

En la Figura 7 se representan los saltos del ciclo de trabajo cada *10 ms*, siendo cada salto un ciclo de *scan*. Se ejemplifica el caso de que la velocidad instantánea sea tal, que se corresponda con un $DC=3,33\%$ del PWM mientras que el potenciómetro demanda un $DC=4,33\%$. En este caso se habrán de ejecutar 3 ciclos de *scan* para actualizar la velocidad del vehículo, lo que significa que se tardarán *30 ms* en alcanzar la velocidad final y que cada *10 ms* el ciclo de trabajo habrá aumentado $1/3$.

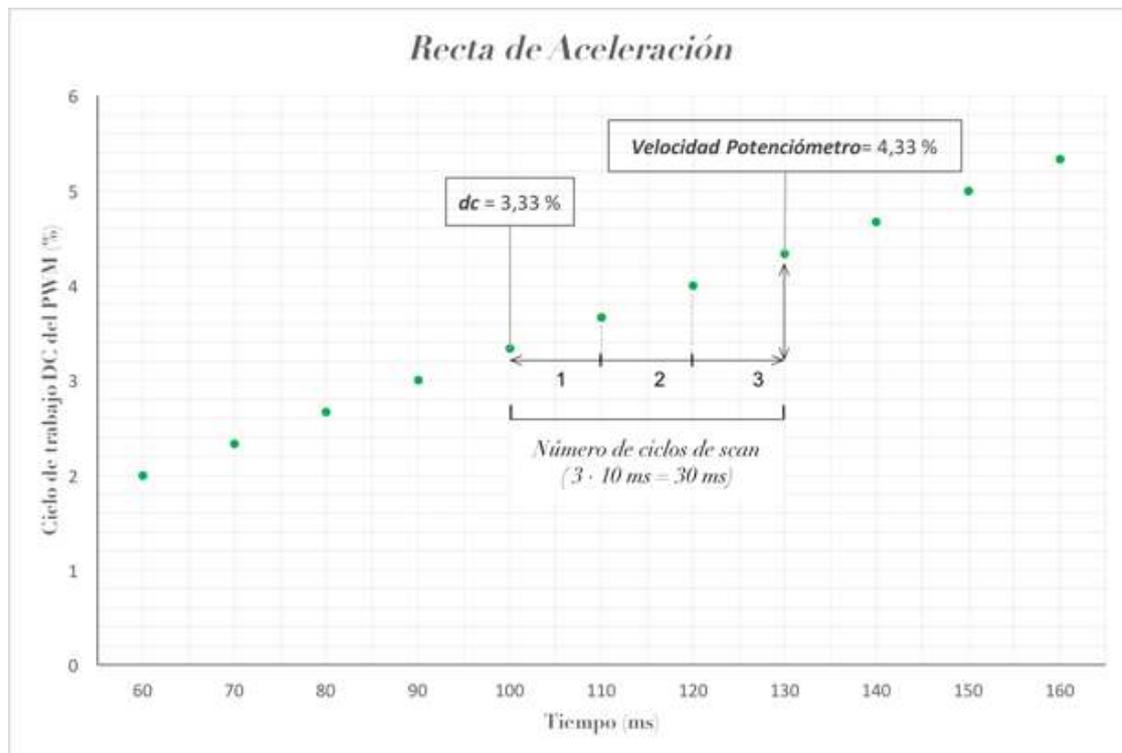


Figura 7: Recta de aceleración del vehículo

El valor **dc** que se ha estado mencionando sería el ciclo de trabajo correspondiente a la velocidad global del vehículo, es decir, velocidad de su centro de gravedad. Puesto que se otorga movimiento con cuatro señales PWM, una para cada motor, habrá que convertir ese ciclo de trabajo al valor equivalente que demandaría el potenciómetro, valor de 0 a 1023, con el que se definirán los cálculos pertinentes de la cinemática de



Ackermann. Por tanto, la equivalencia entre el valor DC (%) calculado y el valor entre 0 y 1023 que debe recibir la función que calcula el DC correspondiente de cada PWM será:

$$DC(0 - 1023) = \frac{1023}{100} \cdot \frac{1}{3} \cdot n^{\circ} \text{ ciclos} = 3,41 \cdot n^{\circ} \text{ ciclos}$$

Frenar

De forma análoga se define una recta de frenado para evitar un parón brusco de los motores y, por ende, del vehículo. Del mismo modo se habrá de conocer la velocidad instantánea del vehículo, almacenada en **dc**, y la velocidad demandada por el potenciómetro en ese momento.

Las especificaciones y los parámetros a tener en cuenta son los mismos que en el caso de la aceleración.

- *Deceleración*: de 100% a 0% en 3000 ms en saltos de 10 ms

La ecuación de la recta queda de la siguiente forma:

$$DC(\%) = -\frac{100}{3000} \cdot (n^{\circ} \text{ ciclos} \cdot 10 \text{ ms}) + 100 = -\frac{1}{3} \cdot n^{\circ} \text{ ciclos} + 100$$

De nuevo, la Figura 8 ejemplifica el caso de que la velocidad instantánea del vehículo es tal que se corresponde con un PWM del 97,33% mientras que el potenciómetro demanda un ciclo de trabajo de 95,67%. Se necesitarán 5 ciclos de scan para actualizar la velocidad al nuevo valor demandado, es decir, cada 10 ms habrá una reducción de 1/3% del ciclo de trabajo y se tardará un total de 50 ms en alcanzar la velocidad final.

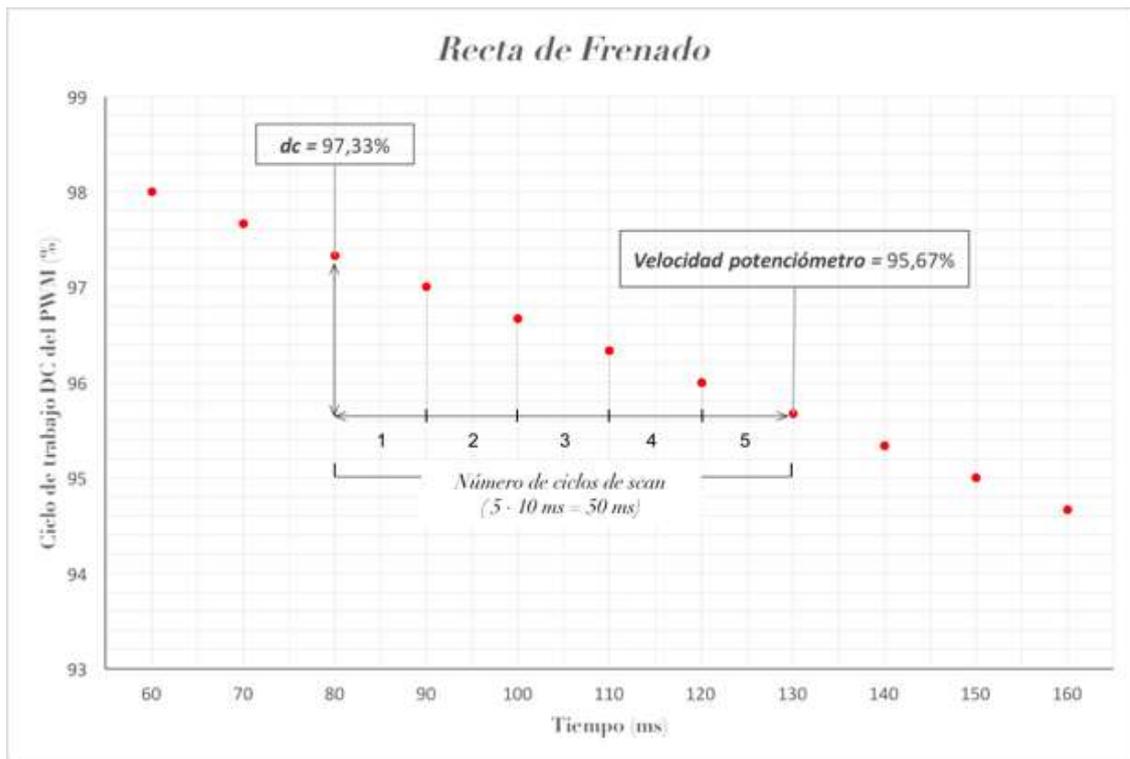


Figura 8: Recta de frenado del vehículo

El acondicionamiento del valor del dc en porcentaje del ciclo de trabajo a su correspondiente valor de 0 a 1023 que debe recibir la función que calcula la señal PWM correspondiente para cada motor será el mismo que en la recta de aceleración:

$$DC(0 - 1023) = 3,41 \cdot n^{\circ} \text{ ciclos}$$

Parado

Estado en el cual se fuerza el frenado del vehículo hasta que su velocidad es nula o, según se implementará en el código, hasta que su valor dc sea igual o menor que la unidad de reducción que se establezca para cada salto. Se hace uso de la misma recta de frenado que se acaba de explicar con la condición de ir reduciendo el valor de dc hasta llegar al final de la recta.

Giro sobre sí mismo

Estado al que solo se accede si previamente se estaba en el estado de Parado donde se activa la señal de *Enable* (poner a '0') de las ruedas izquierdas para que inviertan su sentido de giro. Además, se establece la misma velocidad para los cuatro motores, que estarán girados aproximadamente 45° en sentido anti horario respecto a la transversal. De esta forma el vehículo no se desplazará, sino que rotará sobre sí mismo. Es también, en el estado de Parado, donde se vuelve a desactivar el *Enable* (poner a '1') de las ruedas izquierdas para que retomen su sentido de giro directo.



2.2.2 Carga y Descarga de la Batería

El segundo objetivo principal del vehículo, tal y como se ha ido mencionado a lo largo del documento, es que este sea capaz de transporta, almacenar y suministrar energía allá donde vaya. A continuación, se explicará cómo se ha abordado la implementación para conseguir dicho objetivo.

2.2.2.1 Carga

Teniendo en cuenta que el vehículo se diseña pensando en su utilidad en países en vías de desarrollo o en trabajos de campo en zonas de difícil acceso, se debe pensar en varios métodos posibles de carga de la batería para situaciones en las que una toma de corriente no esté a un alcance próximo.

Cargador

El primer método de carga de la batería será a través de su cargador mediante una toma de corriente. Esta será la forma más rápida y segura de cargar por completo la batería. Sin embargo, puede no ser siempre una opción accesible.

En el caso de que el cargador esté conectado a la batería el control bloqueará la posibilidad de acelerar el vehículo. Aunque el potenciómetro demande una cierta velocidad, esta será ignorada hasta que el cargador no se haya desconectado.

Extensor de Autonomía

Como ya se ha explicado, en el modelo a escala esto consiste en dos motores eléctricos acoplados mecánicamente para simular un motor eléctrico de arranque que arrastra a un motor de combustión, situación real en el modelo a escala 1:1.

Cuando el extensor de autonomía está funcionando, cargando la batería, el movimiento del vehículo está permitido. Sin embargo, un LED luce para indicar que la batería está cerca de su nivel mínimo de carga y que dicho motor está en funcionamiento.

Toma de Fuerza Externa

Por último, se ha incluido una fuente de energía que no precisa más que hacer girar el eje de un motor eléctrico desde el exterior. Al hacer girar el eje se produce una diferencia de tensión en los bornes del motor que, al conectarse a la batería, proporcionan carga a la misma.

Puesto que, en esta situación, alguien o algo debe estar haciendo girar el eje, no se permite el movimiento del vehículo mientras esta fuente carga la batería. La consigna



de velocidad será ignorada hasta que el par externo cese y un LED lucirá mientras la batería se esté cargando desde esta fuente.

2.2.2.2 Descarga

Del mismo modo, se ha de pensar que una de las razones para que el vehículo alcance una zona sea la necesidad de entregar energía. Para ello se han de diseñar varios métodos de descarga de la batería.

Sistema de propulsión

La principal forma de descarga, intrínseca a la naturaleza de un vehículo eléctrico, es debido a la alimentación de los motores cuando el vehículo está en movimiento. Este estado de descarga se dará siempre que no haya otro estado de carga o descarga que lo impida, por tanto, está sujeto a los demás modos de funcionamiento.

Toma de Fuerza Externa

De la misma forma que el motor eléctrico con toma de fuerza externa sirve para cargar la batería, servirá para ofrecer al exterior un par mecánico constante, descargando la batería.

Análogamente a su uso para carga, el movimiento del vehículo estará impedido mientras se esté entregando dicho par al exterior.

Toma de corriente

Por último, se desea añadir la posibilidad de ofrecer la energía de la batería como una toma de corriente de tensión y frecuencia constante. Esto se incluirá en las futuras mejoras puesto que no se implantó en el modelo final.

En este caso, el movimiento del vehículo también se habrá de impedir.



3. DISEÑO DEL VEHÍCULO

El fin último de este proyecto es el de conseguir el diseño y construcción de un vehículo que pueda servir de ayuda a países en vías de desarrollo donde la infraestructura de soporte a los medios de transporte sea escasa o poco efectiva o donde se necesite una fuente de energía puntual. Del mismo modo, poder prestar servicio en situaciones como catástrofes naturales, servicios de mantenimiento en zonas complicadas o como medio de alcance de zonas aisladas, entre otras situaciones.

La idea conceptual del vehículo nace de los vehículos Rover [17] y los todoterrenos de uso militar como el *Jeep Willys*. Los Rover son vehículos todoterreno diseñados especialmente para su movilidad en terrenos agrestes y poco adaptados. Posiblemente el ejemplo más famoso es el Lunar Roving Vehicle que fue utilizado por la *NASA* para las misiones del *Apollo 15, 16 y 17* [18], diseñado para su tránsito por la superficie lunar. Como puede observarse en la Figura 9, dicho vehículo tiene un diseño sencillo y robusto capaz de mantener la estabilidad, evitar vuelcos y permitir el avance por terrenos con desniveles.

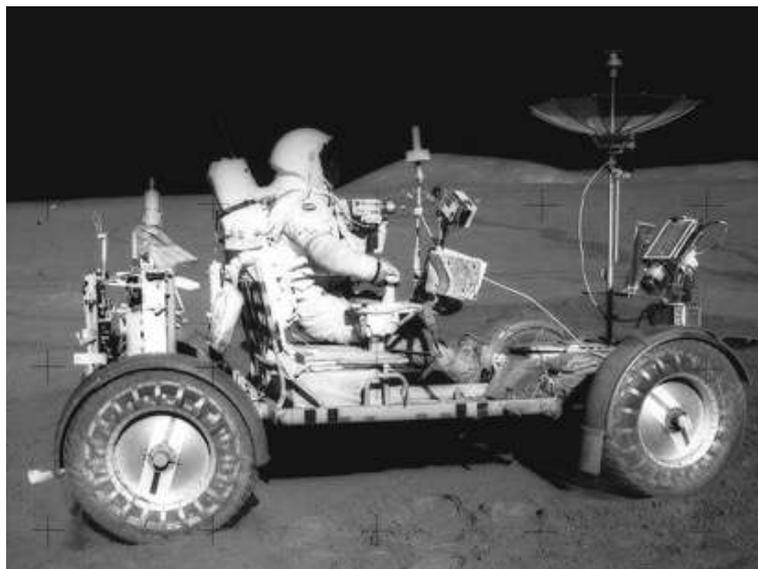


Figura 9: Vehículo Rover lunar utilizado en las misiones del *Apollo 15, 16 y 17* [19]

El diseño de este vehículo, al estar destinado para su uso en la superficie lunar, estaba sujeto a condiciones especiales como la ausencia de atmósfera, una gravedad de aproximadamente un sexto de la gravedad terrestre y temperaturas extremas. Si bien esas especificaciones no aplican a este proyecto, otras consideraciones de diseño derivadas como, la simplicidad del modelo, confiabilidad, su robustez y su poco peso



y consumo energético, no solo sí aplican, sino que son la razón por la cual este vehículo lunar sirve de referencia para el diseño y desarrollo del vehículo de este proyecto.

Por otra parte, los todoterrenos como el Jeep Willys, Figura 10, se diseñaron para desempeñar tareas y misiones militares por lo que debían ser compactos y estables, presentar una larga autonomía, alta confiabilidad y bajo mantenimiento. Características que también se desean para el vehículo a diseñar.



Figura 10: Jeep Willys CJ-3B de 1953



3.1 Criterios de diseño

Tomando como punto de partida el vehículo lunar Rover y los mencionados todoterrenos, en este apartado se procede a definir las especificaciones físicas de diseño del vehículo. A continuación, se describen las características finales del vehículo, así como el proceso y los argumentos para la toma de decisiones de dichas especificaciones.

3.1.1 Dimensiones

Se ha de tener en cuenta que este proyecto es el modelo real a escala de un vehículo todoterreno que se desea construir en el futuro a partir de dicho modelo, es decir, se habrá de partir de las dimensiones finales deseadas en el modelo a escala 1:1 para concluir con las dimensiones del vehículo a escala 1:3.

El vehículo del cual se desea hacer el modelo a escala se espera siga la línea conceptual de los vehículos todoterrenos como los *Jeep Viasa-CJ-3* o el posterior modelo *CJ-5* o el *Suzuki SJ-410* cuyas especificaciones se recogen en la Tabla 3. La serie *CJ*, Civilian Jeep, se comenzó a fabricar después de la Segunda Guerra Mundial como las versiones civiles de los vehículos militares *Willys M38*. Este tipo de vehículos serán los que sirvan de referencia en cuanto a las especificaciones técnicas de diseño de potencia y dimensiones del vehículo.

	SJ-410	ESP-CJ-3	CJ-5	Escala 1:3	Vehículo final
Potencia (CV)	45,0	68,5	66,0	2,5	1,35
Batalla (mm)	2.030,0	2.032,0	2.057,0	677,3	600,0
Peso (kg)	900,0	1.050,0	1.031,0	38,9	35,0
Velocidad (km/h)	110,0	100,0	100,0	100	162,0
Diámetro rueda (mm)	800,0			266,7	360,0
Largo envolvente (mm)	1.530,0			510,0	600,0
Alto envolvente (mm)	400,0			133,33	150,0
Ancho envolvente (mm)	500,0			166,7	170,0
	Escala			1:3	

Tabla 3: Comparativa de especificaciones de diseño de vehículos todoterreno



3.1.2 Potencia

Al igual que el vehículo lunar, se decidió implementar ruedas con motores eléctricos integrados simplificando significativamente el modelo, haciendo que el mantenimiento se reduzca al mínimo y proporcionando tracción en las cuatro ruedas para mayor robustez y estabilidad durante el tránsito por terrenos complicados. Siendo eléctrico, además, se consigue evitar la dependencia a la que los motores de combustión están ligados y se da la posibilidad de conseguir almacenar energía en la batería desde diferentes fuentes según los medios disponibles. Estas características no solo se desean para el modelo a escala sino también para el modelo final a tamaño real. De tal forma que, la potencia del vehículo vendrá dada por la suma de las potencias de los cuatro motores eléctricos. En el modelo final esta especificación se deberá analizar con detalle para que sea capaz de transitar por terrenos áridos. Sin embargo, las pruebas del modelo a escala se realizarán en alto por lo que la potencia no es un factor de gran relevancia. Por otra parte, se deberá comprar una batería que alimente a la tensión de alimentación de los controladores de los motores y que tenga suficiente potencia como para alimentar a los cuatro motores al mismo tiempo.

3.1.3 Estructura

La estructura del vehículo está compuesta por un bastidor, cuatro ballestas, cuatro soportes para las ruedas, dos varillas de alineación de las ruedas delanteras y traseras, respectivamente, una bancada para los motores y una envolvente.

3.1.3.1 Bastidor

El bastidor es una pieza de metacrilato de dimensiones $60\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 0,3\text{ cm}$ con veinte taladros pasantes de diámetro 120 mm , tal y como se puede apreciar en la Figura 11. Este es una simplificación de un bastidor plano de lo que será el bastidor en el modelo real.

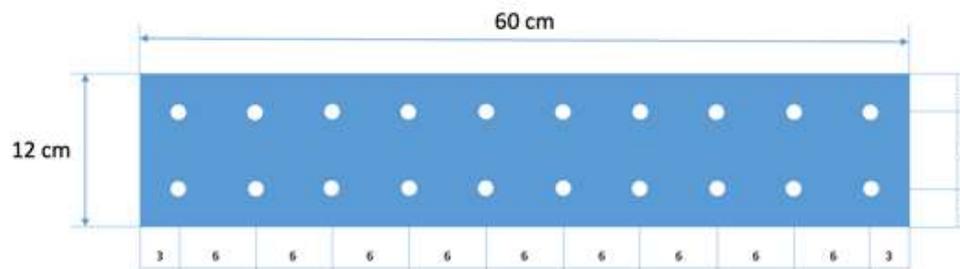


Figura 11: Plano del bastidor del vehículo



El material elegido es el metacrilato no solo por razones estéticas, es prácticamente transparente, sino también por sus características físicas de alta resistencia al impacto, resistencia a la intemperie, buen aislante térmico, significativamente ligero y gran facilidad de mecanización y moldeo. Los taladros pasantes a lo largo de toda la superficie dan la posibilidad de instalar bancadas para los motores u otros accesorios que, más adelante, se puedan necesitar.

3.1.3.2 Ballesta

Las ballestas son las piezas de transición entre el bastidor y las piezas de sujeción de las ruedas. Están conformadas con polietileno de alta densidad lo que les confiere flexibilidad, alta resistencia al impacto, tenacidad y ligereza. Las dimensiones de cada pieza son de $30\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 0,3\text{ cm}$ las cuales se muestran en la Figura 12.

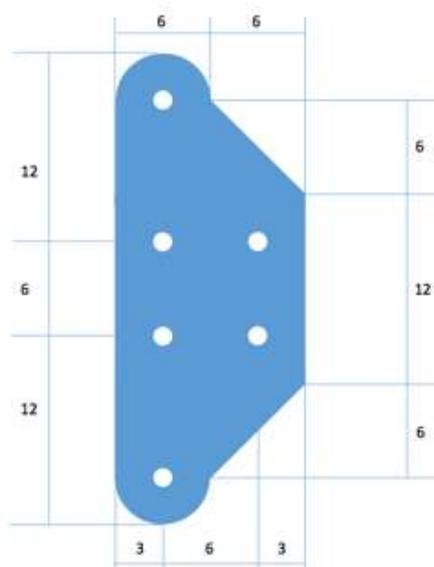


Figura 12: Plano de la ballesta del vehículo (cotas en cm)

En total se usarán cuatro piezas como la mostrada en la figura, una a cada lado del bastidor y dos en cada extremo del bastidor. Los taladros pasantes son, al igual que los del bastidor, de 120 cm de diámetro. Estos taladros servirán para fijar el elemento de sujeción de las ruedas a las ballestas y estas al bastidor.

Gracias al diseño y el material empleado para las ballestas, estas configuran un bastidor flexible, lo que hace que no sea necesario suspensiones para las ruedas. El modelo real incluirá, también, suspensiones integradas en el bastidor y, al mismo tiempo, estará dotado de un bastidor flexible mediante el uso de distintos materiales y su configuración.



Otra razón por la cual el bastidor tiene taladros a lo largo de toda la superficie es para dar la posibilidad de aumentar el número de ruedas. Con tan solo añadir dos ballestas adicionales se estarán sumando un par de ruedas. La siguiente figura ilustra la idea descrita.

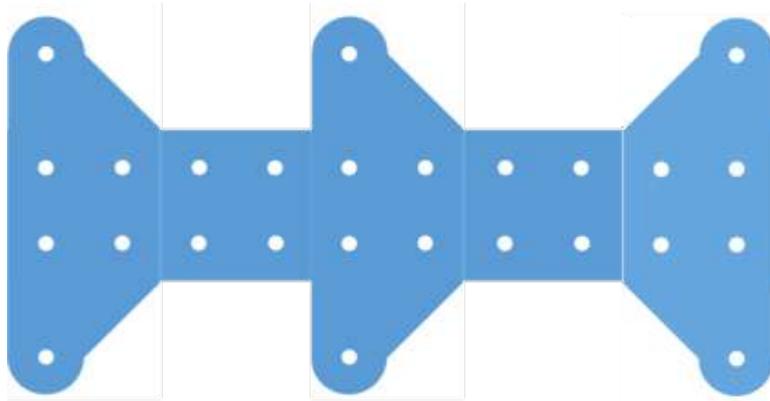


Figura 13: Montaje de bastidor más tres pares de ballestas para seis ruedas

3.1.3.3 Soporte de las ruedas

De nuevo, se fabricaron en metacrilato para favorecerse de sus propiedades mecánicas. Estas piezas casi octogonales, Figura 14, permiten el giro libre de la rueda, hasta encontrarse con el bastidor. La forma se justifica por ser la más sencilla posible teniendo una zona “redondeada” para evitar rozamiento con ninguna otra pieza del vehículo y que la rueda pudiese girar libremente.

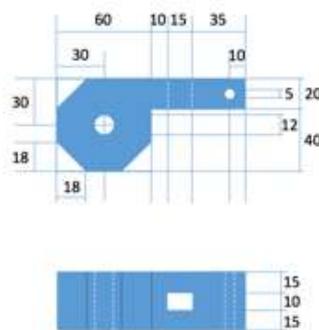


Figura 14: Plano de la pieza de soporte de las ruedas del vehículo (cotas en cm)

El taladro pasante del centro del octógono une la pieza con la ballesta, el taladro del extremo del rectángulo une una pieza metálica para ligar la posición de ambas ruedas y proporcionar al vehículo con la cinemática de *Ackermann*. Por último, el rectángulo



pasante que se observa en la vista de planta une la rueda con la pieza a través del eje del motor.

Se ha de recalcar que esta pieza de sujeción tiene un efecto ilustrativo y funcional para el modelo a escala, sin embargo, no será igual en el modelo final a escala 1:1.

3.1.4 Cinemática del vehículo

A la hora de diseñar el vehículo se ha de tener en cuenta qué cinemática se quiere lograr puesto que puede añadir condiciones de diseño al modelo. Tratándose de un vehículo simple, robusto y estable principalmente, una cinemática de *Ackermann* simple unida a la posibilidad de giro sobre sí mismo, da la posibilidad al vehículo de moverse en cualquier dirección y llegar a cualquier punto del plano.

Para lograr la cinemática mencionada, las ruedas irán unidas dos a dos, delanteras y traseras, por una pieza rígida metálica y expansible. Esta mantendrá una relación de giro de una rueda respecto a la otra y permitirá tener siempre una cinemática válida para las ecuaciones de *Ackermann*, donde las ruedas no deslicen. Por otra parte, se va a permitir un giro máximo de 45° para cada una de las ruedas. Las delanteras serán las ruedas directrices, por ello, su ángulo podrá variar a lo largo de ese rango, sin embargo, las ruedas traseras únicamente podrán estar a 0° con la transversal o cercanas a 45° , para la configuración de giro sobre sí mismo.

Se dispondrá de un potenciómetro en la barra rígida que une las ruedas delanteras para medir el ángulo que la rueda izquierda tiene respecto a la transversal del vehículo. El resto de parámetros se calcularán derivados de ese ángulo, sabiendo las medidas de la vía y el bastidor del vehículo.

3.1.5 Suministro de energía del vehículo

Junto con la movilidad del vehículo, las fuentes de carga y descarga del mismo son los aspectos que definen la particularidad del presente proyecto. Además de ser un vehículo simple, robusto y capaz de transitar por terrenos poco accesibles, debe tener la capacidad de almacenar, transportar y suministrar energía allá a donde vaya. Del mismo modo debe tener varias posibilidades de carga de su batería para minimizar las ocasiones en las que el vehículo se pueda quedar sin carga.

Para abordar este problema se propusieron varias alternativas que, todas juntas, hacen que el vehículo siempre tenga al menos una posibilidad de carga o descarga accesible en todo momento.



3.1.5.1 Cargador de la batería

En primer lugar, la batería del vehículo contará con un cargador para recargarla a su posible máximo de tensión en las mejores condiciones de recarga y en el mínimo tiempo posible. Para ello, será necesario una toma de corriente, lo cual no siempre estará disponible en el tipo de tareas a las que se orienta la utilidad de este vehículo. Es por ello que se implementan otras fuentes de energía para cargar la batería.

Las dos siguientes fuentes de energía del vehículo forman parte del Proyecto de Fin de Grado [20] asociado al que se presenta en este documento, por tanto, se va a hacer mención a ello puesto que forma parte del vehículo, pero no es objeto de estudio y desarrollo en este proyecto.

3.1.5.2 Extensor de Autonomía

Se denomina extensor de autonomía a una fuente adicional de energía, ya sea un motor de combustión interna o una fuente electroquímica como las celdas de combustible de hidrógeno. En el modelo real se implementará un motor de combustión arrastrado por un motor eléctrico de arranque que sirva para elevar la carga de la batería de forma ocasional. Sin embargo, el modelo a escala presentaba problemas en la implementación de un motor de combustión de tamaño tan reducido. Por ello, se decidió simular el motor de combustión con otro motor eléctrico junto con una batería de $36V$ para proporcionar la energía de arranque.

Finalmente, el extensor de autonomía del modelo real a escala se compondrá de dos pequeños motores eléctricos de continua sin escobillas de $500W$ de potencia y $36V$ de tensión, como el de la Figura 15. Se deberá tener en cuenta que estos motores han de acoplarse mecánicamente y que deben quedar perfectamente alineados para su correcto funcionamiento. Por lo que, se deberá añadir una bancada sobre el bastidor para poder montar ambos motores sobre una superficie estable y plana.

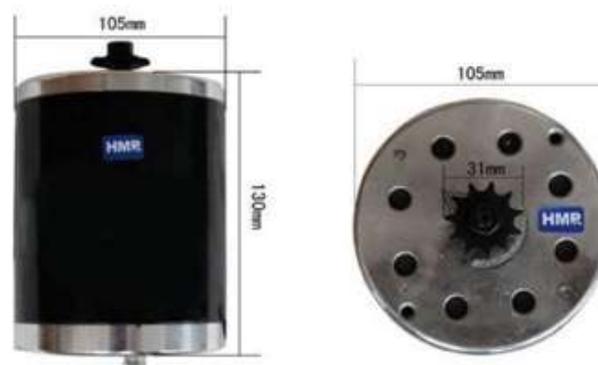


Figura 15: Extensor de Autonomía compuesto por dos motores de continua sin escobillas 36V 500W [21]



3.1.5.3 Toma de fuerza externa

Adicionalmente, se decide instalar un motor con toma de fuerza externa de manera que se pueda entregar un par mecánico constante y controlado al exterior, alimentado por la batería. Pero que, al mismo tiempo, sirva para cargar la batería haciendo girar el eje del motor aportando un par de fuerza que se entregue desde el exterior.

El modelo real a escala $1:1$ deberá contar con una reductora de manera que la potencia generada por el motor debido al par aplicado desde el exterior sea suficiente para elevar significativamente la carga de la batería en poco tiempo. En el modelo a escala $1:3$, el motor no tendrá reductora y, gracias al reducido tamaño del motor se podrá usar un destornillador eléctrico para hacer girar el eje a una velocidad tal que permita elevar la carga de la batería de forma notable en poco tiempo.

Como se puede observar en la Figura 16, el motor elegido es un motor eléctrico de continua sin escobillas a $36V$ de tensión y $300W$ de potencia. En este caso, el motor irá acoplado en la parte trasera del vehículo, tal y como iría en el vehículo final a escala $1:1$, para que el eje del motor sea de fácil acceso.



Figura 16: Toma de fuerza externa formado por un motor de continua de $36V$ $300W$ [22]



3.2 Componentes principales

En el presente apartado se detallará el funcionamiento y las especificaciones de cada componente principal del vehículo.

3.2.1 Motor rueda

Por simplicidad del modelo, comentado anteriormente, y por analogía con el vehículo lunar, se decidió comprar motores en rueda en vez de un único motor eléctrico. La potencia del vehículo la determinan, por tanto, la potencia que todos los motores en conjunto sean capaces de entregar. Tras una búsqueda exhaustiva de ruedas motor de bicicletas o scooters eléctricas se determinó la compra de motores de corriente continua y sin escobillas de $36V$ de tensión y $250W$ de potencia activa. Los cuatro motores suman una potencia total de $1 kW$ [23], suficiente teniendo en cuenta que las pruebas de funcionamiento del prototipo se realizarán sobre un soporte de manera que el peso del mismo no recaiga sobre las ruedas. Se ha de destacar que se puso especial cuidado y atención a la búsqueda de las ruedas para que fueran fieles en potencia y dimensiones en escala $1:3$ al modelo final a escala $1:1$.

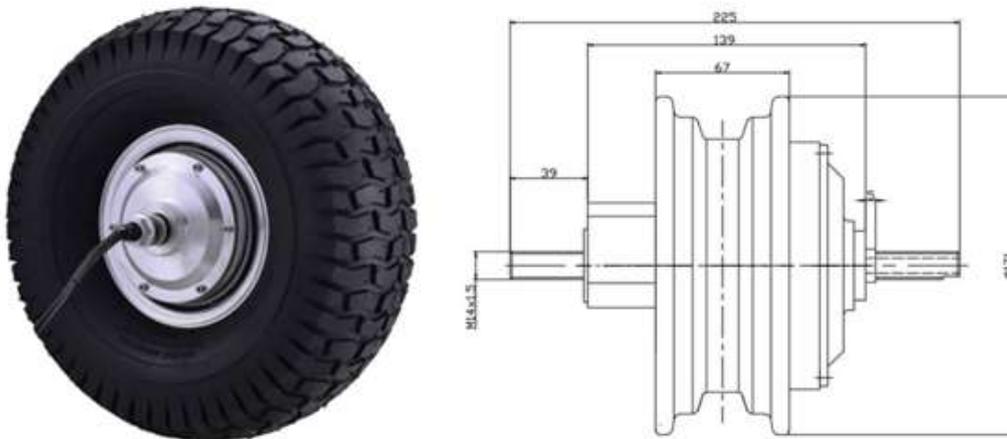


Figura 17: Plano de la rueda motor [23]

3.2.1.1 Motor DC Brushless

Los motores en rueda (Hub Motor) para uso en bicicleta o scooters eléctricos son motores de corriente continua formados por un rotor y un estator. El rotor es la pieza externa que gira y está formado por imanes permanentes, dependiendo del número de imanes se definirá el número de polos de la máquina. Por otra parte, el estator es fijo y está unido al eje de la máquina, en él se induce un campo magnético generado por la



corriente que atraviesa las espiras que lo conforman. En la Figura 18 se simplifica el concepto de una máquina de corriente continua. En presencia de dos campos magnéticos se produce un par proporcional a ambos campos y al seno del ángulo formado entre ellos que hace que ambos se alineen. Para evitar que esto suceda, pues produciría el paro de la máquina, se deja uno de los campos fijos, el del rotor, mientras que el otro se crea disponiendo varias espiras por las que se hace circular corriente de forma alterna para cambiar de posición el campo inducido en el estator. De esta forma el campo fijo del rotor continuamente sigue al campo variable del estator, haciéndolo girar.

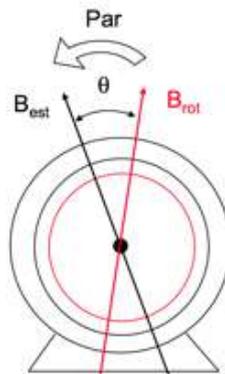


Figura 18: Campos magnéticos de excitación e inducidos del estator y rotor, respectivamente, de un motor de corriente continua.

El motor en cuestión es de corriente continua, de 5 pares de polos y sin escobillas. Esto quiere decir que la conmutación de corriente por las espiras se gestiona mediante un control digital y que el campo fijo del rotor está producido por 10 imanes permanentes, cinco Norte y cinco Sur. Tres sensores de Efecto Hall dispuestos con un desfase de 120° entre ellos y 30° respecto a la fase que les precede, se usan para conocer la posición del rotor en cada momento y poder realizar la conmutación en el instante preciso. Al tener 5 pares de polos, 360° eléctricos se corresponden con 72° mecánicos de giro del rotor.

Generalmente, todos los arrollamientos quedan unidos por su lado libre de manera que cuando uno está siendo alimentado, por el siguiente circula la corriente en sentido contrario, de esta manera el primero genera un campo que atrae el del rotor y el segundo genera otro campo que empuja en el mismo sentido de giro. En la Figura 19, se representa el motor en rueda con cinco pares de polos donde se pueden ver los dos campos creados por las espiras contiguas y el campo total del estator como combinación de los dos anteriores. Además, se puede ver como los sensores están dispuestos con los desfases mencionados anteriormente.

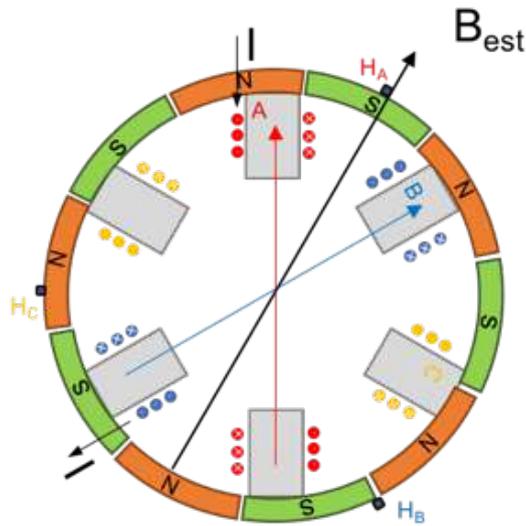


Figura 19: Motor en rueda con cinco pares de polos y sensores Efecto Hall

A continuación, se presenta un esquema en la Figura 20 de la conmutación de corriente por las fases y las señales correspondientes de los Sensores de Efecto Hall. Los sensores se activan en presencia del campo negativo, Sur, de los imanes permanentes del rotor, de esta manera se sabe su posición en todo momento, por el contrario, la señal de los sensores será cero ante la presencia del campo positivo, Norte.

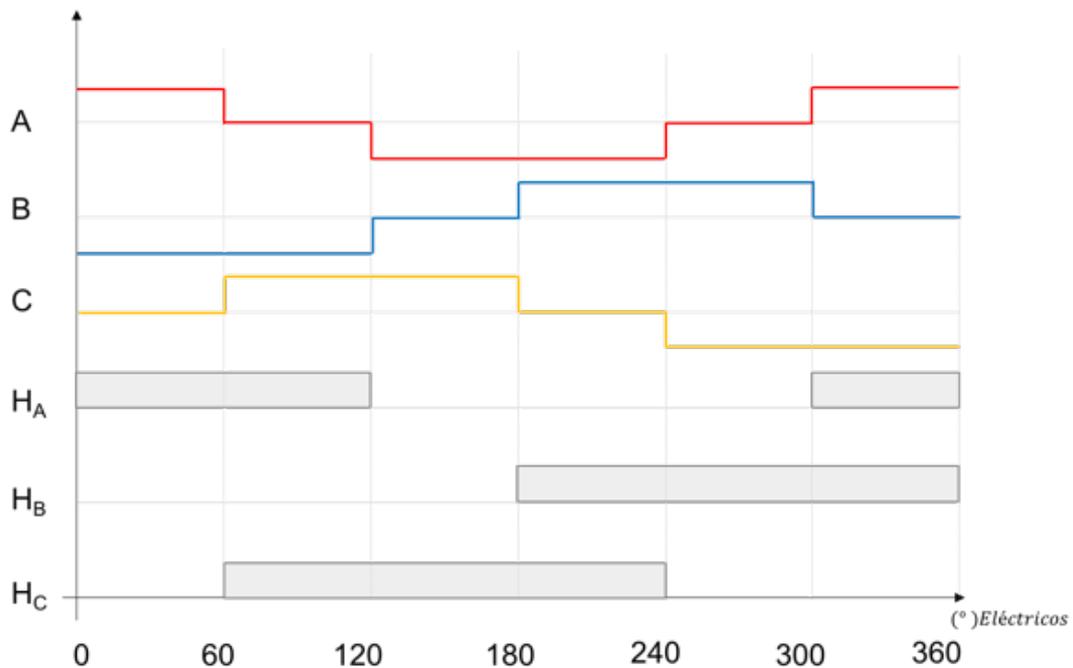


Figura 20: Activación de las espiras según el ángulo eléctrico y señales de los sensores Efecto Hall correspondientes



Más adelante se monitorizaron experimentalmente las señales de dos de los sensores Efecto Hall, Figura 21, no fue posible monitorizar las tres por falta de un tercer canal en el osciloscopio. Con ello se comprobó que los sensores funcionaban correctamente y que, efectivamente, existe dicho desfase entre ellos.

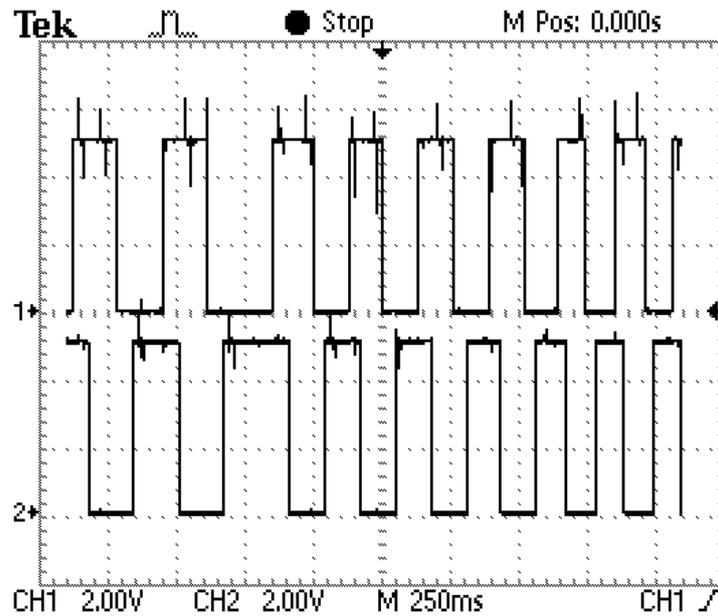


Figura 21: Señales de dos de los sensores de efecto Hall desfasados 120°

3.2.2 Controladores

Cada motor tiene asociado un controlador para la gestión del mismo. La Figura 22 muestra cómo son dichos controladores y permite ver todas las señales disponibles. Las entradas utilizadas para la presente aplicación aparecen marcadas con una flecha y asociadas a un número, estas se explican a continuación:

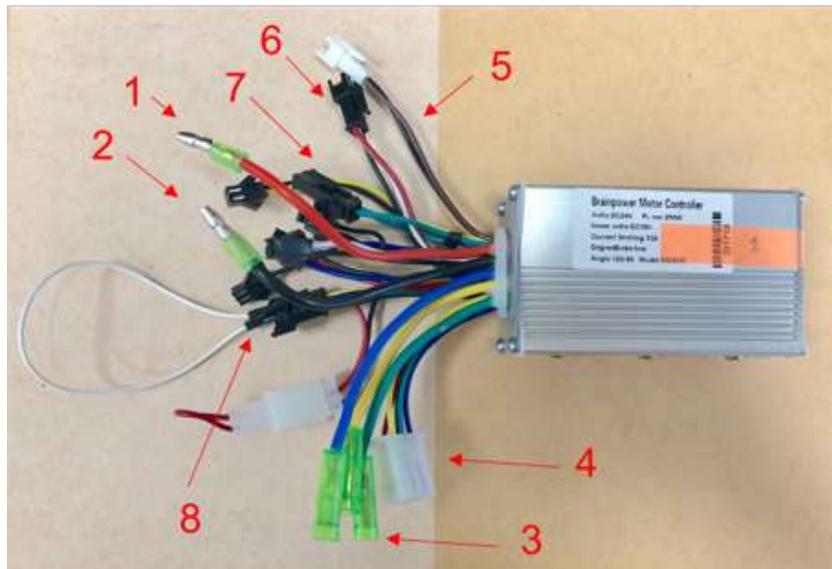


Figura 22: Controlador del motor rueda

1. Alimentación del controlador
2. Alimentación del controlador
3. Alimentación de las tres fases del motor
4. Sensores Efecto Hall y alimentación y tierra de los sensores
5. Señal Enable del modo *Reverse*, cambio de sentido de giro de los motores
6. Consigna de velocidad del motor
7. Señal de *Self-learning*, permite cambiar el sentido de giro del motor en el funcionamiento directo
8. Conexión de la pantalla, display

3.2.2.1 Aceleración y Reverse

Para el correcto funcionamiento del vehículo y su control, únicamente serán necesarias las señales de velocidad y los *Enable* del modo *Reverse*. El potenciómetro de mano que se entrega con el motor, Figura 23, se sustituirá por la salida del microcontrolador. El conector 6, en la Figura 22, presenta un cable rojo, alimentación, otro negro, tierra y uno blanco que será la señal del potenciómetro. Al sustituirlo por la señal del micro tan solo hará falta conectar la tierra, para que esta sea única y común, y el cable blanco que se deberá conectar a la señal generada por el micro.



Figura 23: Potenciómetro de mano del motor rueda

Del mismo modo, la señal de activación del sentido de giro contrario de las ruedas será una salida del microcontrolador, en este caso únicamente será necesario conectar el cable marrón del conector 5, Figura 22, señal que está activa por defecto y se pone a cero cuando se quiere invertir el sentido de giro.

3.2.2.2 Self- learning

Como se ha mencionado brevemente, esta señal permite definir el sentido de giro directo de las ruedas. Si al alimentar el motor y elevar la consigna de aceleración, este gira en el sentido no deseado, se debe parar el motor, unir los conectores de esta señal y volver a desconectarlos. De esta manera el sentido de giro queda redefinido de forma permanente, a menos que se repita el proceso.

3.2.2.3 Display

Otro accesorio con el que se entrega el motor es una pantalla o display donde se muestra la velocidad del motor. Para el presente proyecto no se desea hacer uso de este elemento, sin embargo, una de las señales del display es una señal de *Enable* del controlador. Por tanto, se puentean, tal y como se muestra en la Figura 22, las señales roja, alimentación, y amarilla, *Enable*, del conector 8 del controlador para que este funcione sin necesidad de usar la pantalla.

3.2.2.4 Conexiones de los motores

Por último, se deben alimentar las tres fases de los motores, cables azul, amarillo y verde. Al igual que los sensores de Efecto Hall que se alimentarán a 5V, los cuales respetan el código de colores de cada fase mencionada anteriormente.



3.2.3 Batería

Las baterías elegidas están fabricadas y distribuidas para uso en sillas eléctricas como ayuda a la movilidad, son baterías AGM de $12V$ y $10Ah$. Dos baterías como las mencionadas dispuestas en serie aportan $24V$ y $10Ah$, lo que se traduce en $240Wh$. Junto con las baterías se recibe el cargador cuyas características de carga son $12V$ y $2A$ [24].

Las baterías AGM (Absorbent Glass Matt), es decir, baterías con separador de vidrio absorbente son un tipo de batería de ácido-plomo con válvula reguladora (VRLA).

3.2.3.1 Baterías Plomo-Ácido

Las baterías Plomo-Ácido son uno de los tipos más comúnmente utilizados en la automoción por su comprobada fiabilidad, buena relación precio rendimiento y por ser capaces de entregar altas intensidades de corriente. Estas baterías están compuestas por células en serie de $2V$ cada una que suman la tensión pertinente [25]. Cada célula está compuesta por dos electrodos a base de plomo, el positivo es una barra de dióxido de plomo y el negativo es una barra de plomo. A su vez, los electrodos están inmersos en un electrolito líquido, solución de agua destilada y ácido sulfúrico.

Se distinguen entre baterías de arranque (Starter) y de ciclo profundo (Deep Cycle) [26]:

- Las primeras, Figura 24, están diseñadas para aportar un pico de carga alta durante unos segundos para el arranque de un motor. Esto se consigue añadiendo muchos electrodos para cubrir el máximo área posible lo que minimiza la resistencia interna, se consigue así poder proporcionar corrientes altas para maximizar la potencia a costa de la capacidad de la batería.

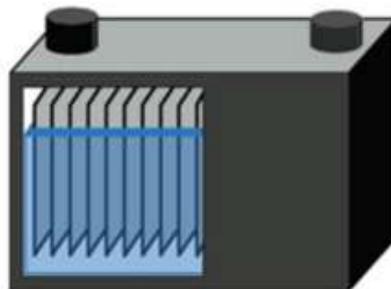


Figura 24: Batería Plomo-Ácido de arranque [26]



- Las baterías de ciclo profundo, Figura 25, como la que se usará en este proyecto, se caracterizan por tener los electrodos de plomo más anchos de lo normal, lo que otorga a las baterías máxima capacidad y ciclos de recarga, una media de 300 ciclos frente a unos 100 ciclos en una batería de arranque.

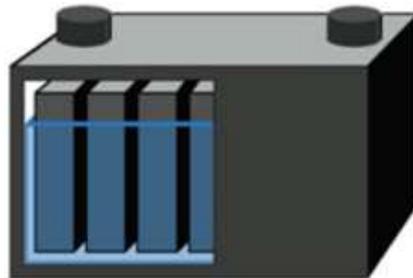


Figura 25: Batería Plomo-Ácido de ciclo profundo [26]

Como todas las baterías, su capacidad va reduciendo a medida que se completan ciclos de carga, adicionalmente, en este tipo de baterías la capacidad reduce cuando se descarga por completo la batería. Además, se deben almacenar totalmente cargadas para evitar que se sulfaten, el ciclo de carga es significativamente lento, entre 14 y 16 horas, y tienen una vida útil relativamente corta debido a la corrosión de los electrodos al estar inmersos en un líquido. Estos problemas encuentran solución con la tecnología de las baterías AGM.

Baterías con Separador de Vidrio Absorbente (VRLA)

Las baterías con separador de vidrio absorbente son un tipo de baterías plomo-ácido con una válvula reguladora. En este tipo el ácido está contenido en una fibra de vidrio fina que lo absorbe, de esta manera no solo se evitan derrames, sino que además se pueden colocar los electrodos más próximos aumentando su eficiencia. La válvula es un mecanismo de seguridad que permite liberar presión, generada por los gases procedentes de la reacción química al cargarse [27], cuando esta sea mayor en el interior de la batería que en el exterior. Con todo ello se consigue que la descarga pueda bajar hasta casi un 80% de la capacidad de la batería, en comparación con el 50% de las baterías tradicionales de plomo-ácido [28], y que se puedan cargar casi 5 veces más rápido que las tradicionales. Por otro lado, las desventajas en las que se incurren son una reducción en la energía específica y un aumento en los costes de producción.



Dada la aplicación del vehículo detallado en el presente proyecto, estas baterías son una buena opción por sus características de carga rápida, alta capacidad, por su protección ante derrames que hace seguro su transporte, por su bajo, casi nulo, mantenimiento y por su capacidad de funcionamiento a bajas temperaturas.



Figura 26: Baterías AGM de 12V [24]

3.2.4 Microcontrolador

El *dsPIC33FJ32MC202* es un microcontrolador que, gracias a los periféricos con los que recibe información del entorno, es capaz de controlar y actuar sobre el mismo. Los periféricos utilizados en esta aplicación serán:

- Convertidor A/D, para la lectura de la consigna de velocidad, la medida del giro de la rueda izquierda y para conocer uno de los modos de carga de la batería, lo cual se detallará más adelante.
- Puerto I/O: entradas digitales para conocer el estado de funcionamiento demandado al vehículo y salidas digitales que serán LEDs para señalar la forma de carga o descarga de la batería y el freno del vehículo.
- Módulo PWM: señal de control de velocidad de cada motor, se generará en función a la velocidad demandada y el giro medido.
- Timers: con una tarea Idle se llevará una periodicidad sobre el ciclo de *scan* para llevar un control de la ejecución del código y, en consecuencia, de la actualización de las variables.

En la Figura 27 se nombran y detallan la funcionalidad de los pines del microcontrolador en uso.

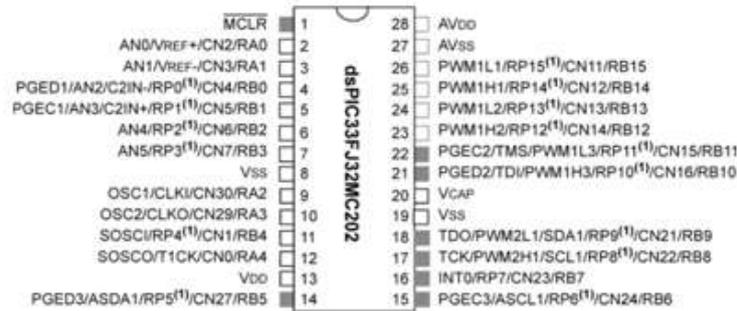


Figura 27: Diagramas de pines del microcontrolador dsPIC33FJ32MC202 [29]

El microcontrolador está ensamblado en una tarjeta, PicTrainer, desarrollada en la Universidad Pontificia Comillas durante la asignatura de SED, Sistemas Electrónicos Digitales [30].

Un periférico es un dispositivo del que se sirve el microcontrolador para realizar tareas específicas sin consumir tiempo de CPU (Central Processing Unit o Unidad Central de Procesamiento). A continuación, se explicarán con más detalle los periféricos empleados para el desarrollo del control de la cinemática del vehículo.

3.2.4.1 I/O

Los puertos paralelo disponibles normalmente comparten pin con los periféricos, cuando este es el caso, el periférico tiene prioridad sobre la entrada o salida digital. De esta forma, si el periférico se habilita, automáticamente, el pin digital queda deshabilitado.

En el microcontrolador utilizado se cuenta con dos puertos A y B, los cuales a su vez tienen 5 y 16 líneas, respectivamente, las cuales son totalmente independientes. Por tanto, se cuenta con pines RA0-RA4 en el puerto A y pines RB0-RB15 en el puerto B.

A su vez, todos los puertos tienen asociados tres registros para el control del pin digital [29].

- **TRISx**: registro de control de la dirección de datos, determina si el pin en cuestión es entrada ('1') o salida ('0'). Si se modifica este registro de control habrá de esperar un ciclo de scan para que se actualice el nuevo valor.
- **PORTx**: registro de datos, escribe un valor al Latch si es un pin digital de salida o lee el valor directamente del puerto si está configurado como entrada. Cabe destacar que tanto si se lee del puerto como si se escribe en el Latch, el dato solo se modifica una vez por ciclo de scan. Esto quiere decir que, si definimos



el registro de $PORTx$ varias veces en un mismo ciclo, los valores se sobrescribirán permaneciendo el último únicamente.

- **LATx**: registro de datos, el Latch almacena el valor del pin en cuestión, tanto si está configurado como entrada como si está configurado como salida.

3.2.4.2 Timers

Existen tres timers independientes, $TIMERx$, disponibles en el micro de 16 bits cada uno. Sin embargo, los timers 2 y 3 pueden combinarse para conseguir uno de 32 bits. Los tres pueden ser temporizadores o contadores síncronos o asíncronos. A ellos se les puede asociar llevar una simple cuenta o la acción de una tarea donde el tiempo sea un factor crítico.

El oscilador principal del micro es un reloj interno de 7,37 MHz y un PLL (Phase Lock Loop) multiplica esta frecuencia pudiendo conseguir hasta 80 MHz. Teniendo en cuenta que son necesarios dos ciclos de trabajo para ejecutar una instrucción, la frecuencia de trabajo del microcontrolador se puede definir como $F_{CY} = 39613750 \text{ Hz}$, es decir, 40 MHz [30].

Los registros para la definición y control de los timers son los siguientes:

- **TxCON**: registro de control del timer. Registro de 16 bits, de los cuales habrá que especificar:
 - **TCKPSx**: bits 4 y 5. Definen el pre-escalado del timer, es decir, unidad por la cual se divide la frecuencia, aumentando el tiempo en el que se actualiza el valor del contador.
 - '11': 1:256
 - '10': 1:64
 - '01': 1:8
 - '00': 1:1
 - **TON**: bit 15, activa ('1') o desactiva ('0') la cuenta del temporizador.
- **PRx**: registro de datos, almacena el periodo del timer, es decir, la cuenta que debe alcanzar el timer antes de resetearse y empezar una nueva cuenta. Esta cuenta dependerá del pre-escalado y del oscilador escogido. El pre-escalado se definirá más adelante y el oscilador interno tiene una frecuencia de trabajo de $F_{CY} = 40 \text{ MHz}$, como se ha definido anteriormente. El cálculo del tiempo transcurrido hasta que salta la interrupción asociada a la cuenta se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{pre-escalado}}{F_{CY}} \cdot PR$$



- **TMRx**: registro de datos, lleva la cuenta del timer.
- **IFSx**: registro de control de interrupciones, indica el fin de la cuenta de varios periféricos. Contiene el flag de terminación de los tres timers (*T1IF*, *T2IF*, *T3IF*) que se pone a ‘1’ cuando la cuenta ha finalizado y habrá que resetear para la siguiente cuenta.

3.2.4.3 PWM

El microcontrolador cuenta con dos módulos independientes de señales de ancho de banda (PWM). El ciclo de trabajo siempre define el porcentaje de la señal que está a nivel alto, sin embargo, el módulo tiene accesible la señal de PWMH y su inversa, PWML, donde la ‘H’ significa *High* y la ‘L’ significa *Low*. Por tanto, el módulo de *PWM1* tiene 6 canales, que significa, tiene 3 señales *PWMxHx* y sus tres complementarias, *PWMxLx*. Por otro lado, el módulo *PWM2* tiene solo dos canales, es decir, *PWM2H* y *PWM2L*.

Los registros asociados a este periférico son los que se detallan a continuación:

- **PTCON1**: registro de control del timer interno que gestiona el tiempo de la señal PWM. Los bits de control a definir son:
 - **PTCKPSx**: bits 2 y 3, definen el pre-escalado del timer.
 - ‘11’: 1:64
 - ‘10’: 1:16
 - ‘01’: 1:4
 - ‘00’: 1:1
 - **PTEN**: habilita (‘1’) o deshabilita (‘0’) el timer.
- **PWMCON1**: registro de control que permite definir los pines del PWM independientes de sus complementarios para poder hacer uso de los mismos de forma autónoma. De esta forma, los pines no usados como PWM pasarán a ser controlados por el puerto B de entradas y salidas digitales.
 - **PEN_L** y **PEN_H**: bits 0-2 y del 6-4, respectivamente. Habilitan el control de los pines por el módulo PWM (‘1’) o pasan a ser controlados por el puerto B como entradas y salidas digitales (‘0’).
 - **PTMOD**: bits del 8 al 10. Habilitan la independencia de los pares de pines complementarios (‘1’) o deshabilitan dicha independencia (‘0’).



- **PTPER:** registro de datos. Almacena el valor del periodo de las señales PWM a generar. Este registro es análogo al *PRx* del timer, por tanto, el cálculo del tiempo seguirá la misma ecuación. El valor de este registro está limitado por los 15 bits con los que cuenta para almacenarlo.
- **PDC:** registro de datos. Los tres bits que lo conforman almacenan el valor del ciclo de trabajo de los tres pares de señales PWM del módulo 1. Del mismo modo existirá para el módulo 2 de PWM.

3.2.4.4 ADC

El módulo de conversión de una señal analógica a digital se encarga de tomar muestras de la señal analógica y las procesa convirtiéndolas en valores digitales. Se compone de dos partes principales, por un lado, el canal o retenedor, se trata de un condensador de carga que se carga con la tensión que recibe y transcurrido el tiempo pertinente esa tensión será la que el conversor A/D convierta a valor digital. El segundo elemento principal, es el conversor A/D que comparará la tensión de entrada con dos tensiones de referencia (VREF+ y VREF-) y generará un '0', '1023' o un valor dentro de ese rango en función de si es igual a la referencia inferior, a la superior o si toma un valor entre medias.

Por último, se habrá de fijar el tiempo de muestreo del conversor. El módulo tiene una resolución de 10 bits y toma 4 bits como muestras, estas especificaciones pueden ser modificadas [31]. Se habrá de tener en cuenta el periodo de conversión y el tiempo de muestreo para definir el pre-escalado que resulte en el funcionamiento deseado del conversor. En este documento solo se incluirá la explicación del funcionamiento que se implantará, conversión con escaneo. Consiste en hacer la conversión de todos los pines analógicos al mismo tiempo. Para ello, se activa el muestreo automático y la conversión automática una vez haya terminado el muestreo de todos los pines y se activa el registro correspondiente de conversión por escaneo.

Los principales registros a configurar en el módulo ADC son los siguientes:

- **ADC1BUFx:** registro de datos de 16 bits donde se almacena el valor resultante de la conversión a digital.
- **AD1PCFGL:** registro de control asociado a los 6 pines del periférico A/D que define los pines como digitales ('1') o analógicos ('0').
- **AD1CSSL:** registro de control que activa la conversión en modo escaneo. Dicho registro está asociado a cada uno de los pines del periférico A/D, se escanearán aquellos pines en los cuales se escriba un '1'.



- **AD1CHS0:** registro de control que almacena la información de a qué entrada se conecta cada muestreador.
 - **CH0SA:** bits del 3-0, asociados con el muestreador 0. Estos bits deben ser iguales al canal de conversión.
- **IFS0:** registro de control que señala el final de la conversión
- **IEC0:** registro de control que habilita ('1') o deshabilita ('0') las interrupciones.
- **IPC3:** registro de control que establece la prioridad de las interrupciones.
- **AD1CONx:** registro de control de 16 bits que definen el funcionamiento del conversor A/D.
 - **AD1CON3:** 13 bits de control donde se configura el número de ciclos de adquisición antes de una conversión y el pre-escalado del reloj del conversor. Cada bit de resolución que se desea muestrear necesita un periodo para que se complete dicho proceso, y otros dos periodos extra para la conversión. Además, según la velocidad del conversor varía el tiempo de muestreo, para conseguir una velocidad de 500kps [30], el tiempo de muestreo será de otro periodo. Es decir, para conseguir una conversión completa harán falta 13 periodos.

$$T_{AD} = \frac{1 \text{ muestra} \cdot 1 \text{ s}}{500 \cdot 10^3 \text{ muestras}} \cdot \frac{1}{13} = 153,85 \cdot 10^{-7} \text{ s} = 153,85 \text{ ns}$$

Será necesario que el tiempo de muestreo esté por encima de 153,85 ns para que este sea suficiente para completar un proceso de conversión del módulo. Para ello habrá que fijar un pre-escalado que cumpla esta condición.

- **ADCS:** bits 7-0, pre-escalado del reloj: $T_{AD} = T_{CY} \cdot (ADCS + 1) = 25 \text{ ns} \cdot (9 + 1) = 250 \text{ ns} (> 153,85 \text{ ns})$.
- **SAMC:** bits 12-8, indica el número de ciclos de adquisición antes de la conversión, fijado a 1.
- **AD1CON2:** 11 bits de control donde se habilita el barrido de los pines activados para escaneo (**CSNA** bit 10), se fija el canal de conversión (**CHPS** bits 8-9) y se fija el número de conversiones antes de que salte la interrupción (**SMPI** bits 5-2).
- **AD1CON1:** 16 bits de control para activar el conversor (**ADON** bit 15) aunque no ponerlo en marcha, para definir la fuente que indica el comienzo de la conversión (**SSRC** bits 7-5) y para definir si la conversión es automática (**ASAM** bit 2). Los dos últimos bits son informativos e indican si todavía se está muestreando '0' o si empieza la conversión '1' en el bit 1 **SAMP** y el bit 0 **DONE** informa de la finalización de la conversión.





4. CONTROL DEL VEHÍCULO

En este capítulo se explicará en profundidad el control del sistema de propulsión y cinemática del vehículo. Empezando por la descripción de las ecuaciones de la cinemática a implementar pasando por el acondicionamiento de las señales de entrada a los controladores y, finalmente, explicando la implementación del sistema en el Software. Se describe el proceso de razonamiento que lleva a cada implementación y se da a conocer, no solo el resultado final del control, sino también los pasos previos para la construcción de todo el sistema.

4.1 *Cinemática del Vehículo*

La geometría de *Ackermann* será la empleada para describir el movimiento del vehículo en función de sus dos ruedas directrices, las delanteras. Se presentarán dos posibles configuraciones de la cinemática del vehículo, totalmente independientes entre sí.

4.1.1 Ackermann Simple

Como se ha mencionado anteriormente, las ruedas delanteras son las directrices lo que significa que tienen la libertad de girar en ambos sentidos y definirán la trayectoria del vehículo. El giro permitido será de hasta un máximo de 45° respecto a la transversal del vehículo en ambos sentidos de giro, como se muestra en la Figura 28.

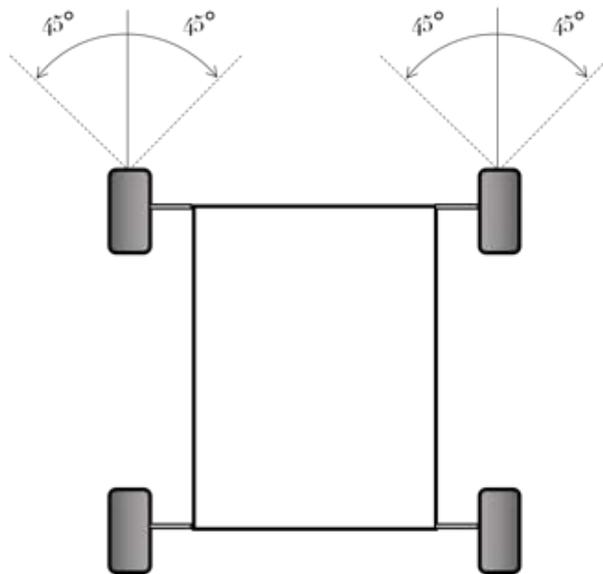




Figura 28: Giros permitidos en las ruedas directrices del vehículo

4.1.1.1 Giro en sentido horario

A continuación, se muestra una imagen de la geometría de *Ackermann* para giros en sentido horario y la definición de las ecuaciones pertinentes para la obtención de la velocidad de cada rueda en función del ángulo de giro y de la velocidad demandada al vehículo.

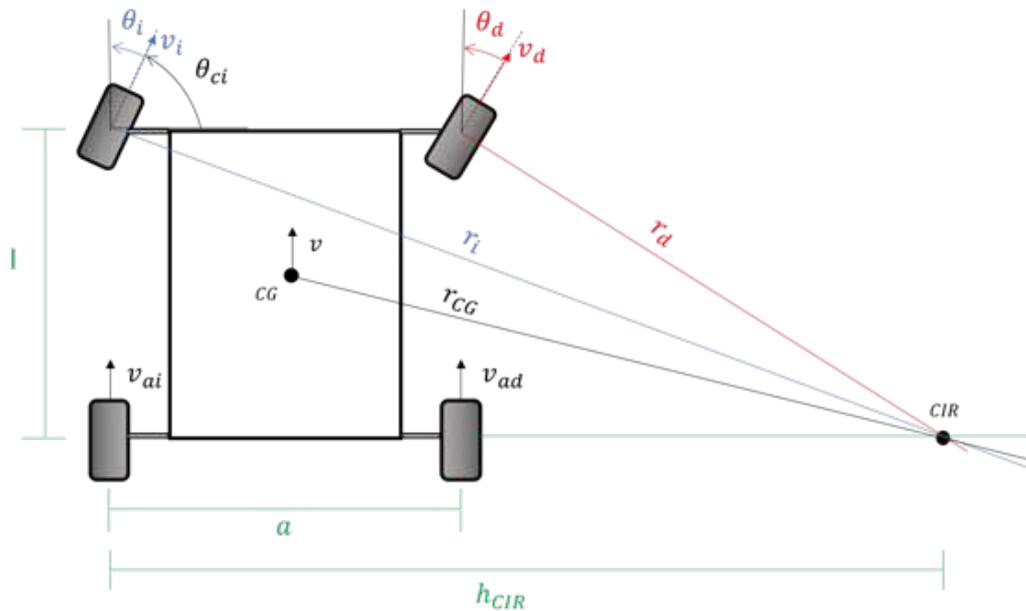


Figura 29: Cinemática de Ackermann sentido horario

Datos:

- o Vía: $a = 0,5 \text{ m}$
- 1 Batalla: $l = 0,54 \text{ m}$
- 2 Ángulo rueda delantera izquierda: θ_{ci} , valor obtenido de la lectura analógica mediante un potenciómetro instalado en dicha rueda.
- 3 Velocidad lineal del vehículo, v . Será la demandada por el potenciómetro y hace referencia a la velocidad de avance del vehículo, es decir, de su centro de gravedad.

Será necesario obtener los valores de los ángulos de ambas ruedas, el CIR y las distancias de cada rueda y del centro de gravedad al CIR para poder obtener las cuatro velocidades.



Ángulos:

Ángulo motor izquierdo θ_i :

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_{ci}$$

Ángulo motor derecho θ_d :

$$\tan(\theta_d) = \frac{l}{(h_{CIR} - a)} \quad ; \quad \tan(\theta_i) = \frac{l}{h_{CIR}}$$

De la resta de ambas expresiones se deduce:

$$\theta_d = \text{atan} \left(\frac{1}{\frac{1}{\tan(\theta_i)} - \frac{a}{l}} \right)$$

Geometría, distancias al CIR:

$$h_{CIR} = \frac{l}{\tan(\theta_i)}$$

$$r_i = \frac{l}{\text{sen}(\theta_i)}$$

$$r_d = \frac{l}{\text{sen}(\theta_d)}$$

$$r_{CG} = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(h_{CIR} - \frac{a}{2}\right)^2}$$

Cinemática:

En caso de giro, la velocidad que se mantiene igual en todos los puntos del vehículo es su velocidad de rotación. Para obtener las velocidades lineales aplicables a cada rueda para conseguir el giro deseado, se deberá calcular la velocidad proporcional a cada rueda en función de su distancia al centro de rotación, el CIR. Siendo v , el valor deseado de velocidad de avance obtenido mediante la lectura del potenciómetro, las ecuaciones son las siguientes:



Motor delantero izquierda: $v_i = v \cdot \frac{r_i}{r_{CG}}$

Motor delantero derecha: $v_d = v \cdot \frac{r_d}{r_{CG}}$

Motor trasero izquierda: $v_{ai} = v \cdot \frac{h_{CIR}}{r_{CG}}$

Motor trasero derecha: $v_{ad} = v \cdot \frac{h_{CIR}-a}{r_{CG}}$

4.1.1.2 Giro en sentido antihorario

La cinemática del vehículo bajo un giro en sentido antihorario es muy similar al caso anterior, las relaciones trigonométricas difieren levemente y el cálculo del ángulo de trabajo respecto al medido es, también, diferente. Siendo la geométrica en este caso la mostrada en la Figura 30, las ecuaciones serán las siguientes:

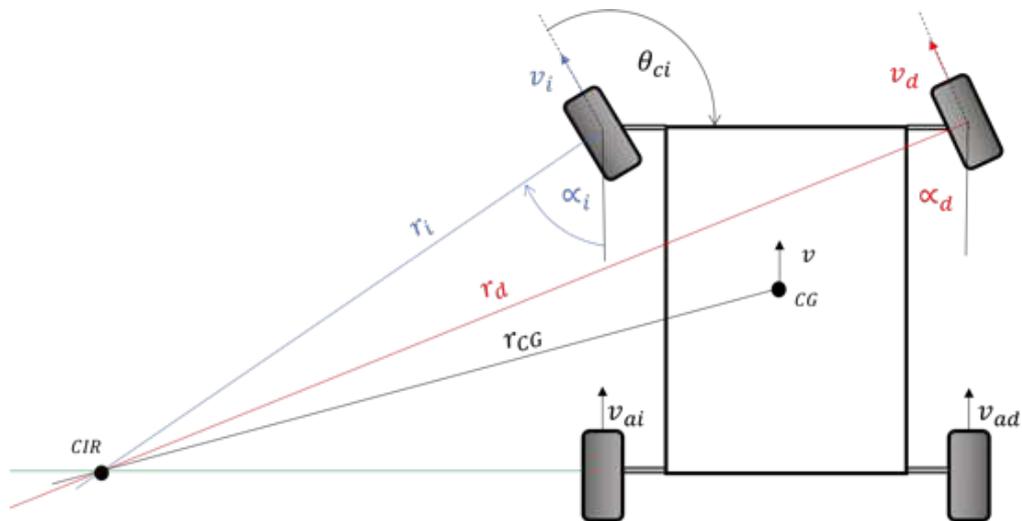


Figura 30: Cinemática de Ackermann sentido antihorario

Datos:

1. Vía: $a = 0,5 \text{ m}$
2. Batalla: $l = 0,54 \text{ m}$
3. Ángulo rueda delantera izquierda: θ_{ci} .
4. Velocidad lineal del vehículo, v .



Ángulos

Ángulo motor izquierdo α_i :

$$\alpha_i = \pi - \theta_{ci}$$

Ángulo motor derecho θ_d :

$$\tan(\alpha_i) = \frac{(h_{CIR} - a)}{l} \quad ; \quad \tan(\alpha_d) = \frac{h_{CIR}}{l}$$

De la resta de ambas expresiones se deduce:

$$\alpha_d = \text{atan}\left(\frac{a}{l} + \tan(\alpha_i)\right)$$

Geometría, distancias al CIR:

$$h_{CIR} = \tan(\alpha_d) \cdot l$$

$$r_i = \frac{l}{\cos(\alpha_i)}$$

$$r_d = \frac{l}{\cos(\alpha_d)}$$

$$r_{CG} = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(h_{CIR} - \frac{a}{2}\right)^2}$$

Cinemática:

Por último, el cálculo de las velocidades siguiendo la proporcionalidad según la distancia al centro de gravedad. Tan solo cambian las expresiones de las ruedas traseras:

Rueda delantera izquierda: $v_i = v \cdot \frac{r_i}{r_{CG}}$

Rueda delantera derecha: $v_d = v \cdot \frac{r_d}{r_{CG}}$



$$\text{Rueda trasera izquierda:} \quad v_{ai} = v \cdot \frac{h_{CIR-a}}{r_{CG}}$$

$$\text{Rueda trasera derecha:} \quad v_{ad} = v \cdot \frac{h_{CIR}}{r_{CG}}$$

4.1.2 Giro sobre sí mismo

La segunda configuración cinemática del vehículo es el giro sobre su centro de gravedad. Cada rueda formará aproximadamente 45° sobre la transversal. Los motores rueda izquierdos deberán girar con el modo Reverse habilitado para que el vehículo rote. Los cuatro motores deberán girar a la misma velocidad para el correcto funcionamiento de la configuración del vehículo y que las ruedas no deslicen. En la Figura 31, se aprecia la disposición del vehículo y sus ruedas.

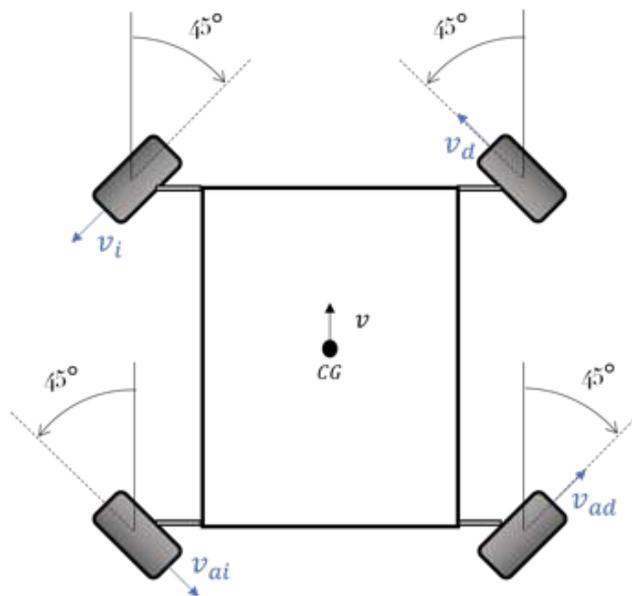


Figura 31: Configuración del vehículo en giro sobre sí mismo

En este caso, las ecuaciones para las velocidades de cada motor son tan solo igualarlas a la velocidad lineal de avance del vehículo:

$$v_i = v_d = v_{ai} = v_{ad} = v$$



4.1.3 Aplicación al código

Para implementar las fórmulas mostradas anteriormente de forma satisfactoria en el software hará falta tener en consideración varios puntos:

1. Conversión analógica digital de la medida de la velocidad y el giro tomados por sus respectivos potenciómetros.
2. Límites tanto superior como inferior de las consignas de los PWM.

En primer lugar, se ha de adecuar la lectura de los potenciómetros con el valor correspondiente en las unidades de cálculo. Las entradas analógicas tienen una resolución de 10 Bits, es decir, los valores se mueven entre 0 y 1023 y habrá que tener en cuenta el rango real al que se quiere hacer referencia tanto para la lectura de la velocidad como para la del giro.

4.1.3.1 Velocidad

Los motores tienen un recorrido, según pruebas experimentales con una consigna de aceleración de un potenciómetro y alimentado con la fuente de alimentación de los laboratorios, desde 0 rpm como velocidad mínima hasta 400 rpm como velocidad máxima aproximadamente, es decir, hasta unos 15 m/s. Por otra parte, de forma también experimental se ha comprobado que los motores comienzan a girar, tensión de arranque, cuando la señal de control alcanza 1,3V aproximadamente, hasta un máximo de 3,3V para máxima velocidad. Teniendo esto y la cinemática de Ackermann para cada motor en cuenta, se exponen las ecuaciones y las gráficas que se obtuvieron para la verificación de dichas ecuaciones en todo su rango.

Por un lado, habrá que fijar la conversión de la lectura del potenciómetro a velocidad lineal de avance del vehículo en (m/s), para el posterior cálculo de las velocidades de cada rueda. Y, por otro lado, habrá que fijar la conversión entre la velocidad de cada rueda y su correspondiente valor de ciclo de trabajo para el PWM. El esquema representativo de las conversiones a realizar es el siguiente:

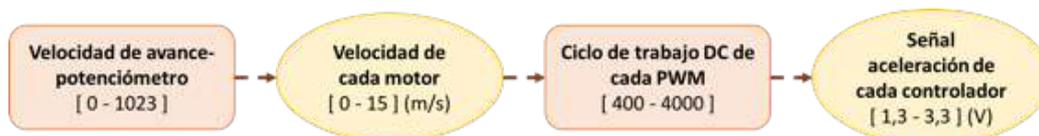


Figura 32: Esquema de las conversiones pertinentes entre la velocidad demandada por el potenciómetro y la velocidad de cada motor



De velocidad a ciclo de trabajo

La primera condición a tener en cuenta será la de la tensión de arranque de los motores ya que hará que se pierda rango de uso del potenciómetro. Hasta no llegar a un valor del potenciómetro que corresponda con una velocidad de las ruedas con tensión mayor que la de arranque, estas no girarán. Por tanto, se debe fijar un DC mínimo para 1,3V y máximo para 3,3V. Esto genera la siguiente ecuación de la recta:

$$DC = vel \cdot 400 + 4000$$

Potenciómetro a velocidad en m/s

En segundo lugar, se debe comprobar el rango del ciclo de trabajo calculado para verificar que no exceda los límites tanto superior como inferior. En caso de exceder cualquiera de los dos el código lo contempla asignando un ciclo mínimo o máximo, sin embargo, se produciría el deslizamiento de las ruedas, fenómeno que, si bien no se podrá evitar por completo, se podrá minimizar.

Una vez fijado el recorrido del ciclo de trabajo en función de la velocidad de cada motor se puede representar el rango del ciclo de trabajo en función de la velocidad de avance del vehículo demandada por el potenciómetro y del giro. Como se ha dicho, el rango de velocidades es de 0m/s a 15m/s para lecturas de potenciómetro de 0 a 1023, lo que se traduce en una pendiente de la recta de,

$$m = \frac{15}{1023} = 0,14$$

Habría que analizar los valores del ciclo de trabajo según si el giro es horario o antihorario. Los peores escenarios, es decir, aquellos en los que más se exceden los ciclos de trabajo de los límites, se producen cuando los ángulos se acercan a sus respectivos máximo, es decir, 45° en cada sentido de giro. Habrá, por tanto, que encontrar un punto óptimo de reducción de la pendiente en el cual la mayoría del recorrido de todas las señales PWM se encuentran dentro de los límites y no se reduce demasiado la velocidad máxima de avance del vehículo. Tras iterar para encontrar un buen balance de este compromiso, se implanta la nueva pendiente de la recta,

$$m = 0,10$$

Lo que implica que la nueva velocidad máxima de avance del vehículo son 10 m/s aproximadamente, pero que prácticamente todo el rango de las señales PWM queda dentro de los límites como se puede ver en la Figura 33 y la Figura 34.

En ambas imágenes se representan los rangos para las dos pendientes de la recta mencionadas. Para una fácil comparación los ciclos de trabajo del mismo motor están representados con el mismo color, siendo la recta con marcadores de puntos y menos



intensidad en su color la correspondiente a la pendiente no implementada por exceder más límites. En orden de numeración de los ciclos de trabajo estos pertenecen a la rueda delantera izquierda, delantera derecha, trasera izquierda y trasera derecha.

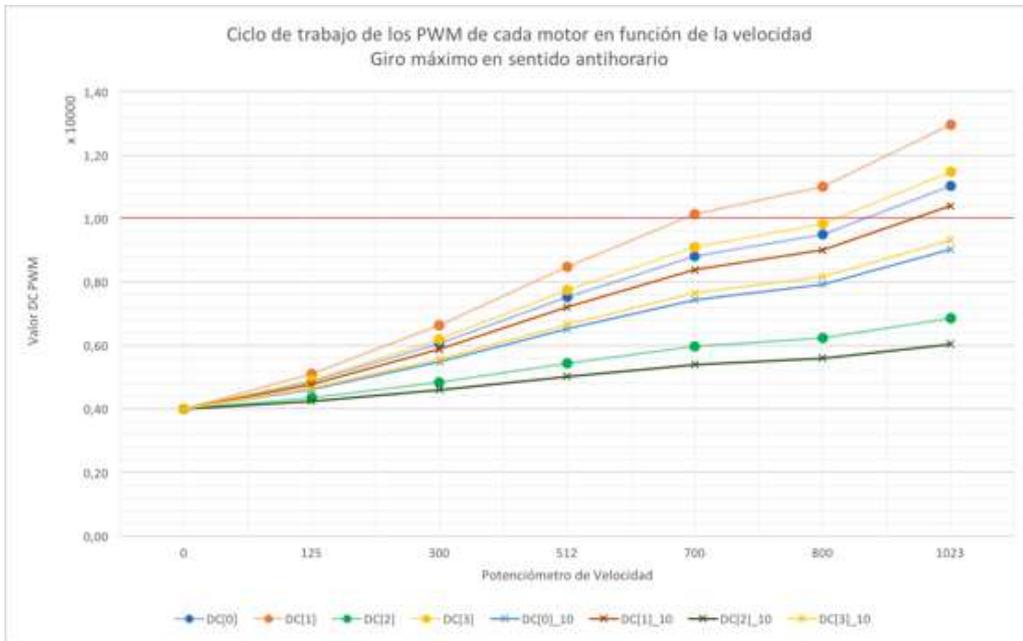


Figura 33:Rango de los ciclos de trabajo de las señales PWM en función de la velocidad de avance y para un giro de 45° en sentido antihorario



Figura 34: Rango de los ciclos de trabajo de las señales PWM en función de la velocidad de avance y para un giro de 45° en sentido horario



4.1.3.2 Giro

El potenciómetro de giro está colocado en la rueda izquierda delantera de tal forma que cuando la rueda esté en su posición natural, de avance en línea recta del vehículo, el potenciómetro está en la mitad de su recorrido que corresponderá con 90° . Si la rueda estuviese en perpendicular a su eje hacia la derecha, el potenciómetro estaría a cero y, si estuviese en perpendicular en el otro sentido, el potenciómetro estaría en su máximo recorrido, 1023 . Sin embargo, las ruedas podrán girar un máximo de 45° en cada sentido de giro por lo que el rango del potenciómetro, de 0 a 1023 , estará asociado con ángulos desde 45° a -45° , tal y como muestra la Figura 35. La ecuación de conversión de la medida del potenciómetro a ángulo, teniendo en cuenta la definición de los ángulos descritos en el apartado de la cinemática de *Ackermann*, es:

$$(\text{°}) = 0,08789 * (\text{potenciómetro}) + 45^\circ$$

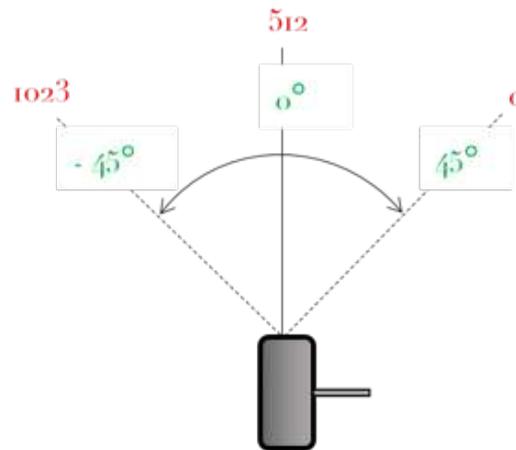


Figura 35: Relación del giro de los motores con la lectura del potenciómetro de giro

Para analizar los límites de giro habrá que distinguir entre dos situaciones, giro horario y giro antihorario.

Giro horario

El giro horario comprende de $[0 - 45]^\circ$ o, lo que es lo mismo, $[0 - 512]$ en la lectura del potenciómetro. Estando el centro de giro situado a la derecha del vehículo, como se puede observar en la Figura 29, el ángulo de la rueda derecha será siempre ligeramente superior al ángulo de la rueda izquierda. Esto quiere decir que, llegado a cierto ángulo de la rueda izquierda, el ángulo asociado a la derecha es mayor de 90° . Esto implicará que las ecuaciones de *Ackermann* den lugar a velocidades negativas. Atendiendo a dichas ecuaciones, $\theta_d = 90^\circ$ cuando $\theta_i = 63,27^\circ$, por tanto, esta situación nunca va a



llegar a ocurrir puesto que el giro máximo permitido físicamente por el vehículo son 45° .

Giro antihorario

En el caso de sentido de **giro antihorario**, mostrado en la Figura 3o, sí se incurre en el valor del ángulo problemático. La tangente de un ángulo de 90° es infinito, la forma de evitar un error será asegurar que el programa entra en el cálculo de esta casuística siempre que el potenciómetro marque estar estrictamente por encima de 512, asegurando así que la ecuación tendrá una solución válida. Además, la diferencia entre el ángulo de la rueda derecha e izquierda será ínfima para los ángulos muy cercanos a 90° e irá creciendo a medida que aumente el ángulo de giro.



4.2 Pruebas Previas

La electrónica de control del vehículo se llevó a cabo en varias fases de prueba para, más adelante, integrar todo lo programado con una mayor probabilidad de éxito. Dichas pruebas, principalmente, servirán para comprender el funcionamiento de la señal de control de velocidad del controlador y para comprobar y asegurar la veracidad y funcionalidad de las ecuaciones de la cinemática de *Ackermann* para cada uno de los cuatro motores.

4.2.1 Pruebas iniciales

En primer lugar, se quiso comprobar el correcto funcionamiento de cada motor por separado con únicamente la alimentación, los sensores de Efecto Hall y una consigna de aceleración. Para ello hará falta comprobar que excluir o sustituir el resto de elementos con los que se entregan los controladores, no compromete el funcionamiento de los motores. Tras varias pruebas quedó demostrado que, sin la conexión del display, aun existiendo una consigna no nula de aceleración, el motor no recibe la alimentación. Por tanto, se puentea el cable de alimentación del display con la alimentación de 5V y se comprueba que, de esta manera, los motores responden sin problema. Puesto que el freno no tiene por qué estar conectado para el funcionamiento de los motores, se puede optar sin problema por la recta de frenado definida en el apartado anterior. Por último, se comprueba el giro de las cuatro ruedas, se les da el sentido de giro apropiado con la señal de *Self-Learning* y se comprueba el uso de la señal *Reverse* para cambiar el sentido de giro, lo que a futuro permitirá que el vehículo retroceda.

Se comprueba el uso y funcionamiento de las señales de Reverse y Aceleración de los controladores sobre los motores:

- *Aceleración*, consigna de velocidad de los controladores. Puede ser gestionada por un potenciómetro simple, es decir, el controlador debe recibir una señal analógica de 0V a 3,3V. Esto significa que más adelante será necesario convertir la señal digital PWM del microcontrolador en una señal analógica.
- *Reverse*, señal que invierte el sentido de giro del motor. Se comprueba que dicha señal invierte el sentido de giro cuando se pone a '0' y que si cambia de valor mientras los motores están en funcionamiento estos se bloquean para protegerlos. Para desbloquearlos habrá que frenar, o poner una consigna nula de velocidad, y volver a arrancar los motores.



Estas pruebas se realizaron sobre los cuatro motores y los cuatro controladores resultando todas satisfactorias.

4.2.2 dsPIC33FJ32MC

El control del vehículo se aplica directamente sobre sus cuatro ruedas motor y la batería que gestiona la energía del mismo. Sin embargo, se cree más conveniente empezar las pruebas y simular el funcionamiento de los motores con cuatro LEDs y dos potenciómetros (velocidad y giro) y evitar así, posibles fallos sobre los motores y complicaciones con el montaje.

El objetivo de estas pruebas es el de programar de forma satisfactoria la cinemática de *Ackermann* atendiendo al ángulo de giro y la velocidad demandada al vehículo. Gracias a que se pudieron monitorizar mediante el uso de LEDs y un osciloscopio se pudieron ir corrigiendo durante las pruebas. Además de tener en cuenta las posibilidades de carga y descarga de la batería que condicionan el movimiento del vehículo.

4.2.2.1 Descripción del funcionamiento

Cinemática del vehículo

Cada una de las cuatro ruedas del vehículo están simbolizadas con LEDs y su intensidad representará la velocidad de cada rueda. Esta intensidad dependerá de la consigna de giro y velocidad de cada momento, en ambos casos proporcionado por un potenciómetro para cada medida por separado.

El giro se compone de dos situaciones, entre 0° y 90° , giros en sentido anti horario y, entre 90° y 180° , giros en sentido horario. Asumiendo que en el vehículo el potenciómetro de medida de giro estará situado en la rueda delantera izquierda. Así mismo, el potenciómetro de velocidad también proporciona dos casos. Por un lado, tensiones de $0V$ a $4,8V$ hacen referencia al caso habitual de cinemática simple de *Ackermann*, siendo esta la consigna de velocidad lineal de avance del centro de gravedad del vehículo. En el caso de que la consigna de velocidad supere los $4,8V$ se hará referencia al caso de Giro sobre sí mismo. En esta casuística las ruedas estarán orientadas como se muestra en la Figura 31, todas con un ángulo de casi 45° y todos los motores tendrán la misma velocidad, en este caso fijada a la aceleración media. Además, las ruedas izquierdas tendrán su sentido de giro invertido respecto a las ruedas derechas para que el vehículo rote sobre sí mismo. Un LED lucirá, simbolizando que las ruedas izquierdas del vehículo girarían en sentido contrario.



Un pulsador dará la opción de hacer retroceder el vehículo activando las señales de *Reverse*, lo que se simulará con la iluminación de dos LEDs, ruedas derechas y ruedas izquierdas, respectivamente, para comprobar que se realiza la acción.

Por último, otro pulsador indicará el freno del vehículo, mientras esté pulsado, se desactivarán las señales de PWM y los LEDs, dejarán de lucir.

Los estados de carga y descarga de la batería se simularán con pulsadores y LEDs, respectivamente.

Carga

De la batería, como se ha explicado anteriormente, puede proceder de un par mecánico del motor externo, del extensor de autonomía o del enchufe. En el código de prueba se han tenido en cuenta el extensor de autonomía y la toma de fuerza externa. En ambos casos un LED se enciende mientras el pulsador esté en nivel alto para señalar que se está produciendo dicha carga. Mientras la carga provenga del extensor de autonomía la cinemática puede seguir funcionando, sin embargo, si la carga proviene del par mecánico, aunque haya consigna de velocidad, el programa no permite la cinemática del vehículo.

Descarga

Del vehículo, se produce o bien mediante el propio movimiento del vehículo, el cual ya ha sido explicado, o mediante la entrega de un par mecánico al exterior. En este caso se permitió el movimiento del vehículo al mismo tiempo por lo que consigna de descarga del par mecánico no invalida la consigna de velocidad. La descarga se simula con la entrada de un pulsador y se señala mediante el parpadeo del mismo LED que, luciendo de forma continua, simboliza la carga desde este mismo elemento.

En la Figura 36 se muestra una imagen de la placa del microcontrolador con todos los elementos mencionado soldados y cableados durante las pruebas iniciales de control del vehículo.

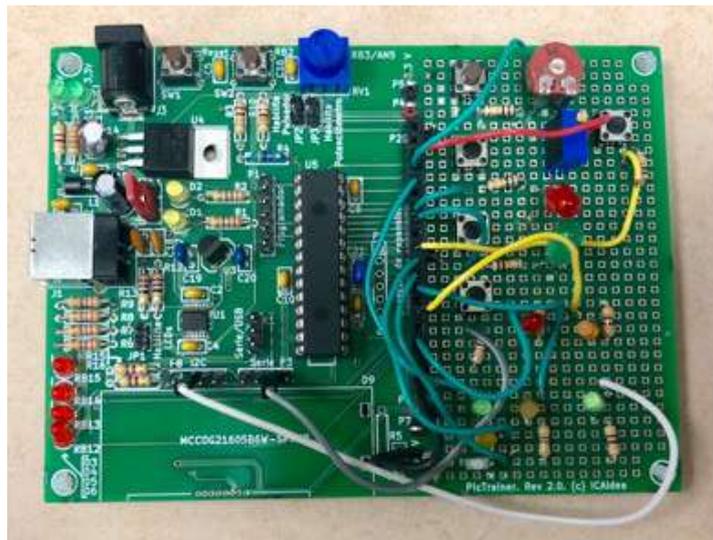


Figura 36: Placa PicTrainer con el microcontrolador dsPIC33FJ32MC instalado junto con los componentes soldados para las pruebas iniciales

4.2.2.2 Arquitectura del código fuente

El código consta de un Main y dos funciones adicionales, Vehiculo.c y MotorControl.c.

Main

Contiene la lectura de las entradas analógicas, potenciómetro de giro y velocidad, y las entradas digitales, Carga_PM, Descarga_PM, EA, Freno y Reverse. En primer lugar, se comprueba qué tipo de carga o descarga se está produciendo para, en caso de producirse alguna, iluminar el LED correspondiente.

```

if(Carga_PM | EA){
    PORTB |= (1<<2); //nivel alto RB0 LED
}else if(Descarga_PM){
    Ini_Timer1();
} // apagado
else{PORTB &= ~(1<<2);
    IEC0bits.T1IE=0; //deshabilito interrupciones
    T1CONbits.TON=0; //Apago el timer
}

```

En caso de existir consigna de velocidad, y siempre que el movimiento del vehículo esté permitido, se activan las señales de PWM y se llama a la función motorControl.c para el cálculo de la cinemática de *Ackermann* y de las consignas de velocidad



correspondientes a cada una de las cuatro ruedas. Por último, se definen dos funciones, *Ini_Timer1* y *T1Interrupt*. Donde se inicializa el *timer* del oscilador y se habilitan las interrupciones para cambiar de estado el LED asociado a la descarga de la batería por entrega de un par de fuerza al exterior. El movimiento del vehículo no está permitido cuando el motor de la toma de fuerza está cargando o descargando la batería o cuando la señal de Freno está activa.

```

Reverse=PORTB & 0x20; // RB5
Velocidad = leerADCPolling(5); // de 0V a 5V En el final:(0) AN0
    if(Velocidad>0 ){

//Arrancar= bandera a 0 y pase a 1 la primera vez que haya velocidad
para que solo active una vez el PWM, esta se vuelve cero cuando
entre en freno=1.
    Freno = PORTA & 0x01;//RA0
    if(Freno || Carga_PM || Descarga_PM){
        PORTB &= 0x00FF;
        desactivarPWM(PWM1);
        desactivarPWM(PWM2);
        desactivarPWM(PWM3);
        desactivarPWM2 (PWM4);
        rev=1;
        Arrancar=1;
    }else if(Arrancar && Velocidad!=0){
        //Encendido del módulo y pre-escalado
        activarPWM(PWM1);
        activarPWM(PWM2);
        activarPWM(PWM3);
        activarPWM2 (PWM4);
        setDcPWM (PWM1, Velocidad);
        setDcPWM (PWM2, Velocidad);
        setDcPWM (PWM3, Velocidad);
        setDcPWM2 (PWM4, Velocidad);
        Arrancar=0;
    }
    Giro=leerADCPolling(1); //AN1
    motorControl (Velocidad, Giro);
//    setDcPWM(PWM1,10000);
//    setDcPWM(PWM2,5000);
//    setDcPWM(PWM3,10000);
//    setDcPWM2 (PWM4,5000);
    }
}
return 0;
}

```



MotorControl.c

Recibe los valores de velocidad y giro que se recogen en el Main y define un vector DC [4] para almacenar las consignas de las cuatro señales PWM que se definirán en esta misma función. Desde aquí se llama a la función cinemática, la cual recibe un puntero del vector de tamaño cuatro, la velocidad y el giro. Estas dos últimas variables permiten el cálculo de las velocidades correspondientes a cada uno de los cuatro motores que se almacenarán en sus respectivas posiciones de memoria donde apunta el vector. Por último, se ejecuta la función setDcPWM, la cual define el ciclo de trabajo de cada señal con las consignas almacenadas en el vector DC [4].

```
void motorControl(int Vel, int G){
    //Consignas de los PWM para los controladores de cada motor
    int DC[4];
    int velocidad=Vel;
    int giro=G;

    cinematica(velocidad,giro,DC); //calcular el nivel DC de cada
    rueda por puntero

    //Generar la señal PWM con el DC determinado y enviarlo por
    el pin correspondiente
    setDcPWM(PWM1,DC[0]);
    setDcPWM(PWM2,DC[1]);
    setDcPWM(PWM3,DC[2]);
    setDcPWM2(PWM4,DC[3]);
}
```

Vehículo.c

Función en la cual se calcula la consigna del PWM correspondiente a cada rueda dependiendo del giro y la velocidad solicitada. Esta función trabaja con bucles condicionales en función de la velocidad en primer lugar y luego del giro:

- **Velocidad > 4,8V:** En caso de cumplirse esta condición, se asigna a las cuatro ruedas la misma velocidad, fijada a el 50% del ciclo de trabajo, y se da la orden de marcha atrás de las ruedas izquierdas del vehículo para que gire sobre sí mismo.



```

else{ // Vel > 983 (4,8V) rotar a 45 grados con la misma velocidad
en las cuatro ruedas
    v[0] =maxav; //delantera izq
    v[1] =maxav; //delantera derch
    v[2]=maxav; //trasera izq
    v[3]=maxav; //trasera derch
    //giro sobre sí mismo
    PORTB &=~ (1<<6); // Ruedas izquierda

```

- **0V < Velocidad < 4,8V:** Se asignará una velocidad a cada motor atendiendo a la cinemática de *Ackermann*, explicada en el capítulo anterior. Según el valor del giro medido se distinguirán dos casos con ecuaciones ligeramente diferentes:

- $0^\circ < \vartheta < 90^\circ$: giro a la derecha, sentido horario. La condición del bucle, sin embargo, será para una lectura algo inferior a 90° ya que, como se ha visto, el ángulo de la rueda derecha siempre será algo mayor que el ángulo de la rueda izquierda. Atendiendo a las ecuaciones, un ángulo de 90° de la rueda derecha supone un ángulo de $63,27^\circ$ de la rueda izquierda, este será, por tanto, la condición del bucle. Como se ha dicho anteriormente, las ruedas no podrán girar físicamente más de 45° por lo que acortar el rango de giro no afectará a la implementación final.

```

if(Vel < 983){
    if(giro>0 && giro<= 360/*giro<512*/ ){ //ángulo menor de
90 grados, GIRO DERECHA, 360 en tetai hace que tetad sean 90, a
partir de aqui el sen se vuelve negativo
    tetai=PI/2-(giro*0.08789+45)*PI/180;
    //tetai =giro*PI/1024;//rad
    tani=tanf(fabs(tetai));//rad
    tetad =atanf((1/((1/tani)-(a/l))));
    //posiciones
    hcir =l/tanf(tetai);
    ri =l/sinf(tetai);
    rd =l/sinf(tetad);
    rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));
    //velocidades en m/s
    v[0] =((ri/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //delantera izq
    v[1] =((rd/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //delantera derch
    v[2] =((hcir/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //trasera izq
    v[3] =(((hcir-a)/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //trasera derch

```



- $90^\circ < \vartheta < 180^\circ$: giro a la izquierda. Del mismo modo se ven afectadas las ecuaciones para el giro en sentido antihorario. Sin embargo, la diferencia de ángulo entre las ruedas delanteras es tan ínfimo para ángulos muy próximos a 90° , que sería válido tomar ambos como idénticos. De tal forma que, el giro a la izquierda estará condicionado por un valor de ángulo mayor de 90° según la lectura del potenciómetro, siendo las ecuaciones válidas en todo su rango.

```

}else if(giro> 512){ // ángulo mayor de 90 grados, GIRO IZQUIERDA
    alfai=PI-(giro*0.08789+45)*PI/180;
    tani=tanf(fabs(alfai));//rad
    alfad =atanf((tani)+(a/l));
    tand=tanf(fabs(alfad));
    //posiciones
    hcir =l*tanf(alfad);
    ri =l/cosf(alfai);
    rd =l/cosf(alfad);
    rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));
    //velocidades en m/s
    v[0] =((ri/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //delantera izq
    v[1] =((rd/rcg)*V*331.56) - 4999.6; //delantera derch
    v[2] =(((hcir-a)/rcg)*V*331.56) - 4999.6;//trasera izq
    v[3] =((hcir/rcg)*V*331.56) - 4999.6;//trasera derch

```

- **Límites de velocidad:** por último, antes de asignar el ciclo de trabajo definitivo a cada señal PWM se comprueba si la consigna de velocidad es nula o si las velocidades calculadas exceden el máximo o no llegan al mínimo ciclo de trabajo, en cuyos casos se agina cero, velocidad máxima o velocidad mínima, respectivamente, a los ciclos de trabajo de las señales PWM.

```

for(p=0;p<4;p++){
    //for(p=0;p<2;p++){

    if(v[p]>maxvel){
        v[p] =maxvel;
        DC[p]=v[p];
    }
    else if(v[p]<0){
        v[p] =minvel;
        DC[p]=v[p];
    }else if(v[p]==0){
        DC[p]=0;
    }else{
        DC[p] =v[p]*pwm;
    }
}

```



Gracias a estas pruebas iniciales sobre los LEDs se pudieron encontrar los errores y mejoras necesarias en la implementación de la cinemática de *Ackermann* en el código, y se encontraron los rangos de validez según el giro. Cuando las señales PWM fueron satisfactorias se comenzaron las pruebas para aplicar dichas señales sobre los controladores. De esta forma se evidenció la necesidad de convertir la señal PWM de digital a analógica y de amplificarla, dando lugar al acondicionamiento de señales que se va a detallar en el siguiente apartado.



4.3 Hardware

Para el correcto funcionamiento de los distintos dispositivos se han de acondicionar las señales de control. Estas son, las entradas de carga / descarga de la batería, Extensor de Autonomía y Motor de toma de fuerza, y la salida de las señales PWM de control de velocidad de los motores.

4.3.1 Conversión de señal PWM digital a analógica (D/A)

En las pruebas iniciales de funcionamiento de los motores se comprobó que el acelerador de mano genera una señal analógica entre $0V$ y $3,3V$. Esta señal es la que define la velocidad de giro del motor, por tanto, una señal analógica tendrá que ser generada a partir de las ecuaciones de cinemática definidas en el código del microcontrolador.

Las señales generadas por el micro son señales digitales moduladas por su ancho de pulso, es decir, señales PWM (*Pulse Width Modulation*), las cuales se definen por un periodo y un ciclo de trabajo, porcentaje de ese periodo durante el cual la señal está a nivel alto. En este caso concreto esta es una señal digital cuadrada con valores de $0V$ y $3,3V$ con un valor medio (*offset*) distinto de cero, el cual variará proporcionalmente con el ciclo de trabajo definido.

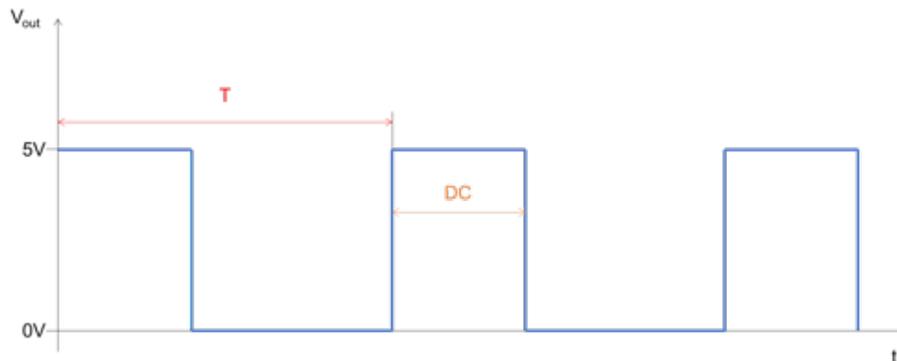


Figura 37: Señal PWM

El paso de esta señal digital a una analógica se consigue con un filtro paso bajo, Figura 39, que elimine las frecuencias altas y retenga únicamente las señales con frecuencias próximas a cero, es decir, la componente continua de la señal de entrada. En la Figura 38 se observa la señal PWM descompuesta en su componente continua y en la señal



cuadrada de periodo T y ciclo de trabajo DC, siendo la componente DC la que se pretende conservar a la salida del filtro, eliminando, aunque no por completo, la componente con frecuencia $1/T$.

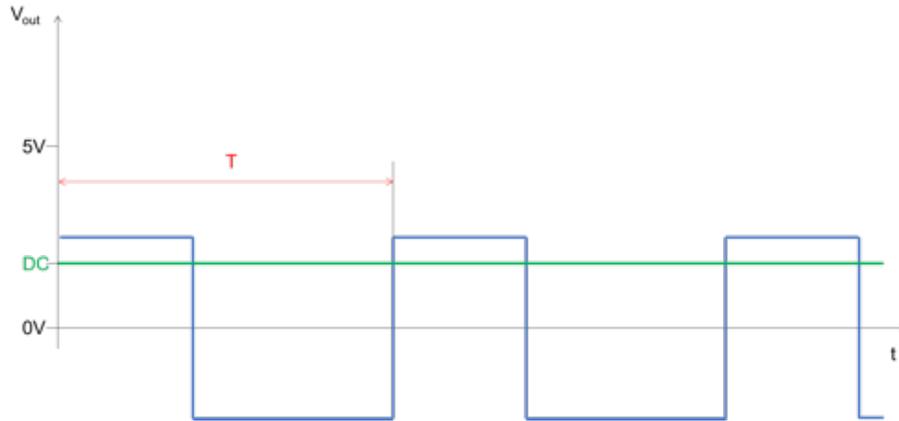


Figura 38: Descomposición de la señal PWM en su componente continua y una señal cuadrada de periodo T

Para el diseño del filtro se han de tener en cuenta la frecuencia de la señal de entrada y la frecuencia de corte a la que se quiere filtrar dicha señal. Sabiendo que, cuánto menor la frecuencia de corte mejor filtrará las frecuencias altas y menor rizado aparecerá en la señal filtrada. Por el contrario, la reacción a cambios en la componente continua de la señal será más lenta.

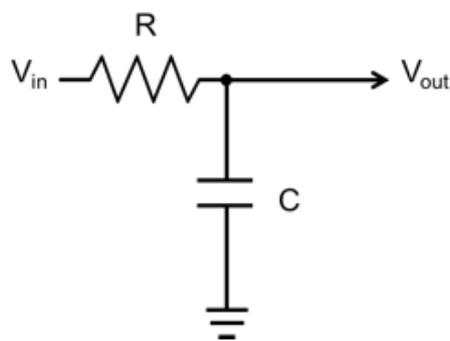


Figura 39: Filtro paso bajo de primer orden

El PWM generado por el microcontrolador tiene definida una frecuencia de 10 kHz de tal forma que, una frecuencia de corte adecuada sería 100 veces menor que dicha



frecuencia. Por tanto, para una frecuencia de corte de 100 Hz y un condensador de $1\mu\text{F}$, el valor de la resistencia del filtro deberá ser:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = 100\text{ Hz}$$

$$R = 22\text{ k}\Omega$$

4.3.2 Etapa amplificadora

De forma experimental, se comprobó la necesidad de amplificar la señal de control de velocidad. Al conectar al controlador la señal de salida del filtro anteriormente diseñado, la tensión, equivalente a la velocidad demandada, sufre una caída tal que no alcanza $1,3\text{V}$ para ningún valor del potenciómetro, lo que implica que los motores nunca llegan a ponerse en funcionamiento. Esto se debe a que el controlador pide una intensidad que el microcontrolador no es capaz de entregar. Ante esta situación se decide añadir una etapa amplificadora con un operacional cuya salida genera una señal con corriente de 30 mA , según las especificaciones de la hoja de características [31]. Por otra parte, la amplitud de la señal, tras el filtro, es la necesaria para la entrada del controlador, no necesita ser amplificada, por tanto, el amplificador debe diseñarse para que tenga ganancia unitaria.

El operacional amplificador implantado es el *TLC272* de *Texas Instrument* [31]. En la Figura 40 se puede ver la arquitectura del operacional con la distribución de sus pines y el conexionado correspondiente para que la ganancia sea la unidad. Al existir dos amplificadores en cada chip, solo serán necesarios dos chips para la implementación de las cuatro señales de control de cada uno de los cuatro motores. La Figura 41 muestra el diseño del circuito para que la ganancia sea unitaria y la conexión con el filtro para que la señal de entrada sea la analógica.

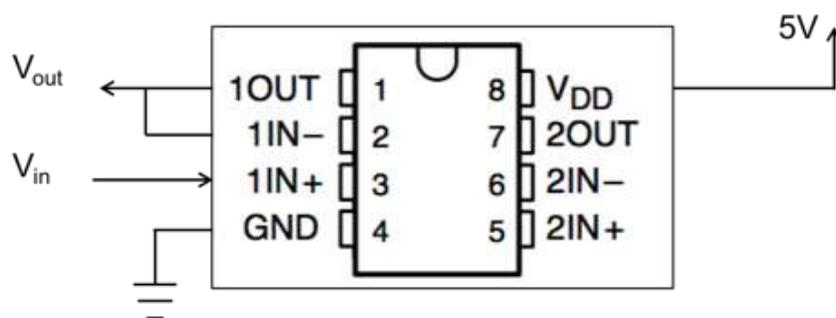


Figura 40: Operacional amplificador *TLC272* conexionado para ganancia unitaria con filtro paso bajo

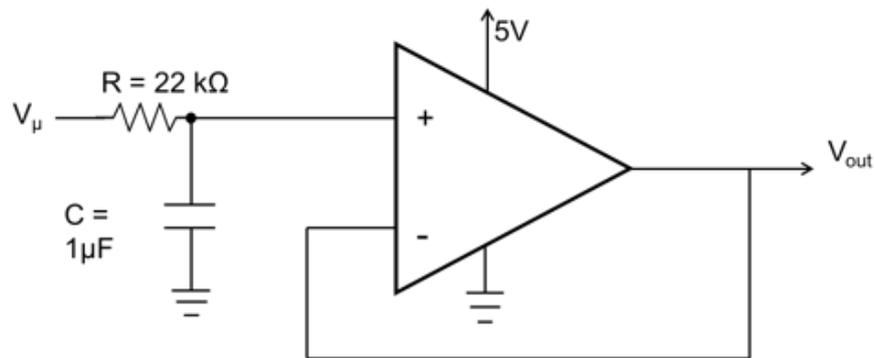


Figura 41: Conexión del circuito amplificador de ganancia unidad con el filtro paso bajo

Finalmente, la señal PWM generada por el microcontrolador, convertida en señal analógica tras el paso por un filtro paso bajo de primer orden y amplificada mediante el operacional cuya señal de salida tiene una corriente de 30 mA , se usa como entrada de control de velocidad al controlador de cada uno de los motores.

4.3.3 Señal de control de la velocidad de los motores

La Figura 42 muestra la señal PWM generada por el microcontrolador y la señal analógica correspondiente tras su paso tanto por el filtro como por el amplificador. En la imagen de la izquierda se aprecia un PWM con un bajo nivel de ciclo de trabajo cuyo nivel medio son $1,15\text{ V}$ mientras que la señal analógica, que será el control de velocidad, muestra un nivel de 975 mV , lo que significa que la señal tiene una atenuación del $15,21\%$. Por otro lado, la imagen de la derecha muestra una señal PWM con un nivel de ciclo de trabajo medio-alto cuyo valor medio son $2,07\text{ V}$ mientras la señal analógica muestra un valor medio de $1,89\text{ V}$, es decir, una atenuación de tan solo $8,69\%$.

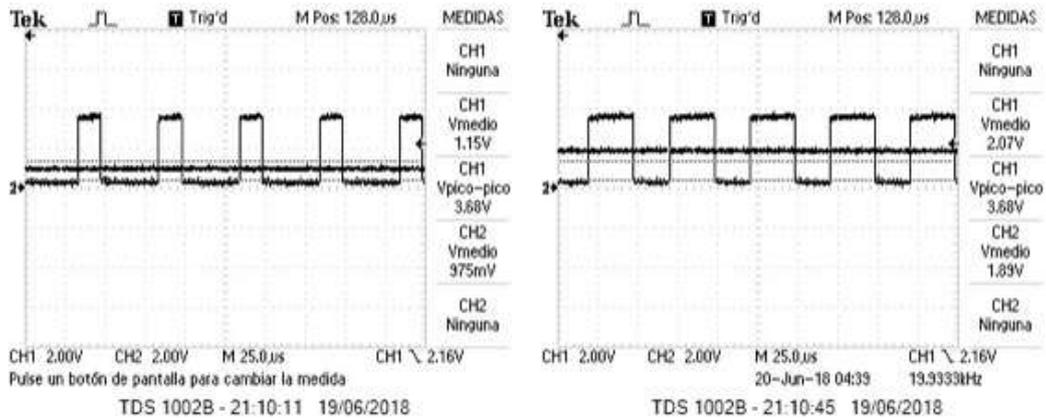


Figura 42: Señal filtrada y optimizada para un nivel bajo de ciclo de trabajo y un nivel medio-alto de ciclo de trabajo

4.3.4 Estado de carga/descarga de la batería

Como se ha mencionado anteriormente, para llevar a cabo un completo control sobre el vehículo es necesario conocer el modo, en tiempo real, de carga y descarga de la batería. El único modo de descarga sobre el que no hace falta un control aparte es cuando el vehículo está en movimiento, para las restantes casuísticas hará falta medir y controlar las respectivas entradas de tensión al micro.

- Estados de carga de la batería:
 - **Cargador:** señal continua de 12V.
 - **Par de fuerza externo:** señal analógica de [0-36]V
 - **Extensor de Autonomía:** señal PWM entre [0-36]V.
- Estados de descarga de la batería:
 - **Cinemática:** alimentación de los cuatro motores.
 - **Par de fuerza externo:** señal digital '0', '1'.

En cualquiera de los casos de estudio no se necesita saber qué tensión hay entre la fuente y la batería o entre la batería y la carga, tan solo se necesita detectar la presencia de caída de tensión que definirá el estado de carga/descarga de la batería.



4.3.4.1 Cargador de la batería

El cargador de la batería entrega 2A a 12V, por tanto, solo será necesario un divisor de tensión que asegure que como máximo el pin del micro esté a 3,3V. La única condición sería la de definir un pin analógico para la lectura de esta entrada. En caso de que no quedasen entradas analógicas disponibles se deberá añadir un comparador para convertir la señal en digital y poder usar un pin I/O. El diseño del comparador se explica más adelante.

El diseño del divisor de tensión para cumplir con las especificaciones será el siguiente:

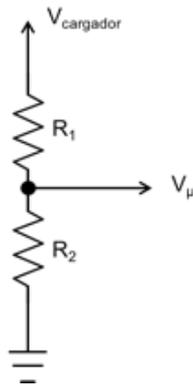


Figura 43: Divisor de tensión para el cargador de la batería

Donde,

$$\frac{R_1}{R_2} = 2,63$$

Por tanto,

$$R_1 \geq 2,63 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

4.3.4.2 Par de Fuerza Externo

El par de fuerza proviene de un motor eléctrico con un eje mecánico a la salida. Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, se podrá entregar un par mediante el control del motor o se producirá una caída de tensión en bornes del motor si se hace girar el eje desde el exterior.

- Para entregar el par al exterior un microcontrolador debe generar una señal PWM que controle la velocidad del motor, el control de dicho motor es parte del Proyecto de Fin de Grado asociado con el presente proyecto [20]. Para su funcionamiento, se genera una señal PWM de [0-36]V para el giro en un sentido y una señal de [-36-0]V para el giro en sentido contrario. El giro y arranque de este motor se controla desde la señal de un pulsador, por simplicidad, es esta



señal digital del pulsador la que se tomará como entrada para saber si se está entregando un par mecánico al exterior.

- Por otra parte, si se está haciendo girar el eje del motor desde el exterior, se generará una caída de tensión en bornes del motor, es decir, una señal analógica de $[0-36]V$. Como se quiere usar un único pin que indique si el motor está o no funcionando, en cualquiera de los dos modos, se deberá transformar esta señal analógica a digital mediante un comparador con histéresis y sumar ambas entradas. En ningún caso se podrá recibir un uno del pulsador y leer caída de tensión en ese sentido al mismo tiempo. Finalmente, el pin del micro valdrá '1' cuando el motor esté en funcionamiento y leerá '0' si este está parado.

Comparador con histéresis

Los comparadores entregan una salida igual a su alimentación negativa o positiva, en función de si la tensión de entrada está por encima o no de la tensión de referencia. Los comparadores con histéresis permiten una transición entre un estado y otro más estable gracias a unos márgenes entre los que se consideraría nivel alto y nivel bajo. Los comparadores elegidos para la implementación son los *LM311* de *Texas Instrument* [32].

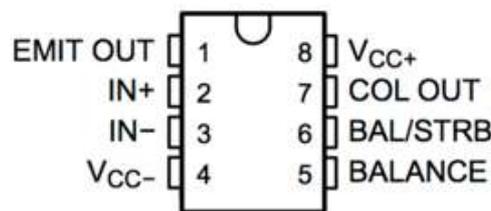


Figura 44: Configuración de pines del LM311-MIL

La Figura 44 muestra la configuración de pines accesibles del comparador diferencial *LM311*. La descripción de cada pin es la siguiente:

- *EMIT OUT*: Salida accesible del emisor del comparador.
- *IN+*: Entrada directa del comparador.
- *IN-*: Entrada inversora del comparador.
- *Vcc-*: Tensión de alimentación negativa del comparador.
- *Vcc+*: Tensión de alimentación positiva del comparador.
- *COL OUT*: Salida accesible del colector del comparador.
- *BAL/STRB*: Señal de salida Strobe del comparador.
- *BALANCE*: Señal de salida Balance del comparador.



Las señales V_{in+} e V_{in-} serán las que se comparen, siendo la primera la señal variable y la segunda la de referencia. V_{cc+} y V_{cc-} serán las salidas del comparador dependiendo del resultado de la comparación entre las señales anteriores.

La alimentación de estos comparadores se realizará a $5V$, se parte de este dato para el diseño del resto de componentes del circuito. Según especificaciones de la hoja de características [32], el valor máximo de la señal de entrada debe ser de $V_{cc} \pm 1,5V$, por lo que la tensión de entrada debe ser como máximo de $3,5V$. Puesto que la entrada variable será mucho mayor que dicho valor, un divisor de tensión se usará para que a $36V$ el comparador reciba $3,5V$, asegurando así el cumplimiento de la condición en todo el rango de trabajo. El circuito a implementar y diseñar se muestra en la Figura 45.

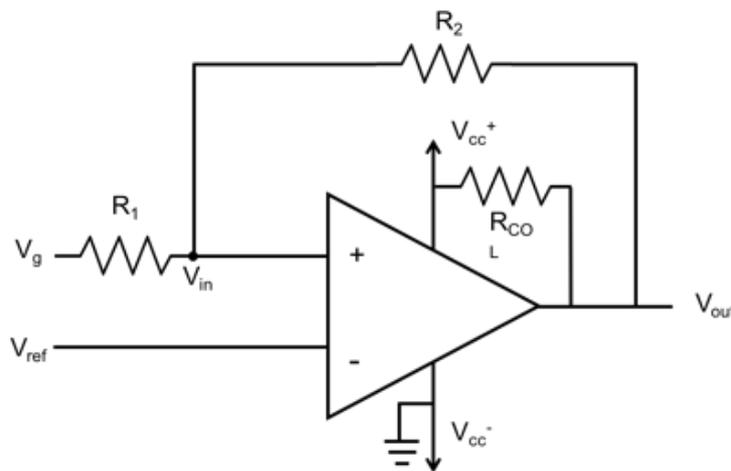


Figura 45: Circuito comparador con histéresis

Donde V_g será la tensión en bornes del motor de la toma de fuerza externa, V_{in} será la tensión a comparar y V_{ref} la tensión con la que se compara. Si V_{in} es mayor que V_{ref} , la salida del comparador será V_{cc+} si, por el contrario, V_{in} es menor que V_{ref} , la tensión de salida V_{out} será igual a V_{cc-} . R_1 y R_2 se diseñarán para fijar los límites de funcionamiento de histéresis del comparador como se puede observar en la Figura 46.

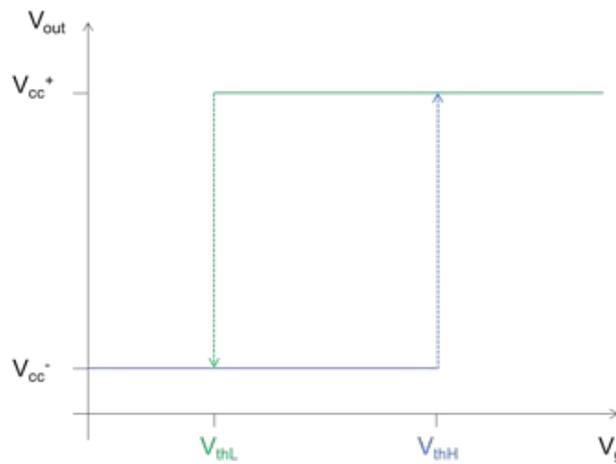


Figura 46: Efecto de histéresis de un comparador Schmitt Trigger

Las ecuaciones, teniendo en cuenta que la tensión V_{cc}^- está conectado a tierra y, por tanto, es nula, quedan de la siguiente manera:

$$V_{thH} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_{ref}$$

$$V_{thL} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{cc}^+$$

Alimentando el comparador con una tensión superior a la tensión de salida de nivel alto y teniendo en cuenta las restricciones de diseño citadas anteriormente, se llega a la conclusión de que el cociente entre las resistencias del dimensionado del proceso de histéresis debería ser:

$$\frac{R_1}{R_2} = 0,2$$

Añadiendo que, $V_{ref} = 1,5V$, $V_{cc}^- = 0V$ y $V_{cc}^+ = 5V$ y desarrollando las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$V_{thH} = 1,8V$$

$$V_{thL} = 0,8V$$

Y, finalmente, se pueden fijar los valores de las resistencias:

$$R_1 = 1,5 k\Omega$$

$$R_2 = 7,5 k\Omega$$



Por último, la resistencia R_{COL} es aquella que se conecta desde la salida accesible del colector del transistor hasta la alimentación de $5V$, esta resistencia modula la salida alta del comparador, generando una salida curva si el transistor no está saturado a su salida o una recta en caso de que lo esté. Para que esta salida sea lo más cercana posible a una recta, se ha de colocar una resistencia de valor bajo, en este caso, $R_{COL} = 470\Omega$.

El circuito final a implementar se muestra en la Figura 47.

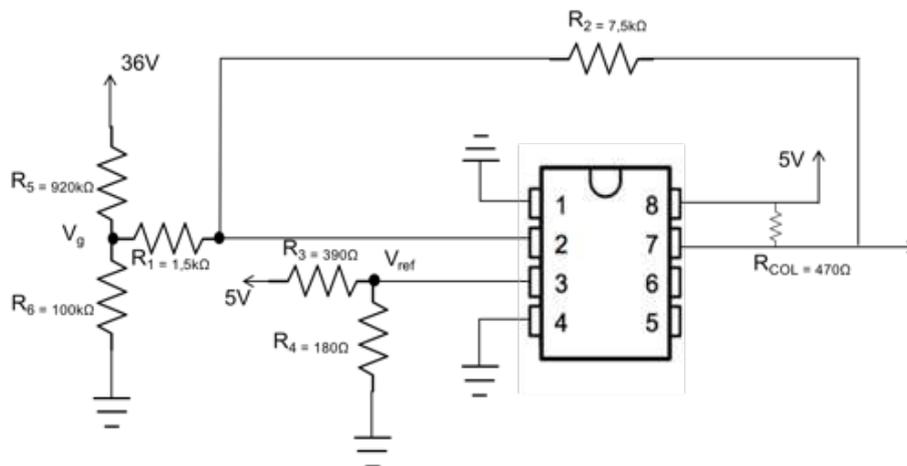


Figura 47: Circuito LM311 comparador con histéresis

Para las pruebas de funcionamiento del diseño del comparador se usa directamente una entrada triangular del generador de señales con amplitud de $0V$ a $3,3V$ para simular los posibles valores de la entrada real y comprobar las tensiones límite superior e inferior con las que cambia la señal de salida.

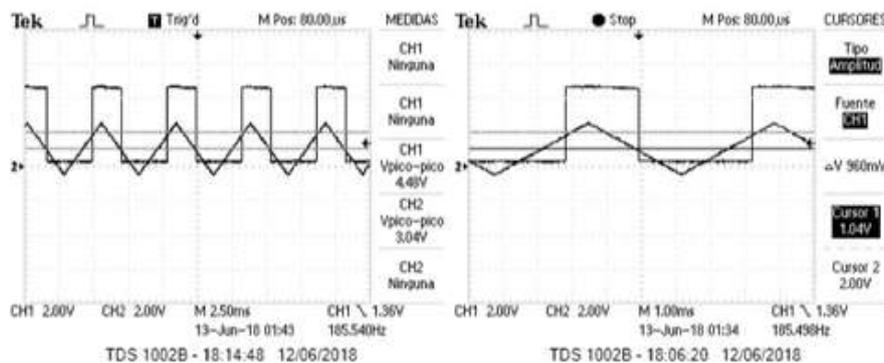


Figura 48: Pruebas de funcionamiento del comparador con histéresis con una entrada triangular

Como puede observarse en la Figura 48, la entrada es una señal triangular cuyo mínimo cae por debajo de $0V$ y cuyo máximo es de $3,3V$ aproximadamente, mientras que la tensión de salida es una señal cuadrada de mínimo $V_{cc}^- = 0V$ y de máximo $V_{cc}^+ = 5V$. Se puede comprobar que la señal de salida cambia a nivel alto cuando la tensión de



entrada sobrepasa $V_{thH} = 2V$ y está a nivel bajo cuando la tensión de entrada cae por debajo de los $V_{thL} = 1,04V$, valores muy cercanos a los teóricos y que encajan con la aplicación del presente proyecto.

4.3.4.3 *Extensor de Autonomía*

El control del extensor de autonomía, parte del Proyecto de Fin de Grado asociado a este proyecto [20], se realiza mediante una señal PWM que controla la velocidad del motor. De nuevo, será necesario el diseño de un filtro paso bajo de primer orden para aislar la componente continua de la señal.

El PWM que se genera para el control del motor tiene una frecuencia aproximada de 300 Hz , una frecuencia de corte de 10 Hz será adecuada para el diseño del filtro. Teniendo esto en cuenta y, para un condensador de $10\mu\text{F}$ la resistencia a implementar deberá ser:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = 10\text{ Hz}$$

$$R = 6\text{ M}\Omega$$

Tras el filtro la señal será analógica de valores entre $[0-36]V$, para que el micro reciba esta señal será necesario hacerla pasar por un divisor de tensión para reducir su rango a un máximo de $3,3V$. El diseño del divisor será el siguiente.

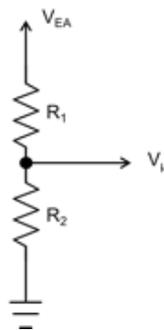


Figura 49: Divisor de tensión de la señal analógica del Extensor de Autonomía

Donde,

$$\frac{R_1}{R_2} = 9,9$$

Por tanto,

$$R_1 = 10\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 1\text{ k}\Omega$$



4.4 Software

Una vez optimizadas las señales de control del sistema, es decir, las señales que servirán como variables de entrada al microcontrolador, y las señales PWM de salida para el control de los motores, se dispone a implementar el control descrito detalladamente en apartados anteriores, en el Software del sistema.

La gestión de la cinemática y de los estados de carga y descarga se realizará mediante el diseño de una Máquina de Estados. El programa de Software utilizado es MPLAB X IDE [33], un IDE (Integrated Development Environment), es un entorno de desarrollo Integrado de libre acceso que permite desarrollar aplicaciones para los Microcontroladores de Microchip Inc. [29] como el que se usa en el presente proyecto.

El programa de control de la cinemática del vehículo, habiendo seguido una evolución desde las pruebas iniciales, explicadas al principio de la presente memoria, sigue el concepto de una máquina de estados que se explicará más adelante.

4.4.1 Conexión del microcontrolador

Habiendo definido durante el presente capítulo todos los elementos necesarios para el satisfactorio control de los motores, se procede a definir el conexionado final a los pines del Microcontrolador el cual se representa en la Figura 5o.

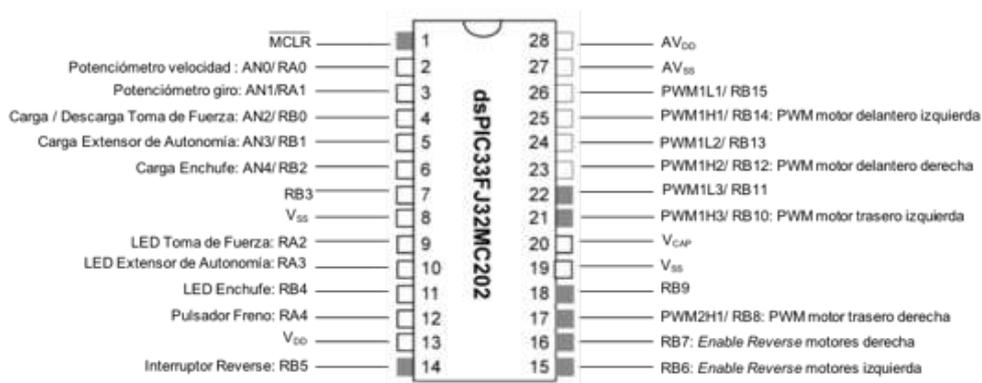


Figura 5o: Diagrama de pines del dsPIC33FJ32MC202

A continuación, en la Tabla 4, se presenta una definición de todos los pines con sus respectivas entradas y salidas a implementar.



Nombre	Pin	Periférico	Dirección	Hardware	Descripción
<i>Vel_pot</i>	<i>AN0</i>	<i>ADC</i>	Entrada	Potenciómetro	Medida de la velocidad
<i>g</i>	<i>AN1</i>	<i>ADC</i>	Entrada	Potenciómetro	Medida del giro
<i>EA</i>	<i>AN2</i>	<i>ADC</i>	Entrada	Divisor + LPF	Extensor de Autonomía
<i>PM</i>	<i>RB1</i>	<i>I/O</i>	Entrada	Pulsador + divisor + comparador	Motor de toma de fuerza
<i>Giro_45</i>	<i>RB2</i>	<i>I/O</i>	Entrada	Pulsador NC	Petición de giro sobre sí mismo
<i>LED_Freno</i>	<i>RB3</i>	<i>I/O</i>	Salida	LED	Señaliza la parada del vehículo
<i>LED_PM</i>	<i>RA2</i>	<i>I/O</i>	Salida	LED	Señaliza el funcionamiento del motor de la toma de fuerza
<i>LED_EA</i>	<i>RA3</i>	<i>I/O</i>	Salida	LED	Señaliza el funcionamiento del extensor de autonomía
<i>Freno</i>	<i>RA4</i>	<i>I/O</i>	Entrada	Pulsador NC	Petición de la parada del vehículo
<i>Reverse</i>	<i>RB5</i>	<i>I/O</i>	Entrada	Interruptor	Petición de retroceso del vehículo
<i>Reverse_IJZQ</i>	<i>RB6</i>	<i>I/O</i>	Salida	Conector al controlador	Activa '0' o desactiva '1' el enable de cambio de sentido de giro de los motores izquierdos
<i>Reverse_DER</i>	<i>RB7</i>	<i>I/O</i>	Salida	Conector al controlador	Activa '0' o desactiva '1' el enable de cambio de sentido de giro de los motores derechos
<i>PWM4</i>	<i>RB8</i>	<i>PWM (PWM2H1)</i>	Salida	Conector a la señal aceleración del controlador	Genera la señal de ancho de banda que controla el motor trasero derecho



<i>PWM3</i>	<i>RB10</i>	<i>PWM (PWM1H3)</i>	Salida	Conector a la señal aceleración del controlador	Genera la señal de ancho de banda que controla el motor trasero izquierdo
<i>PWM2</i>	<i>RB12</i>	<i>PWM (PWM1H2)</i>	Salida	Conector a la señal aceleración del controlador	Genera la señal de ancho de banda que controla el motor delantero derecho
<i>PWM1</i>	<i>RB14</i>	<i>PWM (PWM1H1)</i>	Salida	Conector a la señal aceleración del controlador	Genera la señal de ancho de banda que controla el motor delantero izquierdo

Tabla 4: Resumen de entradas y salidas del microcontrolador para la implementación del control de la tracción y la cinemática del vehículo

Teniendo en cuenta qué se debe conectar en cada pin y el acondicionamiento descrito en el apartado anterior, se puede hacer un esquema de cómo debe quedar el conexionado definitivo al microcontrolador. Este servirá de guía para la placa soldada que se debe elaborar para que el conexionado quede fijo y se puedan realizar las pruebas y validaciones más adelante.

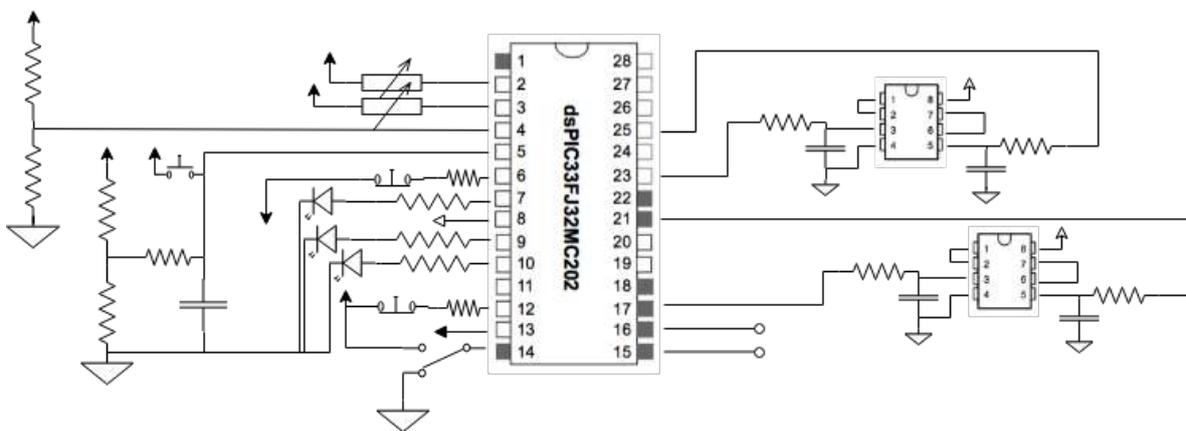


Figura 51: Conexionado del microcontrolador con el resto de elementos de acondicionamiento de las señales

En la Figura 51, las alimentaciones representadas con una flecha con relleno serán a 3,3V provenientes del pin 13 del microcontrolador. Las tierras de todos los elementos serán también comunes y conectadas al pin 8 del microcontrolador. La alimentación de los chips amplificadores, representadas con una flecha sin relleno, serán a 5V provenientes de la tarjeta PicTrainer en la que se ensambla el microcontrolador.



4.4.2 Máquina de Estados

Una máquina de estados finita es un modelo de comportamiento que da valor a sus salidas en función del estado actual del circuito y del valor de sus entradas. Se usan para diseñar circuitos secuenciales y sistemas de control, como el caso que se presenta en este documento [34].

El código inicial de prueba se componía de bucles condicionales, sin embargo, a medida que se añadían funcionalidades y para una buena gestión y control de los estados, se hizo clara la necesidad de reconvertir el código en una Máquina de Estados. Para su diseño se deberán definir las entradas al sistema, las salidas, las variables de estado almacenadas en la memoria, las funciones de transición entre estados, las acciones y las funciones de salida.

Entradas

Nombre	Tipo	Descripción
<i>v_pot</i>	Analógica	Lectura de un potenciómetro, fija la velocidad demandada
<i>g</i>	Analógica	Lectura de un potenciómetro que mide el giro de la rueda izquierda delantera
<i>Freno</i>	Digital	Pulsador normalmente cerrado (NC) para pedir el freno
<i>Reverse</i>	Digital	Interruptor para pedir invertir el sentido de avance
<i>PM</i>	Digital	'1' si al pin le llegan 3,3V que significa que el motor de par mecánico está en funcionamiento
<i>Giro_45</i>	Digital	Pulsador NC para pedir que el vehículo rote sobre sí mismo

Tabla 5: Variables de entrada de la Máquina de Estados



Salidas

Nombre	Tipo	Descripción
<i>PWM1</i>	PWM	Señal de control del motor delantero izquierda
<i>PWM2</i>	PWM	Señal de control del motor delantero derecha
<i>PWM3</i>	PWM	Señal de control del motor trasero izquierda
<i>PWM4</i>	PWM	Señal de control del motor trasero izquierda
<i>LED_Freno</i>	Digital	Señal de encendido del LED que indica freno
<i>LED_Giro</i>	Digital	Señal de encendido del LED que indica Giro sobre sí mismo
<i>LED_Reverse</i>	Digital	Señal de encendido del LED que indica Reverse

Tabla 6: Variables de salida de la Máquina de Estados

Variables de estado

Nombre	Tipo	Descripción
<i>dc</i>	Analógica	Valor de la velocidad del potenciómetro en el instante anterior. Se almacena para poder compararla con la nueva lectura y decidir a qué estado transitar
<i>R</i>	Analógica	Diferencia entre la velocidad anterior y la actual, servirá de condición para las transiciones entre estados

Tabla 7: Variables de control de la Máquina de Estados



Una vez presentadas las variables se puede ilustrar el diagrama de la Máquina de Estados Figura 52 para un seguimiento más sencillo en la explicación de transiciones entre estados. Cada estado está representado con un color y todas sus transiciones de salida llevan el mismo color, de esta forma será más fácil de identificar. Por defecto, el programa siempre empezará en el estado 0 *Mantener*.

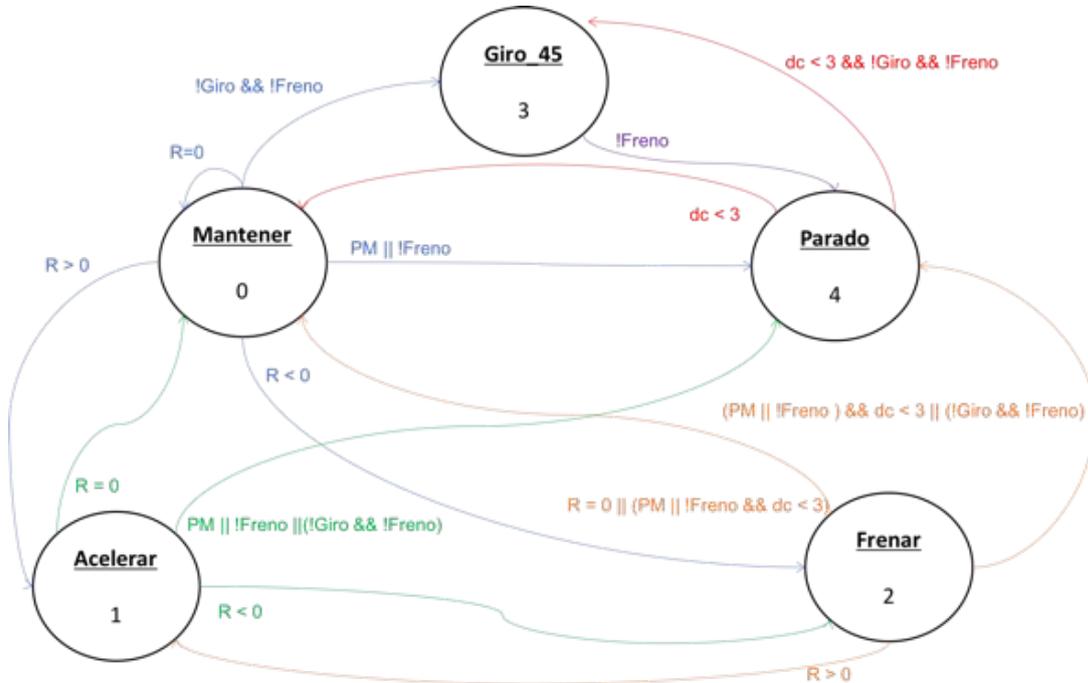


Figura 52: Diagrama de la Máquina de Estados a implementar

Acciones

Una vez dentro de cada estado, se ejecutan las acciones, se comprueban las condiciones de transición y se ejecutan las acciones de salida en caso de existir.

Estado 0: MANTENER

Como el nombre del estado indica, la acción que se ejecuta es la de mantener la misma velocidad que en el instante anterior. Por tanto, se llamará a la función que calcula el valor del PWM correspondiente a la velocidad de avance del centro de gravedad del vehículo en cuestión y se asigna dicho valor DC.



```
//Velocidad instantánea igual que la velocidad demandada, por  
tanto, mantener  
    cinematica(v_pot, g, DC);  
    setDcPWM(PWM1, DC[0]);  
    setDcPWM(PWM2, DC[1]);  
    setDcPWM(PWM3, DC[2]);  
    setDcPWM(PWM4, DC[3]);
```

Estado 1: ACELERAR

Ya se introdujo en el capítulo de las especificaciones en el apartado de *Acelerar* de la página 21, ante un aumento en la consigna de velocidad e calcula una recta de aceleración y, progresivamente, se va aumentando el mando hasta llegar a la velocidad demandada.

Al entrar al estado de Acelerar lo primero que se calcula es el nuevo valor de la variable de estado *dc*, llamando a la función *mandoAcelerar()*, y acto seguido se llama a la función que calcula la señal PWM en función de la velocidad y se asignan los nuevos valores de DC.

```
//Velocidad instantánea igual que la velocidad demandada  
    dc=mandoAcelerar(); //Recta de aceleración hasta llegar a la  
    velocidad demandada  
    cinematica(dc, g, DC);  
    setDcPWM(PWM1, DC[0]);  
    setDcPWM(PWM2, DC[1]);  
    setDcPWM(PWM3, DC[2]);  
    setDcPWM(PWM4, DC[3]);
```

Estado 2: FRENAR

De forma análoga, al entrar a este estado se calcula el nuevo valor *dc* según la recta de frenado llamando a la función *mandoFrenar()*. Luego se llama a la función que calcula los nuevos valores del ciclo de trabajo de cada señal PWM y, finalmente, se generan las nuevas señales PWM.



```
//Velocidad instantánea igual que la velocidad demandada
dc=mandoFrenar();//Recta de aceleración hasta llegar a la
velocidad demandada

cinematica(dc,g,DC);
setDcPWM(PWM1,DC[0]);
setDcPWM(PWM2,DC[1]);
setDcPWM(PWM3,DC[2]);
setDcPWM(PWM4,DC[3]);
```

Estado 3: GIRO_45

Todas las restricciones impuestas para transitar a este estado hacen que, una vez se haya llegado, se está seguro de que cumple las condiciones para poder ejecutar las acciones. Las señales *Enable* del reverse de los controladores de las ruedas izquierdas han debido ser activadas al salir del estado de parado, por tanto, únicamente se debe asignar un ciclo de trabajo fijo e igual para todas las señales PWM.

```
//Todas las ruedas giran a la misma velocidad, ruedas
izquierdas girando en sentido contrario

setDcPWM(PWM1,dc_g);
setDcPWM(PWM2,dc_g);
setDcPWM(PWM3,dc_g);
setDcPWM(PWM4,dc_g);
```

Estado 4: PARADO

En este estado se vuelve a llamar a la función *mandoFrenar()*, pero esta vez se fuerza el freno completo del vehículo, es decir, hasta que *dc* es menor o igual que 3, ya que es la unidad de salto en la recta de frenado. Una vez el vehículo ha frenado por completo, si no se había cumplido una condición de transición, se producirá la transición automática al estado de mantener.

```
dc=mandoFrenar();//Recta frenado hasta dc<=3
cinematica(dc,g,DC);
setDcPWM(PWM1,DC[0]);
setDcPWM(PWM2,DC[1]);
setDcPWM(PWM3,DC[2]);
setDcPWM(PWM4,DC[3]);
```



Transiciones

La dinámica de una Máquina de Estados la proporcionan las transiciones y sus condiciones. Habrá condiciones que provoquen un cambio de estado y habrá otras que generen una acción pero que solo se comprueban al salir o entrar en un estado. Condiciones anteriores o posteriores, respectivamente. Además, las condiciones tienen un orden de prioridad, en el código simplemente se atribuyen por el orden de escritura, siguiendo ese criterio, se describirán en el documento de mayor a menor por orden de prioridad.

No se van a enumerar todas las transiciones entre estados ya que eso precisamente es lo que muestra la Figura 52, sino que se explicará la lógica detrás de ellas, las prioridades y las condiciones anteriores o posteriores que existan.

Estado 0: MANTENER

!Freno // PM: En primer lugar, se comprueba si se está pidiendo el freno del vehículo o si el par motor está en funcionamiento porque, en ambos casos, el vehículo debe parar inmediatamente, por tanto, si se da alguna de estas entradas y el vehículo no tiene velocidad nula, se asignaría la transición al estado *4 Parado*.

Giro_45: en caso de que se pida este modo, se tiene que estar pulsando el freno al mismo tiempo, en ese caso se asignará el estado *4 Parado* para asegurar que los motores están parados antes de activar el *Enable* de reverse de las ruedas izquierdas. Si únicamente se pulsa el *Giro_45* pero no se frena, la consigna se ignorará.

$R > X$: teniendo en cuenta la definición de esta variable, significará que se lee del potenciómetro una velocidad mayor que la instantánea del vehículo, por tanto, se asignará el estado *1 Acelerar*.

$R < Y$: de forma análoga, si del potenciómetro se lee una velocidad menor que la instantánea del vehículo se asignará el estado *2 Frenar*.



```
//ACCIONES y TRANSICIONES

    if(PM || Freno==0){ //Si freno o par de fuerza
impedir el movimiento

        if(dc>3){estado=4;} //Parada

    }else if (Giro_45==0 ){

        if(Freno==0){estado=4;} //Solo actuar cuando
además se haya frenado

    }else if(resta > X){ // velocidad demandada mayor
que velocidad instantánea del vehículo

//valor nuevo cada tarea Idle 10ms, de 0 a 100 en 3s
        estado=1; //Acelerar

    } else if(resta < Y){ //Velocidad instantánea mayor
que velocidad demandada

        estado=2; //Frenar
```

Funciones de salida:

Reverse: Antes de salir del estado siempre se comprobará si la variable Reverse está o no activada. En caso de que sí, se comprobará si se ha asignado un estado distinto al 0 *Mantener* y si los motores están parados, en ese caso es seguro activar el *Enable* de reverse los cuatro motores. Además, se activa un flag de entrada para que, en el flanco de bajada de la señal de reverse los *Enable* se vuelvan a poner a '0'. Si la señal de Reverse no está activa, los *Enable* de reverse se mantienen siempre a '1'.



```

if(Reverse) {
    if(estado!=0 && dc<=3 ){ // Solo si el vehículo
está parado se activa el Enable
        PORTB &=~ 0x00C0; //Enable= 0 cambia el
sentido de giro de los motores
        r=1; //Flag de entrada
    }
} else {
    if(r=1) { //Desactivar enable solo si el
vehículo está parado
        if(dc<=3) {
            PORTB |= 0x00C0; //RB6 y RB7
            r=0; } //Reset flag
        } else {
            PORTB |= 0x00C0; //Enable=1 sentido de giro
directo de los motores
        }
    }
}

```

Estado 1: ACELERAR

!Freno || PM: Se comprueba si se está pidiendo el freno del vehículo o si el par motor está en funcionamiento, en cualquier caso, el vehículo debe parar inmediatamente, por tanto, si no lo está ya, se asignaría la transición al estado 4 *Parado*.

!Giro_45 && !Freno: En caso de que se pida el giro del vehículo sobre sí mismo, solo se actuará asignando el estado 4 *Parado*, si también se está pidiendo el freno del vehículo. El giro solo se puede producir, pasando por el paro completo del vehículo por seguridad.

R < Y: si la lectura del potenciómetro es una velocidad menor que la instantánea del vehículo se asignará el estado 1 *Frenar*.

R=0: Si no se dan ninguno de los casos anteriores, que significa que la velocidad se mantiene constante, se asignará el estado 0 *Mantener*.

```

//TRANSICIONES
if(PM || Freno==0) {
    estado=4; //Parada
}
if(Giro_45==0 && Freno==0) {
    estado=4;
} else if(resta < Y) { //Velocidad demandada menor que
la velocidad instantánea
    estado=2; //Frenar
} else {
    estado=0; //mantenemos
}

```



Estado 2: FRENAR

!Giro_45 && !Freno: En caso de que se pida el giro del vehículo sobre sí mismo y la parada del vehículo, se asignará la transición al estado *4 Parado*.

!Freno // PM: Se comprueba si se está pidiendo el freno del vehículo o si el par motor está en funcionamiento, si el vehículo ya está parado se asignará el estado *0 Mantener* y si, por el contrario, el vehículo tiene velocidad no nula, se asignaría la transición al estado *4 Parado*.

R > X: Si la lectura del potenciómetro es mayor que la velocidad instantánea del vehículo se asignará la transición al estado *1 Acelerar*.

R=0: Si no se dan ninguno de los casos anteriores, que significa que la velocidad se mantiene constante, se asignará el estado *0 Mantener*.

```

//TRANSICIONES
    if(Giro_45==0 && Freno==0){

        estado=4;

    }else if(PM || Freno==0 ){

        if(dc<=3){
            estado=0;//Si el vehículo ya está parado, se
mantiene
        }else {
            estado=4;// Parada
        }

    }else{
        resta=v_pot - (int)dc;
    }
    if(resta > X){//velocidad demandada mayor
que velocidad isntantánea del vehículo

        estado=1;//Acelerar

    }else{
        estado=0;//mantener
    }

```

Estado 3: GIRO_45

!Freno: La única posibilidad para salir de este estado es que se pida el freno del vehículo asignando el estado *4 Parado* en la transición. Esto se define así como protección de los motores para asegurar que no están en funcionamiento cuando se cambia la señal *Enable de reverse*.



```
//TRANSICIONES

//Solo salgo del estado frenando para asegurar que
no bloquee los motores al cambiar el enable de estado
if(Freno==0){
    estado=4;
}
```

Estado 4: PARADO

!Giro_45: Si se está en el estado de parado, se pide el giro del vehículo sobre sí mismo y, el vehículo ha llegado a velocidad nula, se produce el cambio de los Enable de reverse de las ruedas izquierdas de '1' a '0', y se asigna la transición al estado 3 *Giro_45*.

```
if(Giro_45==0){
    if(dc<=3 && Freno ){//estaba parado y quito el
freno
        PORTB &=~ (1<<6); // Activar Enable=0 del
Reverse de las ruedas izquierdas
        estado=3;
}
```

Funciones de salida:

Reverse: para cualquier otra casuística que no sea la anterior, se asigna la transición al estado 0 *Mantener* una vez el vehículo se ha parado por completo. Antes de la transición se comprueba la señal de *Reverse*, si esta es '1', como los motores están parados, se procede al cambio de las señales *Enable* de reverse de los cuatro controladores de '1' a '0'. En caso de que la señal *Reverse* no esté activa, las señales *Enable* se mantienen a '1'.

```
}else {
    if(dc<=3){
        estado=0;
        if(Reverse){
            PORTB &=~ 0x00C0; //Enable= 0 cambia el
sentido de giro de los motores
        }
        }else{
            PORTB |= 0x00C0; //Enable=1 sentido de giro
directo de los motores
        }
    }
}
```



4.4.3 Código

El código implementado se compone de un Main y dos funciones adicionales para la Máquina de Estados y los cálculos de la cinemática, respectivamente. Además, se han usado los drivers de los periféricos PWM y ADC y la función *TareaIdle()*, provenientes de la asignatura de Máster de Sistemas Electrónicos de la Universidad Pontificia Comillas.

Main

En el Main únicamente se define la frecuencia de los PWM a generar y los pines de los mismos, y se definen las inicializaciones pertinentes. Estas son, inicializar los puertos A y B según sus entradas y salidas y asignar las que serán entradas analógicas del puerto A. Por seguridad, se configuran primero todos los pines como digitales, luego en la función de inicialización del driver ADC se redefinen los pines usados como analógicos. Se inicializa también la tarea Idle, la cual se explicará a continuación, a *10ms*. Por último, se inicializan las cuatro señales PWM que se van a querer generar con los pines a usar y su frecuencia.

```
#define PWM1 (1<<14) //RB14 PWM1H1 del izq
#define PWM2 (1<<12) //RB12 PWM1H2 del derecha
#define PWM3 (1<<10) //RB10 PWM1H3 trasera izq
#define PWM4 (1<<8) //RB8 PWM2H1 trasera derecha
#define FREQ 1000 //Hz Frecuencia de los PWM

int main(void) {

    inicializarReloj();
    //SALIDAS (0): PWM [RB8, RB10, RB12, RB14] LED [RB3, RA2,
    RA3] ENABLE [RB6, RB7]
    //ENTRADAS (1): potenciómetros [AN0 = RA0; AN1 = RA1]
    Estados bat [AN2 = RB0 ; RB1] Switch reverse [RB5] Freno [RA4]
    Giro sobre si mismo [RB2]
    TRISB=0x0027; //Entradas RB0, RB1, RB2, RB5
    TRISA=0x0013; //Entradas RA0, RA1 y RA4
    PORTB=0x0000; //Escribir en pin digital o leer de pin
    analógico
    AD1PCFGL=0xFFFF; //PORTA primero todos digitales (0011 1111)
    inicializarADCPolling(0x07); //0x07 AN0, AN1 y AN2
    inicializarTareaIdle(10); //cada 10ms el bucle
```



El bucle del Main está continuamente ejecutándose y en él se llaman a las dos tareas que componen el código.

```
while (1)
{
    motorControl();
    tareaIdle();// 10ms por cada ciclo de scan
}
return 0;
\
```

Tarea Idle

Funciones de manejo de la Tarea Idle para gestionar el bucle de *scan* y controlar su temporización para que cada iteración del bucle dure el mismo tiempo. Para dicho control se hace uso del *Timer 1*, con cada inicio del bucle se empieza la cuenta y la tarea se queda bloqueada hasta el final del periodo de muestreo. Por tanto, se deberá inicializar la Tarea con el periodo de muestreo en *ms* que se desee que dure el ciclo de *scan*.

Función Vehículo

Función responsable del cálculo del ciclo de trabajo que corresponde a cada señal PWM en función de la lectura de los potenciómetros de velocidad y giro.

Esta función es llamada desde la Tarea MotorControl donde se envían las variables de velocidad y giro que se acaban de mencionar y un puntero al vector de cuatro posiciones donde se almacenarán los ciclos de trabajo.

Una vez dentro de la función, lo primero será comprobar si la velocidad es nula, en tal caso se asignarán $DC=0$, o si no lo es, en cuyo caso se pasará a comprobar el valor de ángulo de giro puesto que de ello dependen las ecuaciones a aplicar.

Para un giro en sentido horario, habiendo convertido la lectura del potenciómetro de velocidad según lo indicado en el capítulo cuatro de control del vehículo donde se explican la aplicación de la cinemática al código en la página 57.



```
if(Vel>0){

    //GIRO HORARIO
    if(giro>0 && giro<= 360/*giro<512*/ ){ //ángulo menor de
90 grados 360 en tetai hace que tetad sean 90, a partir de aqui
el sen se vuelve negativo

    // ángulos (rad)
    tetai=PI/2-(giro*0.08789+45)*PI/180;
    //tetai =giro*PI/1024;//rad
    tani=tanf(fabs(tetai));//rad
    tetad =atanf((1/((1/tani)-(a/l))));

    //Distancias (m)
    hcir =l/tanf(tetai);
    ri =l/sinf(tetai);
    rd =l/sinf(tetad);
    rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));

    //velocidades (m/s)
    v[0] =((ri/rcg)*V*400) + 4000; //delantera izq
    v[1] =((rd/rcg)*V*400) + 4000; //delantera derch
    v[2] =((hcir/rcg)*V*400) + 4000; //trasera izq
    v[3] =(((hcir-a)/rcg)*V*400) + 4000; //trasera derch
```

Para un sentido de giro antihorario las ecuaciones para el cálculo de los ángulos y de las distancias varían ligeramente.



```

}else if(giro> 512){ // ángulo mayor de 90 grados, GIRO
IZQUIERDA

// ángulos (rad)
alfai=PI-(giro*0.08789+45)*PI/180;
//alfai =PI-giro*PI/1024;//rad
tani=tanf(fabs(alfai));//rad
alfad =atanf((tani)+(a/l));
tand=tanf(fabs(alfad));

//Distancias (m)
hcir =l/tanf(alfad);
ri =l/cosf(alfai);
rd =l/cosf(alfad);
rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));

//Velocidades (m/s)
v[0] =((ri/rcg)*V*400) + 4000; //delantera izq
v[1] =((rd/rcg)*V*400) + 4000; //delantera derch
v[2] =((hcir-a)/rcg)*V*400) + 4000; trasera izq
v[3] =((hcir/rcg)*V*400) + 4000;//trasera derch

```

Si, por el contrario, no se pretende un giro o la velocidad es nula, se aplicarán directamente la consigna demandada en todos los motores o un DC nulo, respectivamente.

```

//AVANZAR RECTO
}else if(giro== 0){
v[0] =Vel*9.77; //delantera izq
v[1] =Vel*9.77; //delantera derch
v[2]=Vel*9.77; //trasera izq
v[3]=Vel*9.77; //trasera derch

}
}

else if(Vel==0){ //

v[0] =0; //delantera izq
v[1] =0; //delantera derch
v[2] =0; //trasera izq
v[3] =0; //trasera derch

}

```



Por último, antes de finalizar la función y almacenar los ciclos de trabajo en el vector de consignas, se comprueba que los cálculos no sean nulos, superiores al máximo o inferiores al mínimo, si lo son se asignará '0', valor máximo permitido o valor mínimo permitido, respectivamente, a la posición correspondiente en el vector DC.

```
for(p=0;p<4;p++){  
  
    if(v[p]>maxvel){  
        v[p] =maxvel;  
        DC[p]=v[p];  
    }  
    else if(v[p]<0){  
        v[p] =minvel;  
        DC[p]=v[p];  
    }else if(v[p]==0){  
        DC[p]=0;  
    }else{  
        DC[p] =v[p]*pwm;  
    }  
}
```

Tarea MotorControl

Esta tarea contiene la Máquina de Estados recientemente explicada.

En primer lugar, se incluyen los archivos .h de las funciones y drivers que van a ser utilizados y se definen las constantes que aparecen a lo largo del código y las variables globales, estas serán las variables de estado de la Máquina de Estados.



```
#include <xc.h>
#include "motorControl.h"
#include <math.h>
#include "vehiculo.h"
#include "pwm.h"
#include "pwm2.h"
#include "adc.h"

#define PWM1 (1<<14) //RB14 PWM1H1
#define PWM2 (1<<12) //RB12 PWM1H2
#define PWM3 (1<<10) //RB10 PWM1H3
#define PWM4 (1<<8) //RB8 PWM2H1

#define X 15
#define Y -15 //48,38 mV de margen en el potenciómetro para
cambiar de estado

//Variables globales
static unsigned int v_pot = 0; // lectura del potenciómetro de
velocidad
static unsigned int dc = 0; // velocidad instantanea

int PM; // Motor de toma de fuerza externa
int EA; //Motor de extensor de autonomía
int Freno; //Pulsador que pide el freno del vehículo
int Reverse; //Switch que pide cambio de giro de los motores
int Giro_45; //Pulsador que pide el giro sobre sí mismo del
vehículo
//int Cargador; //Batería cargándose a través de su cargador
```

Tras la definición de los pines de las variables de entrada y la activación de los PWM se declaran las acciones anteriores fuera de la definición de los casos para que, en caso de cumplirse una de las condiciones, la acción se ejecute sin importar en qué estado se encuentre. Las acciones son la activación de los pines a los que se conectarán los Leds del mando de control para indicar si el motor de la toma de fuerza o el extensor de autonomía están en funcionamiento o si el coche está en freno.



```
if( EA>0 ){
    PORTA |= (1<<3); //luce LED RA3

}else if(PM){
    PORTA |= (1<<2); //luce LED RA2

}else if(Freno==0){
    PORTB |= (1<<3); // luce LED RB3

}else {

    PORTA &=~ 0x000C; // a cero RA2 y RA3
    PORTB &= ~(1<<3); //a cero RB3
```

Tras las condiciones anteriores se define la Máquina de Estados, es decir, el *Switch Case* con sus respectivas transiciones y acciones. El detalle del código se acaba de explicar anteriormente en este mismo capítulo página 85.



```
static unsigned char estado = 0;

switch (estado){

case 0: //MANTENER
        resta = v_pot - (int)dc;

        //ACCIONES y TRANSICIONES
        //FUNCIONES DE SALIDA

        break;

case 1://ACELERAR

        //ACCIONES
        //TRANSICIONES
        break;

case 2://FRENAR

        //ACCIONES
        //TRANSICIONES
        break;

case 3: //GIRO SOBRE SÍ MISMO

        //ACCIONES
        //TRANSICIONES
        break;

case 4: //PARADO

        //ACCIONES
        //TRANSICIONES Y FUNCIONES DE SALIDA

        break;

}
```

Finalmente, se definen las funciones *mandoAcelerar ()* y *mandoFrenar ()* donde se calcula el valor actualizado de la variable *dc* según la recta de aceleración o frenado y la consigna final de velocidad final a la que se desea llegar. Ambas funciones son análogas y su cálculo se detalló en el capítulo dos donde se explicaron las cinemáticas, página 21. Únicamente destacar la diferencia en la función de frenado donde se distingue el caso de que se haya activado la consigna de Freno o de funcionamiento del motor de toma de fuerza, en cuyo caso se fuerza la deceleración hasta la parada completa del vehículo.



```
unsigned int mandoAcelerar(void){

    //recta de aceleración de 0% a 100% en 3s

    if(v_pot> dc){

        dc=dc+ 3;
    }
    return dc;
}

unsigned int mandoFrenar(void){

    if(PM || Freno==0 || Giro_45==0){ //Si se ha pedido freno,
    par de fuerza externo o giro sobre sí mismo, parar el vehículo

        if(dc > 3){

            dc=dc-3;
        }

    }else if(v_pot < dc){
        dc = dc- 3;
    }
    return dc;
}
```





5. ENSAMBLAJE

En este capítulo se describirá la implementación final de todos los elementos. Se detallará el ensamblaje de cada parte, se explicarán las uniones entre elementos y se mostrarán los resultados finales del montaje.

Para una explicación clara del proceso se dividirá entre el montaje de los elementos del control digital y el montaje mecánico de la estructura del vehículo.

5.1 *Electrónica*

El montaje de la electrónica del vehículo conlleva los motores en rueda, sus controladores, la batería, el microcontrolador y el Hardware de entrada y salida de la Máquina de Estados ensamblada en el mando de control.

Debido a retrasos en la entrega de la batería, esta no estuvo a tiempo para incluirla en el montaje final. De haberla tenido se habrían tenido que añadir clemas para poder alimentar a los controladores y el microcontrolador al mismo tiempo. Al no ser así, se hizo uso de la fuente de alimentación de los laboratorios de la escuela para alimentar a los controladores y de una fuente externa para alimentar al microcontrolador.

5.1.1 Caja externa de electrónica

Por motivos de funcionalidad, ya que el vehículo no tiene un control remoto, se decidió acoplar una caja externa conteniendo todos los siguientes elementos de control de la cinemática y de comunicación con el usuario.

En la Figura 53 se aprecian ensamblados en la tapa de la caja, que constituye el mando de control, los elementos que se describirán a continuación. Se puede leer al lado de cada elemento su uso. Los componentes situados a la derecha de la imagen y etiquetados en amarillo corresponden al Trabajo de Fin de Grado [20] asociado al presente proyecto y, por tanto, no procede su explicación en este documento.

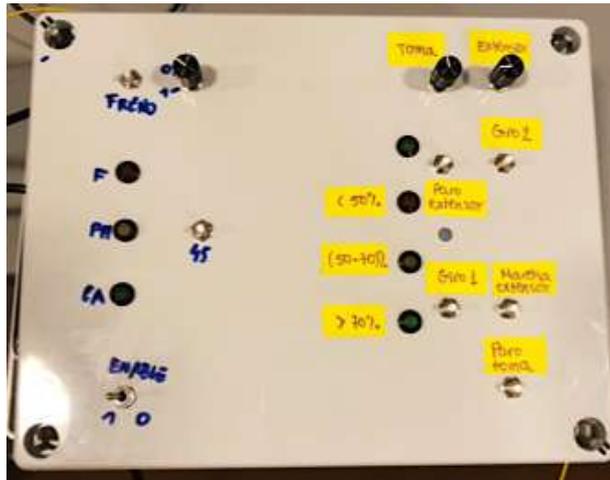


Figura 53: Mando de control con el Hardware implementado

Ensamblados en la tapa de la caja del mando del control encontramos:

- *LEDs*: tres diodos emisores de luz para indicar el freno, el funcionamiento del motor de toma de fuerza externa y el funcionamiento del extensor de autonomía, independientemente. Cada Led se escoge de un color distinto para no dar lugar a confusiones.
- *Potenciómetro*: potenciómetro de eje de $1k\Omega$ de recorrido para la selección de la velocidad de avance del vehículo.
- *Pulsadores*: dos pulsadores con contacto normalmente cerrado para las consignas de freno y giro sobre sí mismo, respectivamente.
- *Interruptor*: interruptor de dos posiciones para elegir el sentido de giro de los motores. Circuito cerrado un '1' en la entrada del micro, implica sentido de giro directo, por el contrario, circuito abierto, un '0' en la entrada del micro implica sentido de giro inverso de los motores.

En el interior de la caja se encuentra el microcontrolador junto con su placa y el conexionado correspondiente Figura 54. El conexionado de las entradas y salidas compuestas por el Hardware acoplado a la caja de control, queda por dentro de la misma, será necesario únicamente sacar cables para las conexiones con los controladores y la alimentación de la batería. Las señales del estado de carga de la batería provenientes del motor de la toma de fuerza y del extensor de autonomía se toman del conexionado de microcontrolador del TFG asociado, dicha placa se encuentra también en el interior de esta caja.



Figura 54: Microcontrolador con tarjeta PicTrainer y placa con las señales de entrada y salida y componentes de acondicionamiento

En el diseño inicial se tuvo en cuenta la inclusión de la batería, con ella se iba a implementar un conmutador de dos posiciones para elegir entre el modo de carga de la batería o el modo de descarga. Este conmutador, del cual se dispone, habría estado accesible en uno de los laterales de esta caja de mando, sin embargo, se deja su implementación para cuando esté la batería.

5.1.2 Motores y Controladores

Ambos elementos venían con el cableado y los conectores adecuados para su montaje directo entre ellos. Sin embargo, dadas las modificaciones en el uso de las restantes señales de los controladores, fueron necesarias algunas modificaciones.

1. Cables de alimentación de los controladores para soportar un posible máximo de corriente de $13A$. Se han de acoplar los conectores necesarios para la unión con el controlador, por un lado, y con conectores tipo banana de $4mm$ para la conexión con la fuente de alimentación, por el otro.
2. Cable con conector hembra para conectar la señal *Enable* del Reverse del controlador, soldado a un conector macho que irá conectado a la placa soldada.
3. Cable de la señal de aceleración del controlador, se hace uso del conector del potenciómetro original y se sueldan pines hembra al otro lado para conectarlos con las salidas correspondientes en la placa soldada, tierra y señal de aceleración.



5.2 Mecánica

El montaje de la estructura del vehículo fue posible gracias a la elaboración de las piezas por un taller externo.

5.2.1 Bastidor flexible

En la Figura 55 se muestra el bastidor flexible que se introdujo en el capítulo tercero de diseño del vehículo, página 30. Este está formado por el bastidor de metacrilato y las cuatro ballestas de polietileno de alta densidad. Ambos elementos están unidos mediante arandelas y tornillos pasantes. En la Figura 56 se puede apreciar en detalle como el bastidor está unido a las ballestas, y como otros tornillo, arandelas y tuercas unirán la pieza de sujeción de los motores al bastidor.



Figura 55: Bastidor flexible formado por el bastidor de metacrilato y las ballestas de polietileno

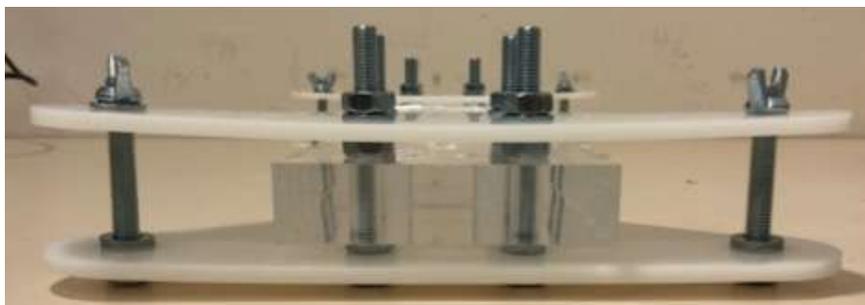


Figura 56: Detalle de la unión entre bastidor y ballestas con los tornillos pasantes



Como se puede apreciar en la Figura 57, la pieza de unión entre las ruedas y el bastidor flexible tiene un diseño sencillo, se une el eje de la rueda con la pieza y esta se une, a través de la ballesta, con un tornillo pasante con el bastidor. Tal y como se diseñó, permite el libre giro de las ruedas sin ofrecer oposición o rozamiento.



Figura 57: Sujeción entre los motores y las ballestas del bastidor



5.3 Montaje Final

Finalmente se ensamblan las cuatro ruedas con el resto del vehículo, Figura 58 y Figura 59. A dicho montaje le faltan las bancadas, que irían sobre parte de las ballestas y el bastidor, y las varillas de sujeción de las ruedas para mantener la proporción de ángulo entre ellas.



Figura 58: Imagen frontal del bastidor con los cuatro motores ensamblados

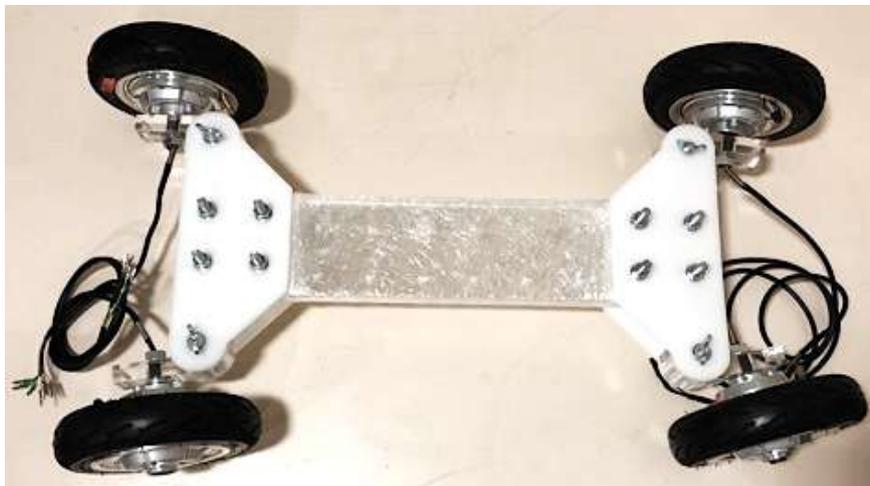


Figura 59: Planta del vehículo con los motores y el bastidor

Se ha debido tener en cuenta el sentido de giro de cada motor para su montaje. En las pruebas previas ya se definió el sentido de giro de cada motor con la señal *Self-Learning* de los controladores, por tanto, debía respetarse a la hora de montar el vehículo para que su posterior cinemática fuera la correcta. En caso de equivocación se puede redefinir el sentido de giro con dicha señal del controlador.



6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

Capítulo final de pruebas de validación del sistema diseñado y ensamblado, y presentación de las conclusiones en función de los resultados obtenidos.

Las pruebas de funcionamiento se deciden llevar a cabo con el vehículo sobre un soporte de modo que este no se desplace. Puesto que no se diseñó un control remoto, esta es la única posibilidad viable de realizar las pruebas de funcionamiento y seguir controlando las variables de estado al mismo tiempo.

Se podría decir que las pruebas de funcionamiento se han ido realizando a lo largo de todo el proceso de diseño con las pruebas iniciales de programación y, seguidamente, con el acondicionamiento de señales. Sin embargo, todas ellas culminan en la posibilidad de validar el funcionamiento del montaje completo del vehículo.

El proceso de validación final se compone de unas pruebas previas, con un solo motor, y unas pruebas finales, con dos motores al mismo tiempo. Idealmente, las pruebas finales hubiesen sido con los cuatro motores funcionando a la vez, pero al no contar con la batería para alimentarlos de forma simultánea, se deben probar de dos en dos.

6.1 Pruebas sobre un motor

El paso lógico previo a la validación del montaje completo, es el de validar el funcionamiento de un solo motor ante la programación de la Máquina de Estados y el conexionado del Hardware.

Dado que el potenciómetro de giro no llegó a implementarse, el código de control se ejecuta con un ángulo fijo de unos 23° aproximadamente, sentido horario. Los dos motores utilizados para las pruebas son el delantero izquierdo y el delantero derecho.

6.1.1 Montaje

El montaje necesario para las pruebas del sistema compuesto por el mando de control, el microcontrolador, un controlador y un solo motor se puede observar en la Figura 6o. Para su funcionamiento será necesario alimentar el microcontrolador con una fuente externa y el controlador con un mínimo de tensión de $19V$ a través de la fuente de alimentación de los laboratorios de la escuela.



Figura 60: Montaje panel de control, controlador y motor para pruebas de funcionamiento sobre un motor

En la imagen aparecen conectadas las señales de los Sensores de Efecto Hall, la alimentación de las tres fases del motor, la señal *Enable* del Reserver del controlador, la señal de aceleración del controlador y la alimentación del controlador. Por detrás de la tapa de la caja de mando queda el microcontrolador, alimentado por la fuente externa.

6.1.2 Pruebas de velocidad

Se incluirán todas las pruebas que no impliquen un cambio en la señal *Enable* de reverse, es decir, cambio de sentido de giro de un motor. Se hace distinción entre estas pruebas puesto que, si la lógica de la Máquina de Estados está mal programada, los motores se bloquearán ante un flanco en esta señal si no están previamente parados.

Las pruebas comienzan con un aumento progresivo de la señal del potenciómetro. Se validará el recorrido de la velocidad respecto al valor del potenciómetro y las rectas de frenado y aceleración.

En primer lugar, se valida el recorrido total del potenciómetro y sus velocidades mínima y máxima respectivamente. Empezando por una consigna nula del potenciómetro lo que no provoca movimiento en el motor y aumentando dicha consigna lentamente. Como respuesta el motor comienza a girar aumentando su velocidad progresivamente a la vez que aumenta la consigna del potenciómetro. Se comprueba que el motor acelera hasta el máximo del potenciómetro $3,3V$ dando una velocidad de aproximadamente 15 m/s .



A continuación, se comprueba el frenado del vehículo. Su comportamiento es el esperado, una vez pulsado el freno este comienza a frenar de forma progresiva hasta alcanzar velocidad nula. Soltamos el freno y el motor vuelve a la consigna de velocidad anterior. Si mientras está pulsado el freno, se aumenta o disminuye la consigna de velocidad, al soltar el freno el motor acelera hasta la nueva consigna, también de forma progresiva. En ningún caso el motor gira mientras el freno esté pulsado y el LED que señala el freno esta encendido siempre que esta señal esté activa.

Se comprueba el tiempo de frenado y aceleración para un cambio de $0V$ a $3,3V$ en la consigna del potenciómetro., el cual se había programado como $3s$ aproximadamente.

Freno	Potenciómetro (V)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)
Vel.Máx-0	3,3 - 0	$\sim 15 - 0$	2,23
0-Vel.Máx	0 - 3,3	0 - ~ 15	2,15

6.1.3 Pruebas de giro sobre sí mismo y reverse

Conlleva las pruebas donde el *Enable* de la señal reverse de los controladores se ve afectado, esto son, pruebas del vehículo en retroceso y de giro sobre sí mismo.

6.1.3.1 Reverse

Mientras el motor está girando, un cambio en la señal de Reverse no provoca una respuesta en el comportamiento del motor. Si se activa la señal de Reverse (pone a cero la señal de Enable del controlador) y seguidamente se pulsa el freno, al soltar de nuevo el freno, el motor comienza a girar en sentido contrario, acelerando de forma progresiva hasta alcanzar la consigna de velocidad marcada por el potenciómetro. Si se vuelve a cambiar la señal de Reverse, el motor no sufre ningún cambio. Habrá que volver a frenar para desactivar la señal de Reverse. En este caso la velocidad máxima alcanzada es algo menor, no llegando a los $10m/s$.

6.1.3.2 Giro sobre sí mismo

Las últimas comprobaciones son sobre la cinemática de giro sobre sí mismo.

Estando el motor en el modo de avance directo se pulsa el Giro sobre sí mismo, no produciéndose ningún efecto sobre el motor. Se pulsa entonces el freno mientras se sigue pidiendo la rotación del vehículo sobre su eje, una vez soltado el freno el motor acelera hasta llegar a una velocidad media fijada en el código. En este caso, se



conexionó con una rueda derecha, por lo que no cambia el sentido de giro. Si aumentamos la consigna del potenciómetro, la velocidad del motor no varía hasta que no pulsemos el freno, pulsando el Giro sobre sí mismo, al mismo tiempo. La velocidad del motor está fijada por el código a un PWM del 40%, por tanto, el motor gira a una velocidad cercana a la mínima.

6.1.4 Pruebas sobre estados de carga

Finalmente, se deben realizar las pruebas sobre la gestión del estado de carga de la batería. Tal y como está implementado el código, este tiene en cuenta la carga o descarga de la batería a través de un par mecánico. Puesto que la batería no se recibió a tiempo para las pruebas, no se llegaron a ejecutar las líneas de código que tenían en cuenta la carga a través del extensor de autonomía ni del cargador. Sin embargo, se ejecutaron las del par mecánico para ilustrar el comportamiento del motor ante esta consigna.

La respuesta del motor ante el par mecánico, ya sea de carga o de descarga, es la de parar el motor mientras esté activa y encender el LED asociado a la activación de esta señal, y volver a girar a la consigna marcada por el potenciómetro cuando esta se desactiva, apagándose el LED que marcaba su funcionamiento.

6.1.5 Conclusiones

Habiendo realizado las pruebas de control de la cinemática y de gestión de la batería sobre un único motor se puede concluir que el comportamiento es el esperado. Ya que estas pruebas son satisfactorias se puede avanzar y llevar a cabo las pruebas sobre dos motores simultáneamente.



6.2 Pruebas sobre dos motores

La validación final del control de la cinemática y gestión de la batería del vehículo eléctrico se realiza alimentando sus dos motores delanteros y fijando el ángulo de giro a 23° aproximadamente, sentido horario.

Las pruebas con dos motores para la validación de la gestión del estado de carga de la batería son exactamente iguales que las pruebas con un único motor, por tanto, no será necesario volver a documentarlas.

6.2.1 Montaje

La validación se realiza con el montaje final del vehículo. Esto se debe a las complicaciones derivadas del conexionado de la fuente, dos controladores y dos motores en caso de que los motores no estén en suspensión y fijos. Por tanto, se ensamblan todas las piezas del vehículo y los cuatro motores y se alimentan los controladores desde la fuente de alimentación del laboratorio, y el microcontrolador desde otra fuente de alimentación externa. En la Figura 61 y la Figura 62 se muestra el montaje sobre el que se realizan dichas pruebas y el conexionado de todos los elementos.

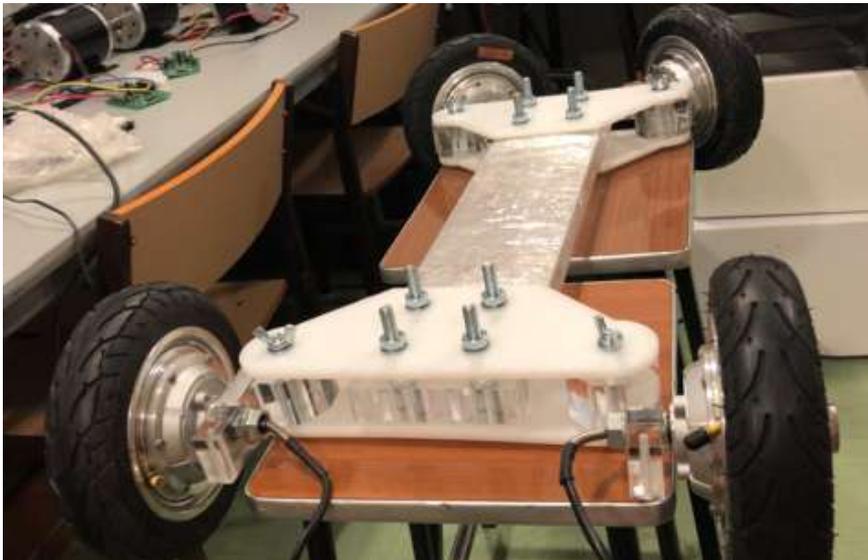


Figura 61: Montaje del vehículo con los cuatro motores sobre soporte para las validaciones



Figura 62: Conexión de los motores con sus respectivos controladores, con el mando de control y con la fuente de alimentación

Las pruebas realizadas serán las mismas que sobre un único motor, observando ahora el comportamiento de los dos motores al mismo tiempo.

6.2.2 Pruebas de velocidad

Puesto que se alimentan los dos motores delanteros y que el vehículo tiene fijado un ángulo de giro aproximado de 23° en sentido horario, rápidamente se comprueba como la rueda izquierda gira a más velocidad que la derecha. A medida que se aumenta la consigna del potenciómetro, los motores van aumentando su velocidad progresivamente. Del mismo modo, a medida que se reduce la consigna de velocidad los motores van reduciendo su velocidad. Se puede observar como al frenar, la rueda derecha, al estar el vehículo girando en ese sentido, llega a su posición de parado instantes antes que la izquierda. Mientras el freno está pulsado, el LED correspondiente está luciendo.

Prueba	Potenciómetro (V)	Vel. Motor izq(m/s)	Vel. Motor derch. (m/s)
Velocidad Máxima	3,3	~15	~13



Al igual que sucede con un solo motor, los dos paran al pulsar el freno. La parada se produce de forma paulatina gracias a la recta de frenado. Se evidencia la necesidad de mejorar este frenado puesto que, al empezar a frenar partiendo de velocidades distintas, la reducción de consigna de velocidad empieza en distintos puntos de la recta. Esto se traduce en que el motor que lleva menos velocidad, frena antes que el motor que gira a mayor velocidad. De forma análoga, la aceleración se produce de forma progresiva, llegando antes a su velocidad de consigna el motor que gira a menos velocidad.

El comportamiento ante el freno y las consignas de velocidad es el mismo que para un único motor, siguiendo lo descrito en la Máquina de Estados implementada.

Freno	Potenciómetro(V)	Vel. M. izq(m/s)	Vel. M. dereh. (m/s)	T. izq (s)	T. derech (s)
Vel.Máx-0	3,3 - 0	~15 - 0	~13 - 0	2,3	1,9
0-Vel.Max	0 - 3,3	0 - ~15	0 - ~13	2,1	1,8

6.2.3 Pruebas de giro sobre sí mismo y reverse

6.2.3.1 Reverse

De nuevo, el comportamiento es el esperado y análogo a las pruebas sobre un único motor. El cambio de estado de la variable reverse solo se ejecuta después de haber frenado ambos motores. Ya sea para cambiar a giro inverso o para volver al giro directo.

De nuevo, la velocidad máxima que alcanzan los motores en su sentido de giro inverso es inferior a la máxima en su sentido de giro directo. Se comprueba que se respeta el ángulo de giro por lo que los motores siguen girando el derecho más lento que el izquierdo y, por tanto, el vehículo retrocedería sobre sus propios pasos.

6.2.3.2 Giro sobre sí mismo

Esta es la prueba que difiere con la validación de un solo motor ya que, con esta cinemática, dos deben girar en un sentido y dos deben girar en el sentido contrario.

Una vez los motores están en funcionamiento se pulsa el Giro sobre sí mismo y, a continuación, se pulsa el freno para parar los motores. Manteniendo pulsado el Giro sobre sí mismo, se suelta el freno y los motores comienzan a girar a la misma velocidad, velocidad media fijada en el código. El motor izquierdo gira en su sentido inverso



mientras que el derecho gira en su sentido directo. Mientras los motores están en este funcionamiento ninguna consigna que no sea el freno, altera su comportamiento. Se procede a frenar el vehículo y, como ya no está pulsado la consigna de Giro sobre sí mismo, al soltarlo, los motores vuelven a girar a la consigna marcada por el potenciómetro, ambos en su sentido de giro directo.



6.3 Conclusiones

Tras la realización de las pruebas de validación con un solo motor y con dos motores al mismo tiempo de un modelo a escala de un vehículo eléctrico todoterreno se puede concluir que los objetivos iniciales del proyecto se han alcanzado satisfactoriamente puesto que el modelo cumple con:

- Es robusto y simple, gracias al mínimo de piezas exigidas por un vehículo eléctrico y a una cinemática simple y fiable. Esto abarata los costes de producción, de mantenimiento y hace que sea fácil y seguro de manejar.
- Sería capaz de transitar por terrenos complicados gracias a una estructura resistente y flexible, a la potencia entregada por una batería de alta capacidad y a la cinemática con la que se dota al vehículo. Gracias al giro sobre sí mismo, podrá tomar cualquier dirección de avance sin necesidad de giros abiertos.
- Por último, será capaz de transportar, almacenar y entregar energía allá donde vaya gracias a la batería de alta capacidad y de su alto número de ciclos de recarga y a los distintos medios de conversión electromecánica con los que cuenta el vehículo.

Dado el cumplimiento de estos objetivos en el modelo real a escala 1:3, se cree en el potencial del modelo final a escala 1:1 para cumplir de forma satisfactoria los mismo objetivos cinemáticos y energéticos.



6.4 Futuros desarrollos

Tras haber completado el diseño, la construcción y la validación del sistema de control de la cinemática y la gestión de la batería de un modelo real a escala de un vehículo eléctrico todoterreno, se dispone a analizar las futuras mejoras a llevar a cabo para el perfeccionamiento de dicho sistema.

- En primer lugar, se deberá finalizar en montaje completo añadiendo la batería, las varillas de unión de las ruedas dos a dos y las bancadas para la fijación de la batería, el extensor de autonomía y el motor de par de fuerza al bastidor. Una vez finalizado el montaje se deberán hacer las pruebas de validación de cinemática pertinentes sobre los cuatro motores alimentados desde la batería. Con las instrucciones de código de la gestión de la misma activas, se podrá validar por completo el funcionamiento de dicho control
- Contando con la batería final se podrá implementar la descarga de la misma a través de una toma de corriente. Es decir, convertir al vehículo en una fuente de tensión segura. Este estado se explicó en la memoria, sin embargo, no se pudo implementar por falta de la batería.
- Una vez validados ambos controles se deberá perfeccionar el sistema de frenado y aceleración del vehículo. Como se comentó en el capítulo de resultados, cuando el vehículo está avanzando y girando y los motores no llevan la misma velocidad, tampoco frenan a la vez. Se deberá encontrar la solución más óptima para hacer que aceleren y frenen de forma progresiva, pero durante el mismo intervalo de tiempo. Esta solución podría ser cambiar la variable por la constante y viceversa. Esto es, en vez de que el incremento del mando de velocidad sea siempre el mismo haciendo que el tiempo para llegar a la velocidad final varíe, se podría fijar el tiempo en el que varía y con este dato y el punto de velocidad inicial, calcular el incremento del mando correspondiente.
- Habiéndose comentado en las reuniones iniciales durante la discusión sobre el diseño y las especificaciones del vehículo, una vez el ensamblaje y las validaciones finales hayan sido satisfactorias, se podría analizar la implementación del diseño oruga del vehículo. Dada su finalidad como ayuda para países en vías de desarrollo donde el tránsito por terrenos puede ser



complicado, la opción del diseño oruga en el vehículo puede ser una ventaja a la hora de completar satisfactoriamente sus tareas de desplazamiento y no impedir la entrega de energía.

- Por último, se debe plantear y sopesar la opción del diseño e implementación de un control remoto. De esta manera se podrá comprobar de forma más fiable la potencia del vehículo, su tracción y su autonomía.





7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEA, «Global EV Outlook,» 2017.
- [2] Renault, «Comparativa: mantenimiento de un coche eléctrico frente al de un coche térmico,» 14 julio 2016. [En línea]. Available: <https://corrienteelectrica.renault.es/comparativa-mantenimiento-coche-electrico-frente-coche-termico/>.
- [3] Revolve, «Electric Vehicles in the Developing World,» [En línea]. Available: <http://revolve.media/the-other-side-of-the-road-electric-vehicles-in-the-developing-world/>.
- [4] International Energy Agency, «Energy Technology Perspectives 2017,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/etp2017/summary/>.
- [5] Banco Mundial, «Panorama general de la energía,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>.
- [6] International Energy Agency, «International Energy Outlook,» 2017.
- [7] V. Cano, «Los diez coches eléctricos con más autonomía de mercado,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.autobild.es/reportajes/los-diez-coches-electricos-con-mas-autonomia-mercado-222905>.
- [8] Noticias coches, «Guía de compra 2017: híbridos enchifables, lo mejor de dos mundos,» 2017. [En línea]. Available: <https://noticias coches.com/informes/guia-de-compra-hibridos-enchufables/171063>.
- [9] H. P. Ambaripeta, «RANGE EXTENDER DEVELOPMENT FOR ELECTRIC VEHICLE USING ENGINE GENERATOR SET,» 2015.
- [10] Electromovilidad, «Tipos de coches eléctricos,» 2017. [En línea]. Available: <http://electromovilidad.net/tipos-de-coches-electricos/>.
- [11] D. G. Moreira, «Tipos de vehículos eléctricos: híbridos, eléctricos y de autonomía extendida,» [En línea]. Available: <http://www.highmotor.com/tipos-vehiculos-electricos-hibridos-electricos-autonomia-extendida.html>.
- [12] OX Global Vehicle Trust, [En línea]. Available: <http://oxgvt.com/>.



-
- [13] Institute of Affordable Transportation, 2017. [En línea]. Available: <http://www.drivebuv.org/buv-design>.
- [14] C. Scott, «3D Printed, Solar-Powered Cart Could Help Ease Water Troubles in Developing Countries,» 2017. [En línea]. Available: <https://3dprint.com/189834/3d-printed-solar-powered-cart-could-help-ease-water-troubles-in-developing-countries/>.
- [15] Watt-r, 2017. [En línea]. Available: <http://www.watt-r.com/>.
- [16] Oxford University, «Energy in Developing Countries,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.energy.ox.ac.uk/wordpress/energy-in-developing-countries/>.
- [17] B. J. Mike Wright, «A Brief History of the Lunar Roving Vehicle, As Part of the History of the NASA Marshall Space Flight Center,» Hunstville, Alabama, 2002.
- [18] C. S. W. C. M. Earnest, «Lunar Roving Vehicle Navigation System Performance Review,» Washington DC, 1973.
- [19] N. (. A. a. S. Administration), «NASA,» [En línea]. Available: https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/gallery/msfc_iow_21.html. [Último acceso: 07 2018].
- [20] A. M. Morote, «Diseño de extensor de autonomía y gestión de la batería de un vehículo eléctrico,» 2018.
- [21] Ebay, «Ebay,» [En línea]. Available: <https://www.ebay.es/itm/hmparts-Scooter-electrica-RC-Electrico-Motor-con-Soporte-36V-500W-flb8045/362237007369?hash=item5457021609:g:eWkAAOSw~IBafaKt>. [Último acceso: julio 2018].
- [22] Ebay, julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.ebay.es/itm/hmparts-e-Scooter-Rc-Electrico-Motor-con-Soporte-36V-300W-my1035-/361619020173>.
- [23] A. Group, «AliExpress,» [En línea]. Available: https://es.aliexpress.com/store/product/high-speed-15inch-electric-bike-wheel-brushless-hub-motor-36v-500w/1656295_32652432753.html?spm=a219c.12010608.o.o.4e2bde3dYt6NWD. [Último acceso: julio 2018].
- [24] Ebay, «Ebay,» julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.ebay.es/itm/SHOPRIDER-ALTEA-2-x-12v-10AH-SLK-POWER->
-



MOBILITY-SCOOTER-WHEELCHAIR-
BATTERIES/291923398173?hash=item43f7fd8e1d:g:XBUAAOSwDktbKkZd.

- [25] F. srl, «Batterycontroller,» julio 2018. [En línea]. Available: http://www.batterycontroller.com/es/info_baterias_y_tecnologia.html.
- [26] C. Electronics, «BatteryUniversity,» julio 2018. [En línea]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries .
- [27] D. B. Tender, «Batterytender,» julio 2018. [En línea]. Available: <http://www.batterytender.com/intro-to-lead-acid-batteries>.
- [28] C. Batteries, «Canbat,» julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.canbat.ca/agm-battery-guide/>.
- [29] M. T. Inc., «16-bit Digital Signal Controllers (up to 32 KB Flash and 2 KB SRAM) with Motor Control and Advanced Analog,» 2007.
- [30] Á. S. Miralles, «Libro SED».
- [31] T. Instrument Incorporated, «TLC272, TLC272A, TLC272B, TLC272Y, TLC277; LinMOS™ PRECISION DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS,» Texas, 2002.
- [32] T. I. Incorporated, «LM311-MIL Differential Comparators».
- [33] M. T. Inc., «Microchip,» julio 2018. [En línea]. Available: <http://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide>.
- [34] J. D. M. Frías, Introducción a los sistemas digitales, 2012.





ANEXO I - CÓDIGO FUENTE



```
/*
 * File:   TFM.c
 * Author: Carla Lamadrid Orús
 *
 * Created on March 30, 2018, 6:49 PM
 */

#include<p33FJ32MC202.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>

#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/adc.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/config.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/idle.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/pwm.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/pwm2.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/uart.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/vehiculo.h"
#include "../TFM.X/DriverPicTrainer/motorControl.h"

#include "xc.h"

#define PWM1 (1<<14) //RB14 PWM1H1 del izq
#define PWM2 (1<<12) //RB12 PWM1H2 del derecha
#define PWM3 (1<<10) //RB10 PWM1H3 trasera izq
#define PWM4 (1<<8) //RB8 PWM2H1 trasera derecha

#define PI 3.14159
#define FREQ 1000 //Hz Frecuencia de los PWM

//FUNCIONES

int main(void) {
```



```
    inicializarReloj();

    //SALIDAS (0): PWM [RB8, RB10, RB12, RB14] LED [RB3, RA2, RA3] ENABLE
    [RB6, RB7]

    //ENTRADAS (1): potenciómetros [AN0 = RA0; AN1 = RA1] Estados bat
    [AN2 = RB0 ; RB1] Switch reverse [RB5] Freno [RA4] Giro sobre si mismo
    [RB2]

    TRISB=0x0027; //Entradas RB0, RB1, RB2, RB5
    TRISA=0x0013; //Entradas RA0, RA1 y RA4
    PORTB=0x0000; //Escribir en pin digital o leer de pin analógico
    AD1PCFGL=0xFFFF; //PORTA primero todos digitales (0011 1111)
    inicializarADCPolling(0x07); //0x07 AN0, AN1 y AN2
    inicializarTareaIdle(10); //cada 10ms el bucle

    inicializarPWM(PWM1,FREQ);
    inicializarPWM(PWM2,FREQ);
    inicializarPWM(PWM3,FREQ);
    inicializarPWM2(PWM4,FREQ);

    while (1)
    {

        motorControl();
        tareaIdle(); // 10ms por cada ciclo de scan

    }

    return 0;
}
```



```
/*
 * File: vehiculo.h
 * Author: Carla Lamadrid
 * Comments: Cálculo de la cinemática del vehículo
 * Revision history:
 */

// This is a guard condition so that contents of this file are not
included
// more than once.
#ifndef VEHICULO_H
#define VEHICULO_H

//#include <xc.h> // include processor files - each processor file is
guarded.

void cinematica(int vel, int giro,int *DC);//devuelve un puntero a los
DC de todos los controladores

#endif /* XC_HEADER_TEMPLATE_H */
```



```
/*
 * File: vehiculo.c
 * Author: Carla Lamadrid Orús
 * Comments: Cálculo de la cinemática del vehículo
 * Revision history:
 */

#include <xc.h>
#include "vehiculo.h"
#include <math.h>

#define PI 3.14159
#define a 0.5 //m
#define l 0.58 //m
#define r 0.36 // radio en m de la rueda/motor

void cinematica(int Vel, int giro,int *DC){

    double V;

    V=0.0115*Vel;//a m/s y del rango de 1,3V a 3,3V

    long double hcir,rd,ri,rcg; //distancias al CIR
    long double tetad, tetai,tani, alfai,alfad, tand; //Ángulo de las
ruedas delanteras

    //velocidad de cada rueda
    double v[4];

    int pwm = 1;//factor x20*100 para pasar vel a %DC 0-5V va de 0 a
1024 o algo así
    float maxvel=10000;//en DC
    //int maxav=5000;//en DC
    int minvel=50; //en DC

    //CINEMÁTICA
```



```
if(Vel>0){

    //GIRO HORARIO
    if(giro>0 && giro<= 360/*giro<512*/ ){ //Ángulo menor de 90
    grados 360 en tetai hace que tetad sean 90, a partir de aqui el sen se
    vuelve negativo

    //Ángulos (rad)
    tetai=PI/2-(giro*0.08789+45)*PI/180;
    //tetai =giro*PI/1024;//rad
    tani=tanf(fabs(tetai));//rad
    tetad =atanf((1/((1/tani)-(a/l))));

    //Distancias (m)
    hcir =l/tanf(tetai);
    ri =l/sinf(tetai);
    rd =l/sinf(tetad);
    rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));

    //velocidades (m/s)
    v[0] =((ri/rcg)*V*400) + 4000; //delantera izq
    v[1] =((rd/rcg)*V*400) + 4000; //delantera derch
    v[2] =((hcir/rcg)*V*400) + 4000; //trasera izq
    v[3] =(((hcir-a)/rcg)*V*400) + 4000; //trasera derch

    //GIRO ANTIHORARIO
}else if(giro> 512){ // Ángulo mayor de 90 grados, GIRO IZQUIERDA

    //Ángulos (rad)
    alfai=PI-(giro*0.08789+45)*PI/180;
    //alfai =PI-giro*PI/1024;//rad
    tani=tanf(fabs(alfai));//rad
    alfad =atanf((tani)+(a/l));
    tand=tanf(fabs(alfad));

    //Distancias (m)
```



```
hcir =l*tanf(alfad);
ri =l/cosf(alfai);
rd =l/cosf(alfad);
rcg =sqrtf(powf(l/2,2)+powf(hcir-a/2,2));

//Velocidades (m/s)
v[0] =((ri/rcg)*V*400) + 4000; //delantera izq
v[1] =((rd/rcg)*V*400) + 4000; //delantera derch
v[2] =(((hcir-a)/rcg)*V*400) + 4000;//trasera izq
v[3] =((hcir/rcg)*V*400) + 4000;//trasera derch

//AVANZAR RECTO
}else if(giro== 0){
    v[0] =Vel*9.77; //delantera izq
    v[1] =Vel*9.77; //delantera derch
    v[2]=Vel*9.77; //trasera izq
    v[3]=Vel*9.77; //trasera derch

    }
}

else if(Vel==0){ //

v[0] =0; //delantera izq
v[1] =0; //delantera derch
v[2] =0; //trasera izq
v[3] =0; //trasera derch

}

for(p=0;p<4;p++){

    if(v[p]>maxvel){
        v[p] =maxvel;
        DC[p]=v[p];
    }
    else if(v[p]<0){
        v[p] =minvel;
    }
}
```



```
        DC[p]=v[p];
    }else if(v[p]==0){
        DC[p]=0;
    }else{
        DC[p] =v[p]*pwm;
    }
}
}
```



```
/*
 * File:
 * Author:
 * Comments:
 * Revision history:
 */

// This is a guard condition so that contents of this file are not
included
// more than once.
#ifndef MOTORCONTROL_H
#define MOTORCONTROL_H

#include <xc.h> // include processor files - each processor file is
guarded.

void motorControl(void);
unsigned int mandoAcelerar(void);
unsigned int mandoFrenar(void);
void __attribute__((interrupt,no_auto_psv)) _T1Interrupt(void);
void Ini_Timer2(void);
#endif /* XC_HEADER_TEMPLATE_H */
```



```
#include <xc.h>
#include "motorControl.h"
#include<math.h>
#include "vehiculo.h"
#include "pwm.h"
#include "pwm2.h"
#include "adc.h"

#define PWM1 (1<<14) //RB14 PWM1H1
#define PWM2 (1<<12) //RB12 PWM1H2
#define PWM3 (1<<10) //RB10 PWM1H3
#define PWM4 (1<<8) //RB8 PWM2H1

#define X 15
#define Y -15 //48,38 mV de margen en el potenciómetro para cambiar de estado

//Variables globales
static unsigned int v_pot = 0; // lectura del potenciómetro de velocidad
static unsigned int dc = 0; // velocidad instantanea

int PM; // Motor de toma de fuerza externa
int EA; //Motor de extensor de autonomía
int Freno; //Pulsador que pide el freno del vehículo
int Reverse; //Switch que pide cambio de giro de los motores
int Giro_45; //Pulsador que pide el giro sobre sí mismo del vehículo
//int Cargador; //Batería cargandose a través de su cargador

unsigned int mandoAcelerar(void); //Función recta de aceleración
unsigned int mandoFrenar(void); //Función recta de frenado

void motorControl(){
```



```
int DC[4]; //Consignas del ciclo de trabajo de los PWM para los
controladores de cada motor

int dc_g= 4000; //Ciclo de trabajo fijo para el modo de
funcionamiento de GIRO SOBRE SÍ MISMO

unsigned int g; //giro del vehículo

v_pot =leerADCPolling(0); //leerADCPolling(0); //AN0
g= 250; //leerADCPolling(1); //AN1

Freno = PORTA & 0x10; //RA4 Interruptor NC
Reverse=PORTB & 0x20; // RB5 pin 10 Switch
PM=PORTB & 0x02; //RB1
PM=0;
Giro_45=PORTB & 0x04; //RB2 Pulsador NC
//EA= leerADCPolling(2); //RB0
//Cargador= PORTA & 0x10; //RA4 pin 9

int r=0; //Flag de entrada a Reverse
int resta;

activarPWM(PWM1);
activarPWM(PWM2);
activarPWM(PWM3);
activarPWM(PWM4);

static unsigned char estado = 0;

if( EA>0 ){
    PORTA |= (1<<3); //luce LED RA3
}else if(PM){
    PORTA |= (1<<2); //luce LED RA2
}else if(Freno==0){
    PORTB |= (1<<3); // luce LED RB3
}else {
```



```
PORTA &=~ 0x000C; // a cero RA2 y RA3
PORTB &= ~(1<<3); //a cero RB3

}

switch (estado){

    case 0: //MANTENER

        resta = v_pot - (int)dc;

        //ACCIONES y TRANSICIONES

        if(PM || Freno==0){ //Si freno o par de fuerza impedir el
movimiento

            if(dc>3){estado=4;} //Parada

            }else if (Giro_45==0 ){

                if(Freno==0){estado=4;} //Solo actuar cuando además se
haya frenado

                }else if(resta > X){ // velocidad demandada mayor que
velocidad instantánea del vehículo

                    //valor nuevo cada tarea Idle 10ms, de 0 a 100 en 3s
                    estado=1; //Acelerar

                } else if(resta < Y){ //Velocidad instantánea mayor que
velocidad demandada

                    estado=2; //Frenar

                }else {

                    //Velocidad instantánea igual que la velocidad
demandada, por tanto, mantener
                    cinematica(v_pot,g,DC);
                    setDcPWM(PWM1,DC[0]);
```



```
        setDcPWM(PWM2,DC[1]);
        setDcPWM(PWM3,DC[2]);
        setDcPWM(PWM4,DC[3]);
    }

    if(Reverse){
        if(estado!=0 && dc<=3 ){ // Solo si el vehiculo está
parado se activa el Enable
            PORTB &=~ 0x00C0;//Enable= 0 cambia el sentido de
giro de los motores
            r=1;//Flag de entrada
        }
    }else{
        if(r=1){ //Desactivar enable solo si el vehículo está
parado
            if(dc<=3){
                PORTB |= 0x00C0; //RB6 y RB7
                r=0;} //Reset flag
            }else{
                PORTB |= 0x00C0;}//Enable=1 sentido de giro directo
de los motores
            }
        }

        break;

    case 1://ACELERAR

        if(PM || Freno==0){

            estado=4; //Parada
        }

        dc=mandoAcelerar();//Recta de aceleración hasta llegar a la
velocidad demandada

        cinematica(dc,g,DC);

        setDcPWM(PWM1,DC[0]);
        setDcPWM(PWM2,DC[1]);
```



```
setDcPWM(PWM3,DC[2]);
setDcPWM2(PWM4,DC[3]);

resta= v_pot - (int)dc;

//TRANSICIONES
if(Giro_45==0 && Freno==0){

    estado=4;

}

}else if(resta <Y){ //Velocidad demandada menor que la
velocidad instantánea

    estado=2; //Frenar

}

}else{
    estado=0;//mantenemos
}

break;

case 2://FRENAR

    dc=mandoFrenar();// Recta de frenado hasta llegar a la
velocidad demandada

    cinematica(dc,g,DC);

    setDcPWM(PWM1,DC[0]);
    setDcPWM(PWM2,DC[1]);
    setDcPWM(PWM3,DC[2]);
    setDcPWM2(PWM4,DC[3]);

//TRANSICIONES
if(Giro_45==0 && Freno==0){

    estado=4;

}

}else if(PM || Freno==0 ){
```



```
        if(dc<=3){
            estado=0;//Si el vehículo ya está parado, se
mantiene
        }else {
            estado=4;// Parada
        }

    }else{
        resta=v_pot - (int)dc;
    }
    if(resta > X){//velocidad demandada mayor que velocidad
isntantánea del vehículo

        estado=1;//Acelerar

    }else{
        estado=0;//mantener
    }
    break;

case 3: //GIRO SOBRE SÍ MISMO

    //Todas las ruedas giran a la misma velocidad con las ruedas
izquierdas girando en sentido contrario
    setDcPWM(PWM1,dc_g);
    setDcPWM(PWM2,dc_g);
    setDcPWM(PWM3,dc_g);
    setDcPWM2(PWM4,dc_g);

    //TRANSICIONES

    //Solo salgo del estado frenando para asegurar que no bloquee
los motores al cambiar el enable de estado
    if(Freno==0){
        estado=4;
        //PORTB |= 0x00C0;// ENABLE a 1
        //estado=0;
        //Desenable las ruedas izquierdas para que se vaya del
estado con el coche normal
```



```
    }
    break;

case 4: //PARADO

    dc=mandoFrenar(); // recta de frenado hasta dc<=3;
    cinematica(dc,g,DC);
    setDcPWM(PWM1,DC[0]);
    setDcPWM(PWM2,DC[1]);
    setDcPWM(PWM3,DC[2]);
    setDcPWM(PWM4,DC[3]);

    if(Giro_45==0){
        if(dc<=3 && Freno ){//estaba parado y quito el freno

            PORTB &=~ (1<<6); // Activar Enable=0 del Reverse de
las ruedas izquierdas
            estado=3;
        }

        }else {
            if(dc<=3){
                estado=0;
                if(Reverse){
                    PORTB &=~ 0x00C0;//Enable= 0 cambia el sentido
de giro de los motores
                }
                }else{
                    PORTB |= 0x00C0;//Enable=1 sentido de giro directo
de los motores
                }
            }

        break;

    }

}
```



```
unsigned int mandoAcelerar(void){

    //recta de aceleración de 0% a 100% en 3s

    if(v_pot> dc){

        dc=dc+ 3;

    }

    return dc;

}

unsigned int mandoFrenar(void){

    if(PM || Freno==0 || Giro_45==0){ //Si se ha pedido freno, par de
    fuerza externo o giro sobre sí mismo, parar el vehículo

        if(dc > 3){

            dc=dc-3;

        }

    }else if(v_pot < dc){

        dc = dc- 3;

    }

    return dc;

}
```




PARTE II

PRESUPUESTO



I. MEDICIONES

En primer lugar, se recoge el número de unidades de cada componente y las horas de uso de los mismos.

1.1 Vehículo

Componentes	Unidades
Bastidor	1
Ballestas	12
Sujeción ruedas	4
Tornillos	12
Tuercas	16
Arandelas	32
Motor rueda	4
Batería	1
Cargador	1



1.2 Caja de electrónica

1.2.1 Tarjeta de control

Componentes	Unidades
Microcontrolador dsPIC33FJ32MC202	1
Tarjeta PicTrainer	1
Amplificador TLC272	2
Condensador electrolítico 1 μ F	4
Condensador electrolítico 10 μ F	1
Tira pines macho	20
Tira pines hembra	20
Resistencias	8

1.2.2 Mando de control

Componentes	Unidades
Potenciómetro eje 1k Ω	2
Pulsadores NC	2
Interruptor 2 circuitos	1
LEDs	3
Conmutador 2 posiciones	1
Caja ABS	1
Cable cobre 4mm ²	4



1.3 Equipo y herramientas

Componentes	Unidades	Horas Proyecto	Horas uso al año
Ordenador	1	200	1800
Soldador	1	20	60
Pinzas, alicates, estaño	1	1	60
Osciloscopio dos canales	1	10	100
Polímetro	1	4	100
Fuente 30V	1	2	50
Fuente alimentación externa 12V	1	5	10
Programador PICkit 3 In-Circuit Debugger	1	70	200

1.4 Software

Componentes	Unidades	Horas Proyecto	Horas al año
<i>MPLAB X IDE</i>	1	200	500



1.5 Mano de obra

Actividades	Horas
Diseño montaje	90
Acondicionamiento señales	120
Diseño tarjeta	40
Programación	200
Montaje sistema	180
Pruebas y validación	60
Documentación proyecto	100
Horas totales	790



2. PRECIOS UNITARIOS

Se indicarán los precios unitarios de los elementos expuestos en el capítulo anterior, así como el coste por hora de las actividades listadas.

2.1 Vehículo

Componentes	Precio (€/u.)
Bastidor	89,61
Ballestas	20,96
Sujeción ruedas	47,70
Tornillos	0,65
Tuercas	1,65
Arandelas	1,45
Motor rueda + controlador	278,02
Batería	72
Cargador	52



2.2 Caja de electrónica

2.2.1 Tarjeta de control

Componentes	Precio (€/u.)
Microcontrolador dsPIC33FJ32MC202	7,8
Tarjeta PicTrainer	20,00
Amplificador TLC272	5,4
Condensador electrolítico 1µF	0,012
Condensador electrolítico 10µF	0,012
Tira pines macho	0,0053
Tira pines hembra	0,0053
Resistencias	0,0035

2.2.2 Mando de control

Componentes	Precio (€/u.)
Potenciómetro eje 1kΩ	0,0035
Pulsadores NC	1,02
Interruptor 2 circuitos	1,9
LEDs	0,52
Conmutador 2 posiciones	33,5
Caja ABS	21,32
Cable cobre 4mm ²	3,00



2.3 Equipo y herramientas

Componentes	Precio (€/u.)
Ordenador	1.200,00
Soldador	35,00
Pinzas, alicates, estaño	80,00
Osciloscopio dos canales	290,00
Polímetro	45,00
Fuente 30V	219,90
Fuente alimentación externa 12V	9,99
Programador PICkit 3 In-Circuit Debugger	50,02

2.4 Software

Componentes	Precio (€/u.)
<i>MPLAB X IDE</i>	<i>Versión de libre distribución</i>



2.5 *Mano de obra*

Actividades	Precio (€/hora)
Diseño montaje	40
Acondicionamiento señales	20
Diseño tarjeta	35
Programación	35
Montaje sistema	20
Pruebas y validación	40
Documentación proyecto	40



3. SUMAS PARCIALES

3.1 Vehículo

Componentes	Cantidad	Precio (€/u.)	Coste total (€)
Bastidor	1	89,61	89,61
Ballestas	12	20,96	251,52
Sujeción ruedas	4	47,70	190,8
Tornillos	12	0,65	7,8
Tuercas	16	1,65	26,4
Arandelas	32	1,45	46,4
Motor rueda + controlador	4	278,02	1.112,08
Batería	1	72	72
Cargador	1	52	52
TOTAL			1.848,61



3.2 Caja de electrónica

3.2.1 Tarjeta de control

Componentes	Cantidad	Precio (€/u.)	Coste total (€)
Microcontrolador dsPIC33FJ32MC202	1	7,8	7,8
Tarjeta PicTrainer	1	20,00	20
Amplificador TLC272	2	5,4	10,8
Condensador electrolítico 1µF	4	0,012	0,048
Condensador electrolítico 10µF	1	0,012	0,012
Tira pines macho	20	0,0053	0,106
Tira pines hembra	20	0,0053	0,106
Resistencias	8	0,0035	0,028
TOTAL			38,87

3.2.2 Mando de control

Componentes	Cantidad	Precio (€/u.)	Coste total (€)
Potenciómetro eje 1kΩ	1	0,0035	0,0035
Pulsadores NC	2	1,02	2,04
Interruptor 2 circuitos	1	1,9	1,9
LEDs	3	0,52	1,56
Conmutador 2 posiciones	1	33,5	33,5



Caja ABS	1	21,32	21,32
Cable cobre 4mm ²	1	3,00	3
TOTAL			63,32

3.3 Equipo y herramientas

Componentes	U.	H/p	H/a	Precio (€/u.)	Amortización anual	C.total (€)
Ordenador	1	200	1800	1.200,00	25%	33,33
Soldador	1	20	60	35,00	25%	2,92
Pinzas, alicates, estaño	1	1	60	80,00	25%	0,33
Osciloscopio dos canales	1	10	100	290,00	25%	7,25
Polímetro	1	4	100	45,00	25%	0,45
Fuente 30V	1	2	50	219,90	25%	2,20
Fuente externa 12V	1	5	10	9,99	25%	1,25
Programador PICKit 3	1	70	200	50,02	25%	4,38
TOTAL						52,11

3.4 Software

Componentes	Cantidad	Precio (€/u.)
<i>MPLAB X IDE</i>	1	<i>Versión de libre distribución</i>



3.5 Mano de obra

Actividades	Horas	Precio (€/h)	Coste total (€)
Diseño montaje	<i>90</i>	<i>40</i>	<i>3.600</i>
Acondicionamiento señales	<i>120</i>	<i>20</i>	<i>2.400</i>
Diseño tarjeta	<i>40</i>	<i>35</i>	<i>1.400</i>
Programación	<i>200</i>	<i>35</i>	<i>7.000</i>
Montaje sistema	<i>180</i>	<i>20</i>	<i>3.600</i>
Pruebas y validación	<i>60</i>	<i>40</i>	<i>2.400</i>
Documentación proyecto	<i>100</i>	<i>40</i>	<i>4.000</i>
TOTAL			<i>24.400</i>



o PRESUPUESTO GENERAL

Concepto	Coste total (€)
Vehículo	1.848,61
Caja de electrónica	72,37
Equipo y herramientas	52,11
Software	<i>Libre licencia</i>
Mano de obra	24.400,00
TOTAL	26.373,09
