

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de un sistema de conducción autónoma para
vehículo Renault Twizy

Autor: Javier González Vázquez

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Ingeniería de Sistemas y Automática



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de un sistema de conducción autónoma para vehículo Renault Twizy

Autor:
Javier González Vázquez

Tutor:
Carlos Bordons Alba
Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Diseño de un sistema de conducción autónoma para vehículo Renault Twizy

Autor: Javier González Vázquez

Tutor: Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a mi familia, por ser mi más sólido apoyo durante todo este período, así como a mis amigos, por alentarme en los momentos de flaqueza. Me gustaría agradecer también a mi tutor, Carlos Bordons, su paciencia y entrega, así como sus experimentados comentarios, que han contribuido a la versión final de este documento.

Resumen

En este trabajo se realiza el diseño preliminar de un sistema de conducción autónoma para un vehículo eléctrico biplaza de fabricación en serie.

En los primeros capítulos se hablará sobre nociones básicas de la materia y los distintos grupos de investigación de conducción autónoma presentes hoy en día, así como sus antecesores. Seguidamente se detallarán todos los tipos de sensores necesarios y se propondrá una combinación de ellos para este trabajo. Se expondrán también los distintos actuadores que harán falta para la correcta implementación del sistema de control diseñado.

En los siguientes capítulos se explicarán los modelos matemáticos tanto de control lateral como longitudinal que deberá sustentar la ECU de *bajo nivel* a falta de diseñar el controlador de estos modelos, sembrando las guías para que en futuras continuaciones de este, se logre llegar a un sistema de conducción autónoma tangible en el vehículo objetivo. Se hablará también de la arquitectura de control planteada para el proyecto.

Finalmente se harán simulaciones de estos modelos para su verificación y se comentarán cuales son las conclusiones y algunas guías e ideas para trabajos futuros.

Abstract

In this work, the preliminary design of an autonomous driving system for a two-seater electric vehicle manufactured in series is made.

In the first chapters will talk about basic notions of the subject and the various autonomous driving research groups present today, as well as their predecessors. Then all the necessary types of sensors will be detailed and a combination of them will be proposed for this work. The different actuators that will be needed for the correct implementation of the designed control system will also be exhibited.

In the following chapters will explain the mathematical models of both lateral and longitudinal control that should sustain the low-level ECU in the absence of designing the controller of these models, sowing the guidelines so that in future continuations of this, it is possible to reach a system of tangible autonomous driving in the target vehicle. The control architecture proposed for the project will also be discussed.

Finally, simulations of these models will be made for their verification and comments will be made on the conclusions and some guides and ideas for future work.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
1 Introducción y objetivos	11
1.1 <i>Introducción</i>	11
1.2 <i>Objetivos</i>	12
2 Estado del arte	13
2.1 <i>Definiciones y clasificación actual</i>	13
2.2 <i>Historia del coche autónomo</i>	18
2.3 <i>Actuales líneas de trabajo</i>	20
3 Sensores y actuadores	23
3.1 <i>Sensores</i>	23
3.2 <i>Actuadores motrices</i>	28
3.2.1 CONTROL LATERAL:	28
3.2.2 CONTROL LONGITUDINAL:	30
3.3 <i>Vehículo propuesto</i>	34
4 Modelado	35
4.2 <i>Control longitudinal</i>	35
4.3 <i>Control Lateral</i>	43
5 Diseño conceptual	47
5.1 <i>Solución propuesta</i>	47
5.2 <i>Arquitectura de control</i>	51
5.3 <i>Simulación de modelos</i>	53
6 Conclusiones y trabajos futuros	56
Bibliografía	57

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los sistemas de transporte inteligentes son uno de los temas más desafiantes en el entorno tecnológico actual. Desde hace ya unas décadas, se ha fijado la atención en los sistemas de automatización de vehículos, especialmente en automóviles, en los que actualmente podemos ver implementadas este tipo de tecnologías y que se encontrarán en el punto de mira de este proyecto, también en aviones (UAVs, unmanned aerial vehicle), submarinos (AUVs, autonomous underwater vehicles), barcos, etc.

Este tipo de sistemas prometen traer grandes mejoras en seguridad, reducción de costes y optimización de recursos, renunciando al factor humano. Los constantes progresos en el desarrollo de sistemas robustos de control, de percepción y de comunicaciones, han abierto un sendero de evolución casi imparable hacia dicha autonomía.

Para conseguir el mencionado objetivo se utiliza un gran entramado de sensores, como GPS, LIDAR, radar o cámaras, la complejidad de estos sensores reside en fusionar información y que esta sea procesada por un ordenador de a bordo, capaz de emitir diagnósticos sobre el estado del vehículo y su entorno para después, mediante complejos algoritmos, emitir órdenes a la red de actuadores que permitirán el control lateral y longitudinal del vehículo.

Aunque el planteamiento parezca asumible, la conducción autónoma sigue siendo, hoy en día, un problema abierto para la comunidad científica, puesto que el control combinado de las dinámicas longitudinal y lateral de un vehículo a velocidades elevadas (autopistas) y en entornos urbanos, es un desafío de extraordinaria complejidad.

1.2 Objetivos

Este proyecto se centrará en el **diseño preliminar de un sistema de control autónomo para el Renault Twizy**, vehículo eléctrico biplaza disponible en los talleres de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros (ETSI) de la Universidad de Sevilla, donado por la mencionada marca.

En los capítulos correspondientes se tratará la red de sensores y actuadores necesarios para su implementación, la arquitectura de control razonada para el proyecto, los modelos matemáticos del control lateral y longitudinal del vehículo llevado a cabo en el programa *Simulink* de *Matlab*, así como las posteriores simulaciones y conclusiones realizadas.

En definitiva daremos una propuesta de diseño de control autónomo, con una arquitectura de control determinada, una combinación de sensores optimizada y las guías para que en trabajos futuros, en ingeniería de detalle, se diseñe con mayor precisión el sistema, basado en dichas guías.

Siguiendo un paradigma clásico en robótica, tanto el control lateral como longitudinal se realizan con dos lazos en cascada: uno de *alto nivel* (que se encontrará fuera del alcance de este proyecto) que transforma la información obtenida de la red de sensores mediante complejos algoritmos de generación de trayectoria, evitación de obstáculos, etc., en posiciones de volante y velocidad requerida respectivamente, y otro de *bajo nivel* que tiene por misión orientar las ruedas en la posición deseada y conseguir la velocidad necesaria con la mayor rapidez y precisión posibles. Es este último problema el que tratará de resolver conceptualmente el presente trabajo.



Figura 1.1: Renault Twizy

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo desarrollaremos los proyectos puestos en marcha hoy en día sobre esta disciplina, así como sus antecesores. Comenzaremos por dar una explicación detallada de a qué llamamos vehículo autónomo, y qué tipo de clasificación según el nivel de automatización se usa actualmente.

2.1 Definiciones y clasificación actual

Si tenemos que dar una definición completa de lo que es un coche autónomo, tenemos que ceñirnos a las tareas principales que puede desempeñar o resolver:

- Localización: en todo momento, un coche autónomo debe saber dónde está.
- Escena: debe ser capaz de controlar todo el entorno que rodea el coche, objetos, personas, los otros coches, etc...
- Movimiento: la función principal es que sea capaz de llevarnos de un punto A a un punto B.
- Estado del conductor: debe ser capaz de controlar en qué estado se encuentra el conductor. Si está dormido, si está leyendo, etc...

Básicamente podemos decir que un vehículo autónomo es un automóvil capaz de imitar las capacidades humanas de manejo y control, percibiendo el medio que le rodea y desplazándose en consecuencia. Es decir, un coche en el que el 'conductor' (que ya no es tal) solo tiene que introducir la dirección de destino y despreocuparse de todo lo demás. Dentro de este sector, existen diferentes niveles de autonomía, desde el coche que conocemos todos hasta el coche capaz de hacer largos recorridos incluso repostando de forma autónoma.

El primer organismo que realizó una **clasificación de los distintos niveles de conducción autónoma** fue la *NHTSA* en 2013. La *NHTSA* es la agencia federal que se encarga de velar por la seguridad de las carreteras y de los coches en EE.UU. Aproximadamente podríamos asociarla en España a la labor de la Dirección General de Tráfico, pero con un perfil más técnico.

La *NHTSA* creó una escala con cinco niveles de automatización, de 0 a 4, focalizándose principalmente en las **capacidades del vehículo** de conducirse por sí mismo. El carácter de esta escala de clasificación era el de servir de guía para que la Administración legislara la correspondiente normativa.

También en 2013 se realizó una clasificación en Alemania, por parte del *BASt*, el Instituto Federal de Investigación de Carreteras. En esta también se recogían cinco niveles. Sin embargo no se emplean números para los diferentes niveles, como en la clasificación de la *NHTSA* o de la *SAE* (que explicaremos más adelante).

En la clasificación *BASt* los cinco niveles de conducción automatizada son: solo conductor, asistida, automatización parcial, automatización elevada y automatización completa.

En 2014 la *SAE* realizó su propia clasificación, diferente a la de la *NHTSA*, y también diferente a la de la *BASt*, realizadas ambas el año anterior. En este caso su escala tiene seis niveles de automatización, de 0 a 5, y se focaliza más en el nivel de atención e **intervención del humano** en la conducción.

La *SAE* es la sociedad de ingenieros automotrices. Nació en 1905 en EEUU con la intención de que los técnicos pudieran difundir ideas y conocer novedades, así como para promover estándares en la industria.

Hoy en día se está extendiendo y aceptando cada vez más el estándar creado por la *SAE*, de hecho la *NHTSA* ha adoptado este sistema de clasificación en septiembre de 2016, abandonando el suyo propio.

La *OICA*, Organización Internacional de Constructores de Automóviles, estaba empleando la clasificación de la *BASt*, pero ahora la ha adaptado, introduciendo el nivel 3 de automatización condicionada, y pasando a considerar también 6 niveles de conducción autónoma, como la *SAE*. Los niveles de conducción autónoma aparecen descritos, junto a otras consideraciones y definiciones, en el estándar *SAE J3016*, publicado por primera vez en enero de 2014, y cuya última revisión data del 30 de septiembre de 2016.

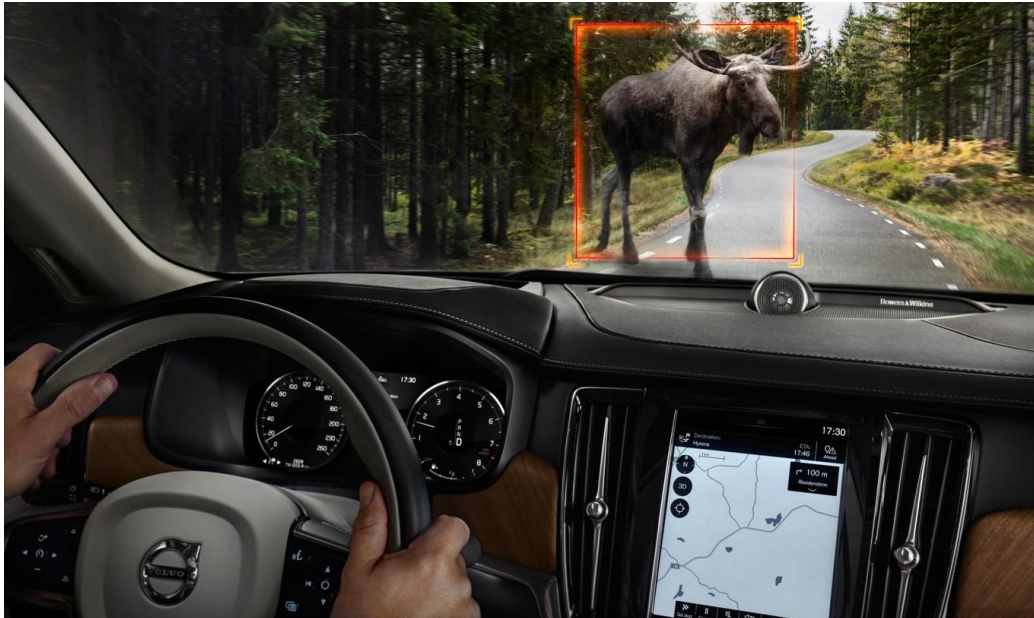


Figura 2.1: En la clasificación se tendrá en cuenta si el sistema es capaz de reconocer todo tipo de elementos, objetos o eventualidades que se puedan producir durante la conducción

De acuerdo al estándar *SAE J3016* de niveles de conducción autónoma, para clasificar cualquier tipo de vehículo hay cuatro aspectos fundamentales para determinar el nivel de automatización del mismo.

- Quién se encarga del **movimiento** del vehículo (el humano o la máquina). El movimiento se diferencia entre longitudinal (o sea, acelerar y frenar) y lateral (o sea, la dirección).
- Quién se encarga de la **detección y respuesta** ante objetos y eventualidades (OEDR, por sus siglas en inglés), mediante sistemas que monitoricen el entorno del vehículo durante la conducción (el humano o la máquina).
- Quién se encarga del **respaldo de la conducción**, es decir, quién actúa en caso de fallo de los sistemas automatizados, o ante la pérdida de las condiciones para su funcionamiento (de nuevo, el humano o la máquina).
- **Condiciones específicas** para el funcionamiento del sistema (horarias, climatológicas, geográficas, tipo de carretera, cantidad de tráfico, velocidad, etc.). Es decir, ¿el sistema de conducción automatizada funciona en todo caso, o solo en ciertas condiciones que lo limitan?

Explicaremos un poco mejor el movimiento: en el funcionamiento del vehículo se distinguen dos movimientos principales.

- Control del **movimiento longitudinal**: esto se refiere a que el sistema de conducción automatizada mantenga una velocidad, se detecte el vehículo que nos precede en el carril, se mantenga la distancia de seguridad apropiada con él y se actúe sobre el acelerador o el freno según sea pertinente. Esto sería por ejemplo lo que hace un sistema de control de velocidad de cruce adaptativo.

- Control del **movimiento lateral**: esto se refiere a que el sistema de conducción automatizada detecte la posición del vehículo con respecto a los límites del carril y sea capaz de actuar sobre la dirección (o los frenos) para mantenerse dentro del mismo apropiadamente, incluso para tomar curvas.

A continuación se exponen los distintos niveles de automatización en la conducción recogidos en la norma *SAE J3016*

Nivel 0: No hay automatización de la conducción.

- Las tareas de conducción dinámica son realizadas completamente por el conductor.

Nivel 1: Asistencia al conductor.

- El vehículo cuenta con algún sistema de automatización de la conducción, ya sea para el control del movimiento longitudinal, o para el control del movimiento lateral, pero no ambas cosas a la vez.
- El conductor sigue realizando el resto de tareas de la conducción.
- El sistema no cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa, y esta tarea recae en el conductor (por ejemplo puede reconocer vehículos, pero no un animal que cruza la carretera).

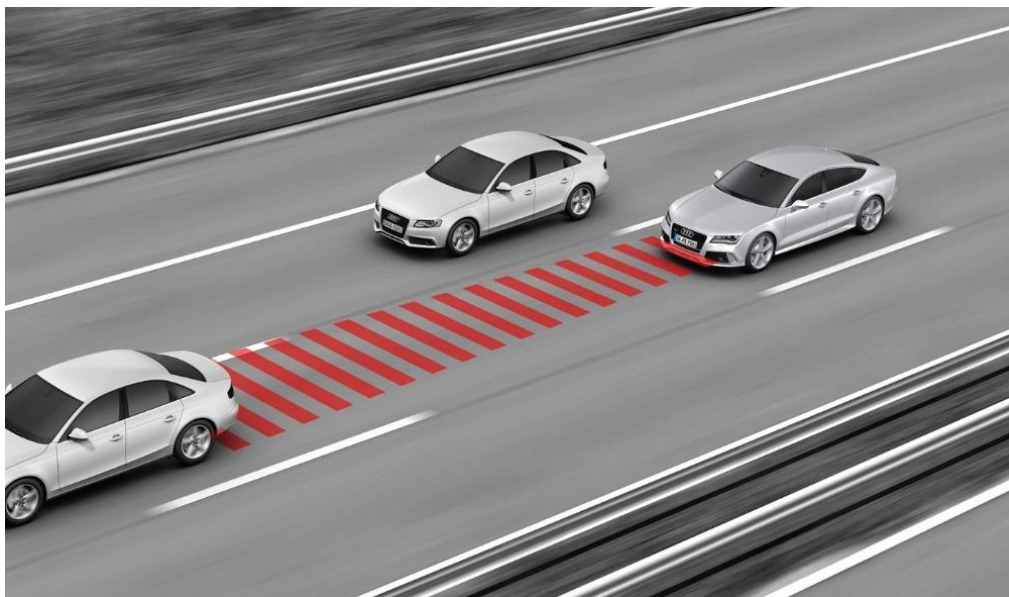


Figura 2.2: Un coche con sistema de control de velocidad de crucero adaptativo sería ya un coche con automatización de la conducción de Nivel 1

Nivel 2: Automatización parcial de la conducción.

- El vehículo cuenta con sistemas de automatización de la conducción tanto para el control del movimiento longitudinal, como para el control del movimiento lateral, ambos a la vez.
- El conductor ya no tiene que realizar tareas relativas al movimiento.
- El sistema no cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa, y de nuevo esta tarea recae en el conductor.
- El funcionamiento del sistema sigue limitado a ciertas condiciones.

- El conductor sigue actuando como tal y debe estar atento a todo lo que sucede.

Nivel 3: Automatización condicionada de la conducción.

- El vehículo cuenta con sistemas de automatización de la conducción tanto para el control del movimiento longitudinal, como para el control del movimiento lateral, ambos a la vez.
- El sistema cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa.
- En este nivel se habla de **usuario preparado para intervenir** si el sistema lo solicita o se produce un fallo o pérdida de las condiciones de funcionamiento, pasando a ser en ese momento conductor.
- El funcionamiento del sistema sigue limitado a ciertas condiciones.
- El conductor actúa como tal solo en ciertas ocasiones.

Para un coche con sistema de conducción automatizada de nivel 3, el estándar SAE J3016 establece que si se produjese un fallo del sistema, este debe **informar al usuario de respaldo con tiempo suficiente** para que pueda reaccionar adecuadamente e intervenir, mediante un mensaje o alerta de petición de intervención en la conducción.

Hasta el nivel 3 de conducción autónoma incluido, sigue existiendo la figura del conductor, aunque a veces lo sea y a veces no, o aunque solo sea el respaldo en caso de fallo.

Nivel 4: Automatización elevada de la conducción.

- El vehículo cuenta con sistemas de automatización de la conducción tanto para el control del movimiento longitudinal, como para el control del movimiento lateral, ambos a la vez.
- El sistema cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa.
- Ya no es necesario un usuario preparado para intervenir si el sistema lo solicita o se produce un fallo. **El propio sistema de automatización de la conducción cuenta con un sistema de respaldo** para actuar en caso de fallo del sistema principal y poder conducir hasta una situación de riesgo mínimo.
- Sin embargo el funcionamiento del sistema sigue limitado a ciertas condiciones y por tanto el vehículo puede encontrarse en situaciones en las que no pueda seguir conduciendo.
- Desaparece la figura del conductor.

Este nivel es en el que se está trabajando en la actualidad. El ejemplo más claro es aquel en el que llegamos a cualquier sitio y el coche es capaz de buscar aparcamiento por sí solo. Aunque parezca algo que sucederá en el futuro, esta tecnología ya está desarrollada por diferentes fabricantes entre ellos Waymo, Tesla y Cruise.



Figura 2.3: El Tesla Model S ya cuenta con el hardware necesario para soportar el famoso Autopilot 2.0 de la marca, nivel 4 de automatización de la conducción.

Nivel 5: Automatización completa de la conducción.

- El vehículo cuenta con sistemas de automatización de la conducción tanto para el control del movimiento longitudinal, como para el control del movimiento lateral, ambos a la vez.
- El sistema cuenta con detección y respuesta ante objetos y eventualidades de manera completa.
- Ya no es necesario un usuario preparado para intervenir si el sistema lo solicita o se produce un fallo. El propio sistema de automatización de la conducción cuenta con un sistema de respaldo para actuar en caso de fallo del sistema principal y poder conducir hasta una situación de riesgo mínimo.
- No hay condiciones específicas limitantes para el funcionamiento del sistema, y por tanto el vehículo podría seguir conduciendo en todo momento o circunstancia.
- No es necesario el conductor.

Tanto para el nivel 4 como para el nivel 5, puesto que no es necesario que haya un conductor, ni siquiera tampoco un usuario de respaldo, se podría **prescindir de los elementos de control y manejo del vehículo**: es decir, tendríamos vehículos sin volante ni pedales.

Para todos los niveles de automatización, incluso en los más altos, el estándar SAE J3016 recoge la posibilidad de que siga habiendo un conductor humano, si así lo desea el fabricante, y que este pueda activar o desactivar el sistema de conducción automatizada a voluntad, aunque técnicamente no sea necesario en ningún momento.

2.2 Historia del coche autónomo

La historia de los coches autónomos es algo todavía por escribir, pasarán años hasta que veamos vehículos de este tipo circulando con normalidad. Pese a todo, el coche autopilotado se empezó a soñar –y a desarrollar de forma primitiva– hace mucho tiempo. En la década de los años 20 una pequeña empresa local de Milwaukee ya hizo una demostración de un coche sin conductor, controlado por radio.

La responsable de la proeza fue *Achen Motor*, distribuidora de coches y camiones de la *White Company*. El vehículo se controlaba desde otro que lo seguía y le enviaba órdenes a través de un sistema de radio, leídas mediante un receptor instalado en el primer coche.

No se supo más del prototipo de *Achen Motor*. Pero más adelante, en la exposición *Futurama* de 1939, en la que se trataba de perfilar cómo sería la vida 20 años más tarde, apareció de nuevo la idea del coche sin conductor.

Norman Bel Geddes, mostró en dicha feria de muestras, patrocinada por *General Motors* para la Exposición Universal de 1939, un vehículo eléctrico que era controlado por un circuito eléctrico embebido en el pavimento de la carretera.

La historia de los coches autónomos le debe también buena parte de sus logros a Alemania y, más concretamente, a **Ernst Dickmanns**. Profesor de la *Bundeswehr University* de Múnich, este experto en inteligencia artificial lideró un equipo que construyó el primer vehículo realmente robotizado. Utilizó visión sacádica (se basa en la visión humana, concentrar la recepción de imagen de alta resolución solo en partes interesantes de la escena), cálculos probabilísticos y computación paralela, que permite resolver muchos problemas simultáneamente.

La Comisión Europea se mostró interesada en el proyecto y realizó una inversión de 800 millones de € para el proyecto *EUREKA Prometheus* que buscaba desarrollar un vehículo autónomo. Como parte del esfuerzo, en 1994 un *Mercedes 500 SEL*, apodado “*VAmP*”, recorre más de 1.000 km en la circunvalación de París, adelantando a coches más lentos y alcanzando una velocidad de 130 km/h.

Un año después, otro modelo puesto a punto por Dickmanns, en esta ocasión un *Mercedes Clase S*, hizo 1678 km en autopista, desde Múnich a Dinamarca y viaje de vuelta. Esta vez el vehículo condujo durante 158 km sin intervención humana y alcanzó los 180 km/h de velocidad.



Figura 2.4: Mercedes-Benz fue el principal fabricante de estos prototipos diseñados por el equipo de Dickmanns

El resto de la historia de los coches autónomos es más conocida. La agencia estadounidense de defensa *DARPA* ha impulsado la investigación en este campo con su competición *Grand Challenge*, mientras que en Europa se han hecho pruebas de este tipo de vehículos fuera de las carreteras. Pero cuando estas máquinas han alcanzado notoriedad ha sido tras el anuncio del **Google Car**, que se construyó utilizando tecnología punta de procesamiento y conexión a Internet. No es la única compañía que trabaja en esta dirección. Marcas como las estadounidenses *Tesla*, *Ford*, *General Motors*, las alemanas *Mercedes*, *Audi* y *Volkswagen* o las japonesas *Nissan* y *Toyota* también cuentan con prototipos.

2.3 Actuales líneas de trabajo

Las líneas de investigación aceleraron su desarrollo en cuanto las empresas privadas del sector comenzaron a ver el potencial económico que conllevaría la culminación de un proyecto como este.

Hay innumerables líneas de trabajo abiertas hoy en día, desde gubernamentales, con el propósito de afianzar la seguridad vial, universitarias, dónde nacieron las primeras investigaciones en el campo, y sobre todo desde empresas del sector privado, las cuales viendo la inminencia de la puesta en marcha de este tipo de vehículos y su futura demanda, deciden comenzar una carrera muy competitiva hasta posicionarse en la vanguardia del sector. Tal es así, que no solo las veteranas firmas automovilísticas se lanzaron a esta carrera, también firmas de electrónica de consumo y tecnologías de la información como *Intel*, *Apple*, *Bosch* y *Delphi*, también desde el sector de transporte urbano de personas como *Uber* y *Lyft*, sin olvidar la gigante tecnológica *Google*, pionera en este campo.

La incursión de las grandes tecnológicas ha sido clave para impulsar el sector.

El papel de *Apple* al principio no estaba nada claro, pero los de Cupertino acabaron defendiendo que ellos van a limitarse a desarrollar software y tecnologías para el coche autónomo, por lo que, por el momento, no parecen interesados en competir con los fabricantes de coches. De hecho, de esto va su proyecto *Titán*.

La estrategia de *Waymo* es muy diferente a la de *Apple*. Y, su ritmo, también. Esta compañía, forma parte del entramado de empresas de *Alphabet*, la multinacional cuya más importante subsidiaria es *Google*, ya está probando, desde Noviembre de 2017, coches autónomos de nivel 4 sin conductor de seguridad. Pero no los está probando en un circuito específico, y, por tanto, en condiciones irreales, sino en las calles de Phoenix (Arizona), en un entorno con tráfico real y bajo condiciones de imprevisibilidad reales. Podríamos afirmar que es la empresa puntera en estos momentos en el sector y la que más confianza genera, debido a su contador cero de víctimas.



Figura 2.5: Prototipo Waymo biplaza, utilizado en condiciones reales de tráfico por la marca.

AMD, otra gigante tecnológica, está desarrollando junto a *Tesla* un microprocesador para inteligencia artificial que esta última incorporará en sus coches, y que, presumiblemente, propulsará a los *Tesla* al nivel 5 SAE de conducción autónoma.

Tesla es quizás la marca que más diverge de los demás prototipos de sus competidoras, ya que es de las pocas firmas que apuestan por no utilizar el conocido, así como demandado, *Lidar*, un sensor de haces láser capaz de mapear con altísima resolución el entorno en tiempo real. A diferencia de esto, la firma de Elon Musk apuesta por visión artificial mediante cámaras de alta resolución y complejos algoritmos de identificación, ayudado también por sensores rádar.

Uber, también en la cabecera de esta carrera, ha desarrollado también un avanzado prototipo con la idea de crear una flota de taxis autónomos y así prescindir del único coste importante con el que cuentan, sus conductores. Aunque en 2018, debido a un atropello mortal de una ciclista, que su prototipo, un *Volvo XC90* no pudo evitar, se vio obligado a detener todo su programa de pruebas sin conductor en entornos de conducción real.

Centrándonos ahora en las casas automovilísticas, podemos encontrar en el mercado muchos modelos con nivel SAE 2, como el *Mercedes-Benz Clase E*, el *Volvo XC60*, los *SEAT Ibiza y León*, el *Volkswagen Golf* y el *Audi A3*, entre muchos otros. Solo unos pocos en circulación, como el *Tesla Model S* puede ser considerado según el estándar como nivel 3.

El nivel 4 de conducción autónoma adquiere un tono aún más serio e impactante. Y es que es esencialmente idéntico al nivel 3, pero con una mejora muy importante: si se produce un error o las condiciones óptimas de funcionamiento desaparecen, debe existir un sistema de respaldo capaz de tomar el control y sostener la conducción automática hasta recuperar las condiciones de riesgo mínimo. Solo se consideran en este nivel los ya explicados prototipos en fase de pruebas en circulación real de las firmas citadas anteriormente.

3 SENSORES Y ACTUADORES

En este capítulo hablaremos de la gran variedad de sensores utilizados a día de hoy, sus ventajas e inconvenientes. Veremos que hay muchas combinaciones posibles para implementar en nuestro sistema, no habiendo unas claramente mejor que otras. Echaremos un vistazo al vehículo propuesto, un *Renault Twizy 45* eléctrico. También discutiremos sobre qué tipo de actuadores serán necesarios para conseguir el correcto funcionamiento autónomo del mismo.

3.1 Sensores

Los sensores son una herramienta imprescindible para el vehículo autónomo, ya que estos le permiten construir el entorno en el que se encuentra, y así poder moverse con seguridad. A pesar de que los vehículos siempre han tenido sensores, la complejidad de los sensores en los vehículos autónomos reside en fusionar dicha información y que esta sea procesada por un ordenador de a bordo, capaz de emitir diagnósticos sobre el estado del vehículo, su entorno, etc., y actuar en consecuencia.

La combinación de sensores, actuadores, algoritmos sofisticados y procesadores potentes son los elementos que hacen posible los vehículos autónomos. Las actividades de este se pueden dividir en tres bloques funcionales:

- Percepción (sensores)
- Toma de decisiones (algoritmos y procesamiento)
- Manipulación (actuadores)

Este primer bloque los dividiremos en dos tipos:

- Sensores propioceptivos: responsables de recoger información del estado del vehículo
- Sensores exteroceptivos: aquellos que recogen información del ambiente y entorno del vehículo

Sensores propioceptivos:

-IMU:

La Unidad de Medidas Inerciales (IMU), consiste en una plataforma fijada al vehículo, la cual consta de tres giróscopos y tres acelerómetros, donde cada par está orientado según los ejes ortogonales X, Y y Z.

Estos sensores informan sobre el movimiento lineal y rotacional de la plataforma, siendo estos datos utilizados para calcular el movimiento y la posición del sistema de referencia local del vehículo (se suelen situar en el centro de gravedad del vehículo)

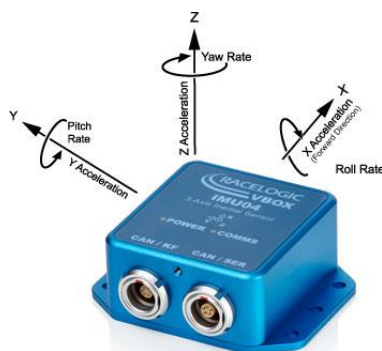


Figura 3.1: Ejemplo de sensor IMU de la firma Racelogic

-GPS:

Es el subsistema que se utiliza para la navegación y guiado del vehículo autónomo. Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de entre 24 y 32 satélites y utiliza el método de la trilateración (método para determinar las posiciones relativas de objetos usando la geometría de los triángulos, de forma análoga a la triangulación.)

Actualmente los sistemas GPS se encuentran en multi-chips, donde solo requieren de alimentación y de una antena. Una vez computa la localización basada en las señales GPS recibidas, proporciona los datos de salida al procesador. La precisión puede ser hasta de centímetros con los módulos más avanzados, aunque los más usados tendrán una media de unos metros de exactitud.



Figura 3.2: módulo GPS de Linx Technologies, puede adquirir datos de hasta 48 satélites simultáneamente.

Aunque el GPS es esencial para la localización de los vehículos autónomos, no es suficiente para ello, ya que la señal se bloqueará previsiblemente en túneles, cañones, con interferencias de radio y otra serie de factores. Por ello es necesario suplementar esa información con otros sensores.

-SENSOR VELOCIDAD DE RUEDA:

Estos sensores obtienen la velocidad de las ruedas a partir de la medición de las aceleraciones tanto en el eje de giro como en el vertical. Posteriormente, se comunica esta información a los sistemas de seguridad del vehículo, que pueden detectar si el vehículo vuelca utilizando el índice de variación del ángulo y algoritmos que lo prevén.

Sensores exteroceptivos:**-LIDAR:**

El sensor LIDAR (Light Detection and Ranging) es un dispositivo que mide la distancia mediante la iluminación de un objetivo con luz láser. Es capaz de mapear de forma muy precisa su entorno mediante haces de luz, calculando incluso velocidades relativas al propio sensor.

La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

Empresas como *Google* y *Uber* fueron pioneras en la utilización de esta tecnología, debido a su gran capacidad para generar información, su uso se ha extendido en todos los proyectos relacionados con conducción autónoma, lo que ha generado problemas de abastecimiento, pese al precio de estos dispositivos que alcanza en ocasiones la decena de miles de dólares.

Para obtener la nube de puntos del terreno mediante escáner láser aerotransportado, el módulo debe realizar dos movimientos combinados, una barrida longitudinal y otra transversal, posible mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner. Para obtener las coordenadas de la nube de puntos se necesita la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento, para esto el sistema se suele apoyar en un GPS diferencial y un sensor inercial de navegación. El resultado son decenas de miles de puntos por segundo.

Se trata de la unidad primaria de visión en la que apuestan la mayoría de fabricantes para su vehículo autónomo dada la capacidad de generar información 3D precisa del entorno. Haciendo uso de esta información, el procesador podrá implementar identificación de objetos, predicción de colisiones, etc.



Figura 3.3: Dispositivos LIDAR de diferentes capacidades de la firma Velodyne

Aunque parece una gran opción, también cuenta con algunas desventajas a tener en cuenta a la hora de decidir en qué sensores se apoyará el sistema autónomo:

- La tecnología aún no está profundamente desarrollada como para ser instalada en millones de coches, son necesarias muchas más pruebas en diferentes condiciones de luz y temperatura, para ofrecer las garantías necesarias.
- Cuenta con un tamaño relativamente grande, aunque *Waymo* parece estar consiguiendo unidades más compactas en sus prototipos biplaza. Este factor además de afectar a la estética (la mayoría de LIDARS se apoyan en una subestructura independiente en el techo), también afecta a la aerodinámica del vehículo.
- Su alta demanda, los fabricantes no consiguen atenderla, actualmente pueden tardar hasta 6 meses en recibir una unidad. Por este motivo las empresas están diseñando sus propios sensores LIDAR, *Waymo*, por ejemplo, tiene desarrollados tres sensores diferentes para tres distancias distintas.
- Son muy caros, cada unidad puede costar miles de euros, y un coche debería contar con varios si es de tamaño mediano. Es de nuevo causa del problema oferta-demanda, así como de la falta de I+D.

-RADAR:

La tecnología Radar hace uso de ondas de radio para determinar el rango, ángulo o velocidad de objetos, los hay de corto o largo alcance (27-77 GHz).

Los de corto alcance se utilizan para obtener información de las vecindades del coche, en un rango de aproximadamente 30 metros. Se suelen utilizar a bajas velocidades.

Por el contrario, los de largo alcance, cubren distancias de aproximadamente 200 metros, posibles a velocidades altas.

Generalmente, los sensores radar obtienen información de los objetos cercanos, como por ejemplo la distancia a la que se encuentran, su tamaño, o la velocidad que llevan en caso de que el objeto esté en movimiento. La gran precisión de estos sensores, junto a su capacidad de trabajar correctamente en condiciones meteorológicas adversas, hacen de ellos unos sensores de uso permanente en los vehículos autónomos. Funcionan con la misma efectividad en condiciones de luz como de oscuridad, y los sensores de 77GHz recogen información de forma más precisa que los LIDAR en situaciones de niebla, lluvia o nieve. Al igual que estos, no detectan color,

contraste ni caracteres.

Los radar son sensores de tamaño reducido y bajo coste, estos ofrecen, como se ha comentado, un buen rango de funcionamiento, pero la resolución que ofrece no es tan buena como la de otros sensores.

-ULTRASONIDOS:

Sensores basados en la emisión de ondas de sonido ultrasónicas que detectan la vuelta de estas ondas al chocar con el entorno y así determinar la distancia que lo separa. Estas ondas viajan a frecuencias mucho más altas que las de radio, superiores también a las audibles por el oído humano.

Se trata de una tecnología útil para aplicaciones de rango bajo a velocidades bajas. Aunque el rango de acción sea algo pobre, puesto que las ondas de sonido son lentas, el rango de precisión es de incluso milímetros, lo que lo hace idóneo para el mapeo en tres dimensiones de alcance corto, por ejemplo, en una subrutina de aparcamiento automático.

Estos sensores funcionan independientemente del nivel de luz que haya, y funciona correctamente en condiciones de nieve, lluvia o niebla.

Son de pequeño tamaño y muy bajo precio. Se suelen utilizar bastantes para cubrir los 360° del coche (se suele denominar cinturón de ultrasonidos).

-ELEMENTOS DE VISIÓN:

Los sistemas basados en cámaras se utilizan para detectar caracteres, señales, las marcas de los distintos carriles, pero también, mediante sofisticados algoritmos, detectar objetos, prever sus futuras trayectorias y conocer su velocidad relativa.

Dependiendo de las necesidades, las cámaras pueden ser situadas en diferentes sitios: en los espejos retrovisores, puertas traseras, luna frontal, etc.

Tienen un rango más amplio que el resto de sensores, pero solo en el caso de que haya condiciones adecuadas de luz. De hecho, su rango se deteriora con el nivel de luz, al igual que ocurre con la visión humana.

El hecho de que estos sistemas detecten color, contraste y reconozcan caracteres cubre el hueco del resto de sensores mencionados previamente, ya que no proporcionan ninguna de estas características.

Los sistemas de reconocimiento de imagen mediante cámaras son bastante baratos y de pequeño tamaño, además su resolución es bastante alta.



Figura 3.4: Cámaras Mobileye, marca adquirida por Intel destinada a la conducción autónoma

Comparativa de los distintos sensores en rango de acción ante diversas condiciones (valores orientativos, en metros)

Condiciones del entorno	Claridad	Oscuridad	Condiciones meteorológicas adversas
Ultrasonidos	~10	~10	~10
LIDAR	~200	~200	~50
Radar	~150	~150	~120
Óptica	~300	~100	~50

Tabla 3.1: Rango de acción de los sensores estudiados (metros)

Se puede observar, como se ha comentado anteriormente, que los elementos de visión tienen el mayor alcance y precisión cuando se encuentran en las condiciones idóneas de claridad, pero se degradan rápidamente ante condiciones adversas.

Vemos también que el radar, aunque no sea el mejor sensor en todas las condiciones posibles, es el que menos se degrada en el alcance necesario para la detección de otros vehículos y objetos a altas velocidades (mantiene una distancia de seguridad).

Por otra parte, el LIDAR es mejor que el radar hasta que se dan situaciones meteorológicas adversas.

-Reflexión inicial:

Tras indagar en los sensores que deberá montar un vehículo que pretenda conducir autónomamente, podemos confluir en una primera conclusión, no es viable confiar la seguridad del vehículo a un único sensor o incluso dos. La solución residirá en la efectiva combinación de diferentes sensores, y en la correcta fusión de la información generada por estos. Cada sensor tiene sus puntos fuertes y débiles, y la comprobación de que la información recibida por cada uno concuerda con la de los demás evitará tanto falsos negativos como falsos positivos.

Viendo las distintas apuestas de las firmas en la actualidad, está claro que **no existe una única combinación perfecta**, sino que cada combinación tendrá una serie de compromisos, teniendo en cuenta distintos precios, para obtener distintas soluciones más o menos efectivas.

Una forma de minimizar el fallo de estos sensores, como se ha comentado, es fusionando los puntos fuertes de estos sensores y crear múltiples patrones de datos que se solapan para asegurar que la información procesada de los sensores es lo más precisa posible.

3.2 Actuadores motrices

3.2.1 CONTROL LATERAL:

Introducción al sistema de dirección en automóviles

El sistema de dirección o simplemente la dirección de un automóvil tiene la función de orientar la posición de las ruedas directrices del vehículo para que éste siga una trayectoria determinada. Este sistema está estrechamente relacionado con el de la suspensión del vehículo, debido a que ambos tienen la misma terminación (las ruedas del vehículo) por lo que al realizar el análisis constitutivo de uno de ellos es difícil obviar los elementos del otro.

Debido a que ambos pueden componerse de diferentes mecanismos, esto da lugar a la existencia de diferentes tipos de suspensiones y de direcciones en el mercado. Puesto que no es necesario para el desarrollo de este TFG ahondar en este tema, en lo sucesivo se tratará de realizar una identificación de las piezas comunes a todos los tipos.

Identificación de los componentes principales

Se sabe que el vehículo cuenta con una caja de dirección de tipo piñón-cremallera y que no cuenta con dirección asistida. A continuación, se describen los principales componentes que forman parte del sistema de dirección y el efecto que tienen sobre el mismo:



Figura 3.5: Identificación de los componentes del sistema de dirección del vehículo

El primer elemento que se encuentra en la dirección y que sirve para guiar al vehículo es el **volante**. Mediante el control de su posición angular el conductor define la trayectoria que describe el vehículo. Sin embargo, ocurre que la relación entre la variación de este ángulo y el cambio en la dirección del vehículo no es lineal debido a varias causas, entre ellas, al comportamiento elástico de muchos de los elementos del chasis y de los neumáticos y, sobre todo, a la cinemática del mecanismo.

Unido al volante se encuentra la **columna o árbol de dirección**, cuya principal función es comunicar el par ejercido sobre el volante al resto de componentes y formar parte de la seguridad pasiva del coche. Para ello, suele dividirse en dos o más tramos de forma que permita la deformación de la misma en caso de accidente, o para permitir distintas posiciones del volante. Al emplearse una junta cardan para unirlos, la cual permite pequeñas desalineaciones entre ellos, pueden ocurrir fenómenos no lineales en la transmisión del movimiento.

A la columna de dirección se encuentra conectada la **caja o mecanismo de dirección**, donde suele producirse relación de desmultiplicación que reduce la fuerza a aplicar sobre el volante para girar las ruedas. En los sistemas

de piñón-cremallera, los más usuales en vehículos de pasajeros, una rueda dentada unida al árbol engrana con una barra también dentada para transformar el movimiento circular en lineal.

Junto con el eje delantero y la caja de dirección, los **brazos de dirección** son eslabones del mecanismo de cuatro barras trapezoidal encargado de transferir el movimiento a las manguetas de la suspensión, para que pivoten alrededor de un eje mientras se ocupan de dar soporte a las ruedas.

Para finalizar, y aunque nuestro vehículo objetivo no la traiga instalada, se propone actuar en la dirección del vehículo mediante un motor y acople de dirección asistida. Aunque existen tres tipos en función de la energía utilizada y del sistema de control —a saber, hidráulica, electro-hidráulica y eléctrica— todas tienen en común la misión de reducir la fuerza aplicada por el conductor cuando se desean torcer las ruedas. En el caso de la dirección asistida eléctrica, la de mayor interés en este trabajo, se emplea un sensor de par sobre la columna de dirección para medir el momento ejercido sobre el volante. Éste retransmite la información a una centralita que procesa los datos y envía una señal eléctrica adecuada al motor de la dirección asistida, produciendo un par adicional de sentido igual al giro del volante. El motor suele acoplarse a alguno de los elementos intermedios del sistema de dirección: la columna, el piñón o la cremallera.

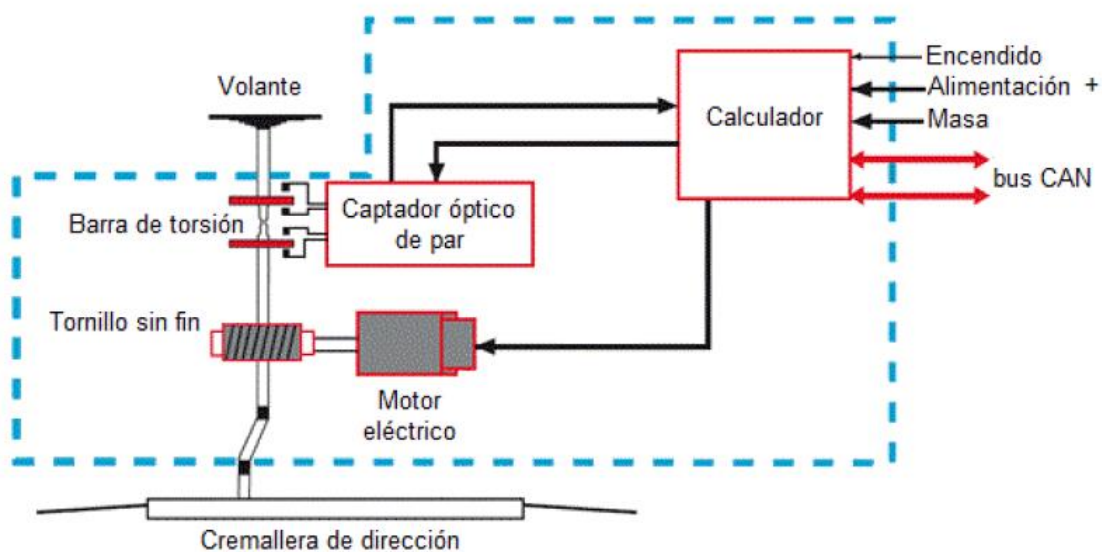


Figura 3.6: Esquema de una DAE (Dirección Asistida Eléctrica)

Viendo este sistema, y dado las pequeñas dimensiones de nuestro vehículo objetivo, así como su bajo peso, podríamos optar por un sistema DAE convencional como actuador motriz de nuestra dirección.

3.2.2 CONTROL LONGITUDINAL:

Como ya se ha explicado anteriormente el objetivo del control longitudinal es resumidamente conseguir una velocidad determinada y mantenerla, aumentarla o disminuirla según órdenes de nuestro controlador.

Pensemos por tanto en que lo que hay que controlar en el fondo será la frenada y el par de tracción que impulsa nuestro vehículo. El coche al ser eléctrico nos facilita que el par de tracción sea instantáneo y preciso, a un voltaje de entrada habrá un par de tracción de salida, el acelerador por tanto será electrónico también y llevará un potenciómetro en el pedal y una controladora de motor *ecu* instalados de serie, por lo que no necesitaremos actuadores adicionales en el trabajo de impulsión del vehículo.

El sistema de frenado, al ser hidráulico si deberemos pararnos algo más. Hagamos un recordatorio sobre cómo funcionan los sistemas de frenado convencionales para ver cómo podemos actuar sobre él.

Introducción sistemas de frenado:

El sistema de frenos de un vehículo tiene el objetivo de conseguir una rápida deceleración en el movimiento de este, para conseguirlo se realiza una fuerza que actúa en contra del movimiento, normalmente esta fuerza se efectúa generando un fuerte fricción en las ruedas y transformando la energía cinética que disponía el vehículo, en calor disipado en el ambiente.

La mayor parte de los frenos por fricción se basan en el rozamiento entre dos superficies, una que forma parte del sistema de frenado, y otra que forma parte del eje o de las ruedas.

En vehículos eléctricos también es posible realizar un frenado con los llamados frenos electromagnéticos, que varían la excitación del motor haciendo que este disminuya la velocidad.

Otros tipos de frenos utilizados sobretodo en vehículos eléctricos son los regenerativos o KERS (en inglés kinetic energy recovery system), que consiguen transformar la energía cinética en energía eléctrica, evitando así las pérdidas en formas de calor que tienen habitualmente los mecanismos de frenos. Esta energía eléctrica además se puede utilizar para otros sistemas del vehículo, lo cual resulta muy útil.

Tipos de frenos:

Los dos mecanismos de frenos más utilizados en vehículos son los frenos de disco y los frenos de tambor, de los cuales se hablará a continuación, aunque también existen otros tales como los frenos de cinta, menos utilizados.

Frenos de Disco:

Para utilizar este mecanismo de frenado, las ruedas tienen que disponer de un disco que gira solidariamente con ellas, cuando el freno es accionado, unas pastillas que están fijas (no giran) se cierran sobre el disco provocando una fricción. La superficie de las pastillas tiene un alto coeficiente de rozamiento para que su efecto sea mayor.

Este rozamiento provoca la transformación de la energía cinética en calor repartido en el disco y en las pastillas, que será disipado poco a poco en el ambiente debido al efecto de la convección con el aire.

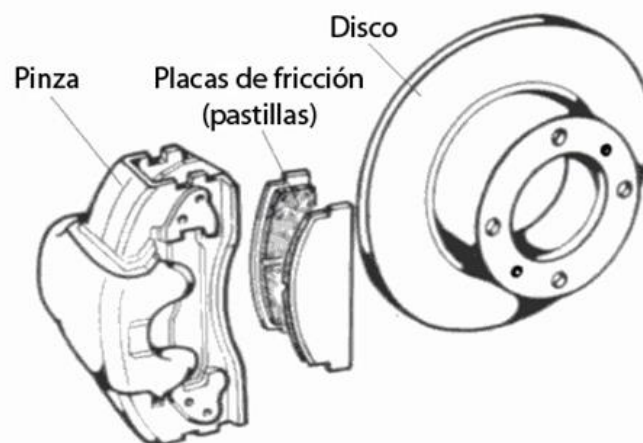


Figura 3.7: Esquema de unos frenos de disco

El disco es el elemento con forma circular que gira solidariamente a la rueda, normalmente están realizados de acero, y pueden tener agujeros para aumentar la superficie en contacto con el aire y por tanto mejorar la disipación de calor.

La función principal de las mordazas o pinzas es soportar las pastillas de freno, la correcta posición de las mordazas es muy importante, debido a que si están mal colocadas podrían ejercer rozamiento sobre el disco cuando no se desea, provocando un frenado constante y una considerable pérdida de energía continuamente.

Las mordazas pueden ser de dos tipos, fijas o flotantes, en el caso de las fijas solo se mueven las pastillas para contactar con el disco, y en las flotantes tanto la mordaza como las pastillas se mueven para conseguir ese contacto.

Los pistones o cilindros se encuentran colocados en las mordazas y son los encargados de que las mordazas presionen las pastillas de frenos contra el disco, para ello son impulsados por el líquido de frenos del sistema hidráulico.

Frenos de Tambor:

Estos frenos consisten en un tambor que está conectado a la rueda y gira solidariamente con ella, y un mecanismo interior al tambor, con unas zapatas que al accionarse el freno se mueven y contactan con el tambor, provocando así la fricción que frena al vehículo.

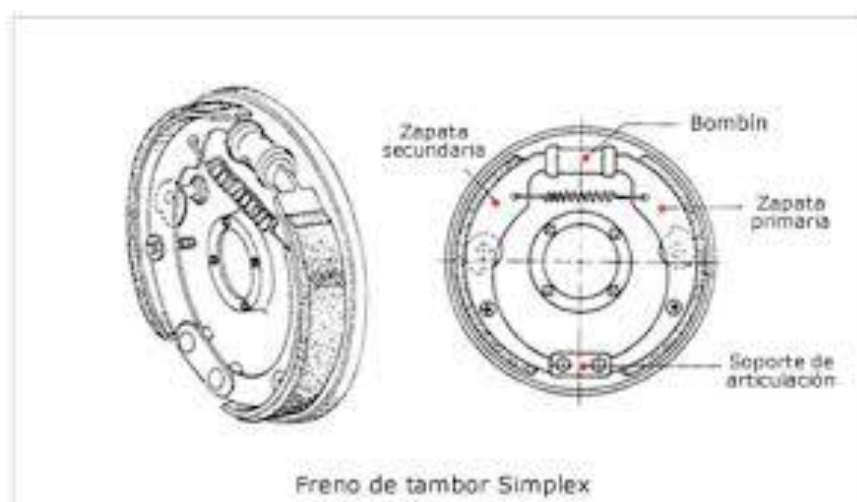


Figura 3.8: Esquema de unos frenos de tambor

El mayor problema de los frenos de tambor es que se generan altas temperaturas y tienen problemas de disipación de calor, por lo tanto al ser metálicos pueden deformarse y provocar un mal funcionamiento de los frenos.

Los frenos de tambor tienen la ventaja de estar más protegidos contra el agua, barro u otros elementos, por lo tanto para algunas condiciones de funcionamiento pueden ser mejores.

Habitualmente los frenos de tambor son utilizados en las ruedas traseras para ahorrar costes (son más baratos que los frenos de disco). Mientras que en las ruedas delanteras se utilizan frenos de disco por su mejor funcionamiento.

Sistema hidráulico:

El freno de servicio dispone de un sistema hidráulico de accionamiento para hacer conseguir que el vehículo frene cuando el conductor pulsa el pedal de freno. Este sistema consiste en un circuito de mangueras o tubos entre el pedal de freno y los frenos, a este circuito se le considera el circuito principal de frenos.

El sistema es básicamente un amplificador de la fuerza que el conductor aplica sobre el pedal, transmitiéndola a los frenos para que ejerzan una fuerza en contra del movimiento de las ruedas. Su funcionamiento se basa principalmente en la transmisión de la presión en el interior de los conductos.

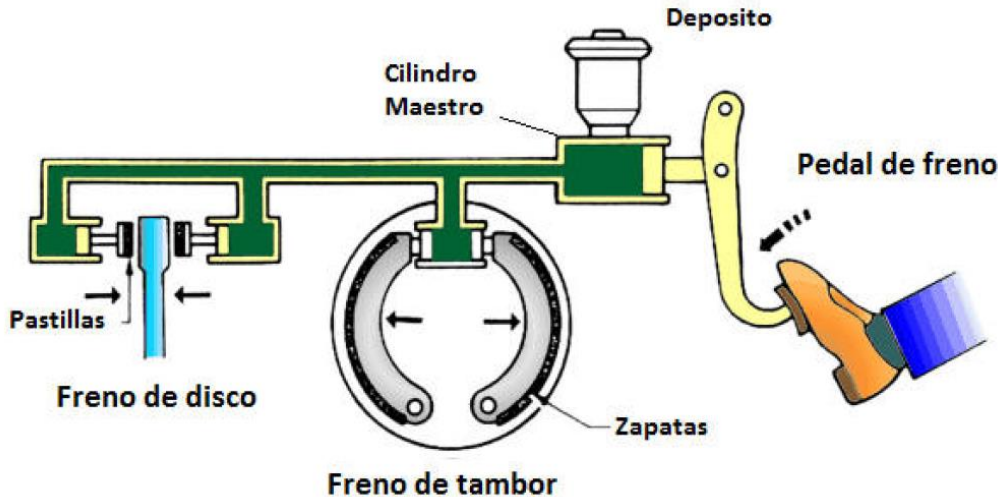


Figura 3.9: Esquema del sistema hidráulico de frenado convencional

Un sistema hidráulico dispone de varios elementos importantes, el primero de ellos es el pedal de freno, que es el elemento que está expuesto al conductor para que este le pulse cuando quiera frenar.

El cilindro maestro, cilindro principal o bomba, es un cilindro colocado al comienzo del sistema hidráulico y que está conectado al pedal de freno, de forma que cuando el conductor pisa el pedal, un pistón se mueve en el interior del cilindro maestro impulsando el líquido de frenos que se mueve en dirección a los frenos. Dependiendo de la sección interior del cilindro la fuerza transmitida será mayor o menor.

Además cerca del cilindro maestro se debe colocar un pequeño depósito que contiene líquido de frenos, para que en caso de pequeñas pérdidas de líquido en el sistema, la potencia de frenada no se vea afectada y el sistema funcione adecuadamente.

Otro elemento principal son las mangueras o tubos que transmiten el líquido de frenos hasta los frenos situados en las ruedas, son una parte indispensable y dependiendo de su sección transmitirán diferentes fuerzas.

Los últimos elementos son los propios frenos de los que ya se ha hablado anteriormente.

Sabiendo todo esto, ya podemos determinar qué tipo de actuador necesitaremos para controlar la frenada del vehículo. Al ser hidráulico el sistema está claro que la solución tendrá que ser del mismo tipo.

Para traducir la señal eléctrica que nos dará el sistema de control en una presión en el circuito de frenos, se utilizará una **bomba electrónica**, la cual se elegirá en función de la potencia necesaria.

Lo más complejo será conseguir hacer funcionar el circuito hidráulico con ambas formas de accionamiento (bomba electrónica y pedal de freno), ya que por seguridad convendría mantener la acción manual de frenado.

Para hacer eso se ha decidido colocar la bomba electrónica en paralelo a la bomba del sistema original de frenos, y unir ambas mediante una válvula especial en forma de 'T' que hace que puedan funcionar ambas formas de accionamiento a la vez.

Esta válvula dispondrá de una membrana o una bola que se moverá para dejar el paso libre a uno de los dos conductos de 'entrada', a cuál de los dos conductos deje paso dependerá de la relación de presiones que estén ejerciendo en ese momento, de forma que tenga prioridad el accionamiento mediante el pedal de freno.

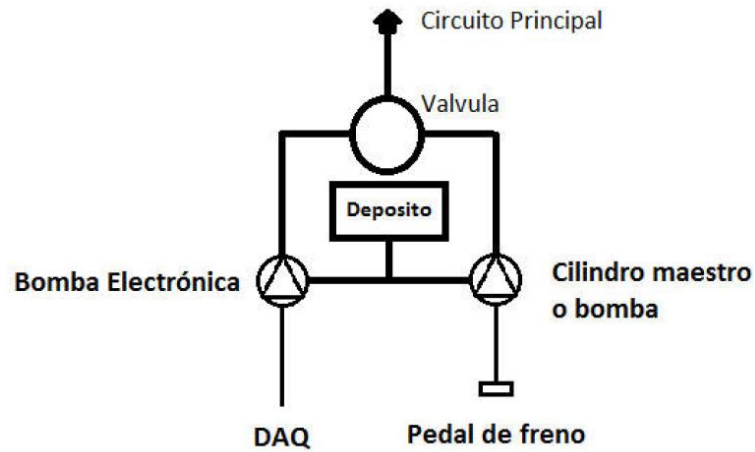


Figura 3.10: Sistema de frenado modificado para poder ser controlado autónomamente

Con la entrada *DAQ* (adquisición de datos) nos referimos a la señal salida del controlador.

Respecto a la bomba electrónica que será elegida para nuestro sistema deberá tener unas condiciones de presión máxima similares a las de la bomba mecánica que acciona el pedal de freno. Dejamos en manos de futuros trabajos la elección definitiva de la bomba electrónica a falta de experimentos concluyentes.

3.3 Vehículo propuesto

El vehículo propuesto en este proyecto es un *Renault Twizy* eléctrico. Es un coche biplaza de propósito totalmente urbano aunque con posibilidad de pequeños desplazamientos por carreteras más rápidas.

Cuenta con un motor eléctrico de 8 kW (11 CV) y que consiguen unos 57 N·m de par motriz. La batería es de iones de litio de 6,1KWh. Cuenta con una autonomía también modesta dentro del sector de 80/100 km según tipo conducción, carga, etc. La carga se realiza mediante una toma *Schuko* para conectar a enchufe doméstico 220V/10A.

Cuenta con un peso en vacío de 473kg, con una carga útil de 110kg y un peso máximo admisible de 680kg. Monta un chasis tubular de seguridad, suspensión independiente y tracción trasera.

No cuenta con asistencia en la dirección, ni sistemas ABS ni ESP. Lo que hace que no sea un vehículo idóneo para su automatización, debido a los gastos y dificultades que conllevan montar una dirección asistida que no viene de serie y ponerle a punto en lo que a tecnología se refiere.

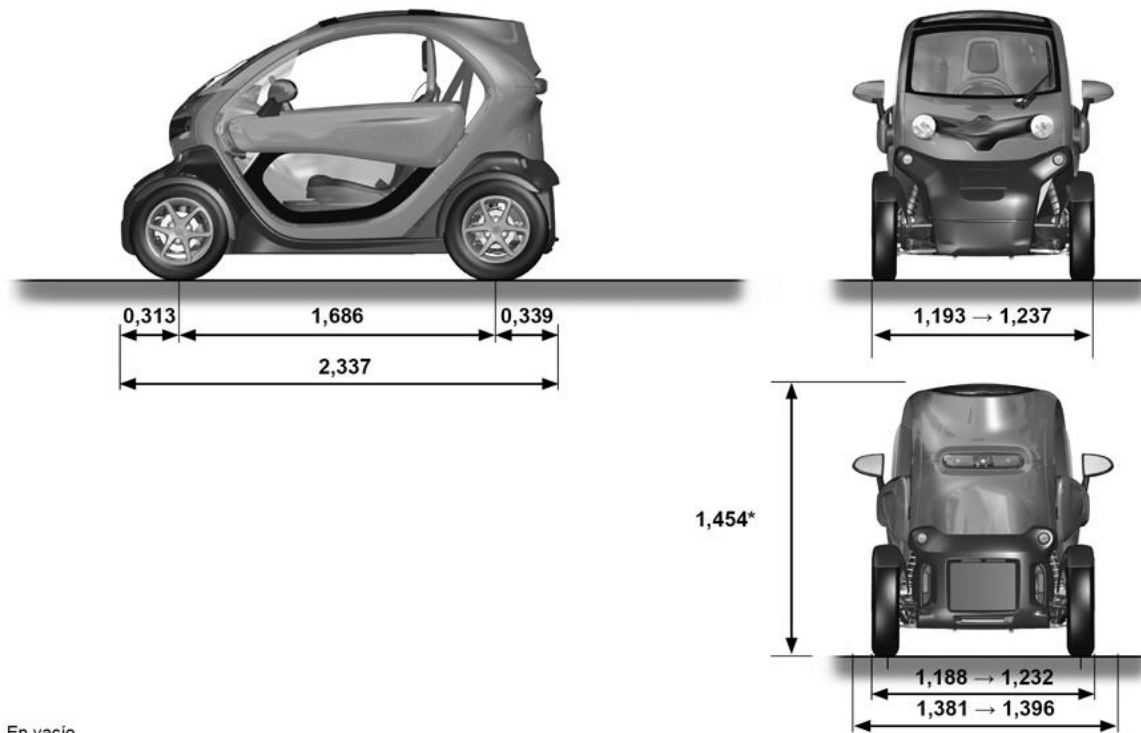


Figura 3.11: Dimensiones del vehículo presentado (en metros)

4 MODELADO

En el siguiente capítulo discutiremos el modelo matemático tanto lateral (dirección) como longitudinal (velocidad) de nuestro sistema. También se abordará la elección de parámetros para su correcta comprobación y simulaciones posteriores

4.2 Control longitudinal

El modelo del vehículo servirá para la simulación por ordenador del comportamiento del vehículo ante las diferentes entradas y perturbaciones del sistema, en este caso el modelo será un modelo longitudinal, despreciando así las fuerzas y movimientos laterales del vehículo debido a que apenas afectan para el cálculo de la velocidad y movimiento longitudinal, a las velocidades a las que nuestro vehículo se va a desplazar, que serán velocidades menores que 50 km/h.

Además se simplificará utilizando un modelo de dos ruedas, gracias a que en el movimiento longitudinal no habrá diferencia entre ambas ruedas de un mismo eje, por lo que eliminaremos la distinción entre rueda derecha e izquierda.

El modelo aquí presentado está basado en su mayoría en el trabajo de Michael Short, Michael J. Pont and Qiang Huang 'Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems: Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics' citado en la bibliografía. En él se trabaja con un bloque motor de combustión interna, a diferencia de este proyecto que trata un motor eléctrico.

Se muestra en la siguiente figura el modelo del coche en una primera simplificación a dos ruedas. A continuación se tomarán más simplificaciones en un intento de hacer más sencillo el modelo, por ejemplo, se tomará inclinación nula de la carretera y despreciaremos la velocidad del viento.

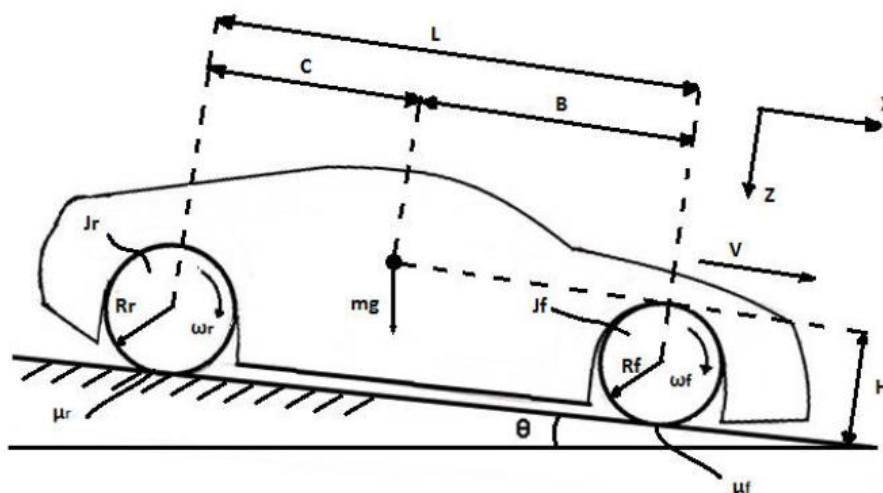


Figura 4.1: Modelo simplificado a dos ruedas con principales parámetros físicos a utilizar

El vehículo de la figura está circulando en una carretera recta, con pendiente θ , en la dirección del eje X, a una velocidad V .

Los parámetros mostrados en la figura son los siguientes:

- m : Masa de todo el vehículo.
- g : Aceleración de la gravedad.
- V : Velocidad a la que se desplaza el vehículo en la dirección X.

- L : Distancia entre ejes.
- B : Distancia entre el eje delantero y el centro de gravedad del vehículo.
- C : Distancia entre el eje delantero y el centro de gravedad del vehículo.
- H : Altura del centro de gravedad.
- θ : Pendiente de la carretera.
- ω_f y ω_r : Velocidad angular de las ruedas delanteras y traseras respectivamente.
- R_f y R_r : Radio de las ruedas delanteras y traseras respectivamente.
- J_f y J_r : Momentos de inercia del eje delantero y trasero respectivamente.
- μ_f y μ_r : Coeficientes de rozamiento de los neumáticos delantero y trasero respectivamente.

Para realizar el modelo se ha utilizado el programa *MATLAB-SIMULINK*, con el cual se ha creado un diagrama de bloques, **las entradas son los porcentajes de accionamiento de los pedales de aceleración y freno, y las salidas son la velocidad y la posición en cada momento.** Las perturbaciones como la velocidad del viento o la pendiente de la carretera también está incluidas, aunque como se ha comentado, se anularan para la simulación.

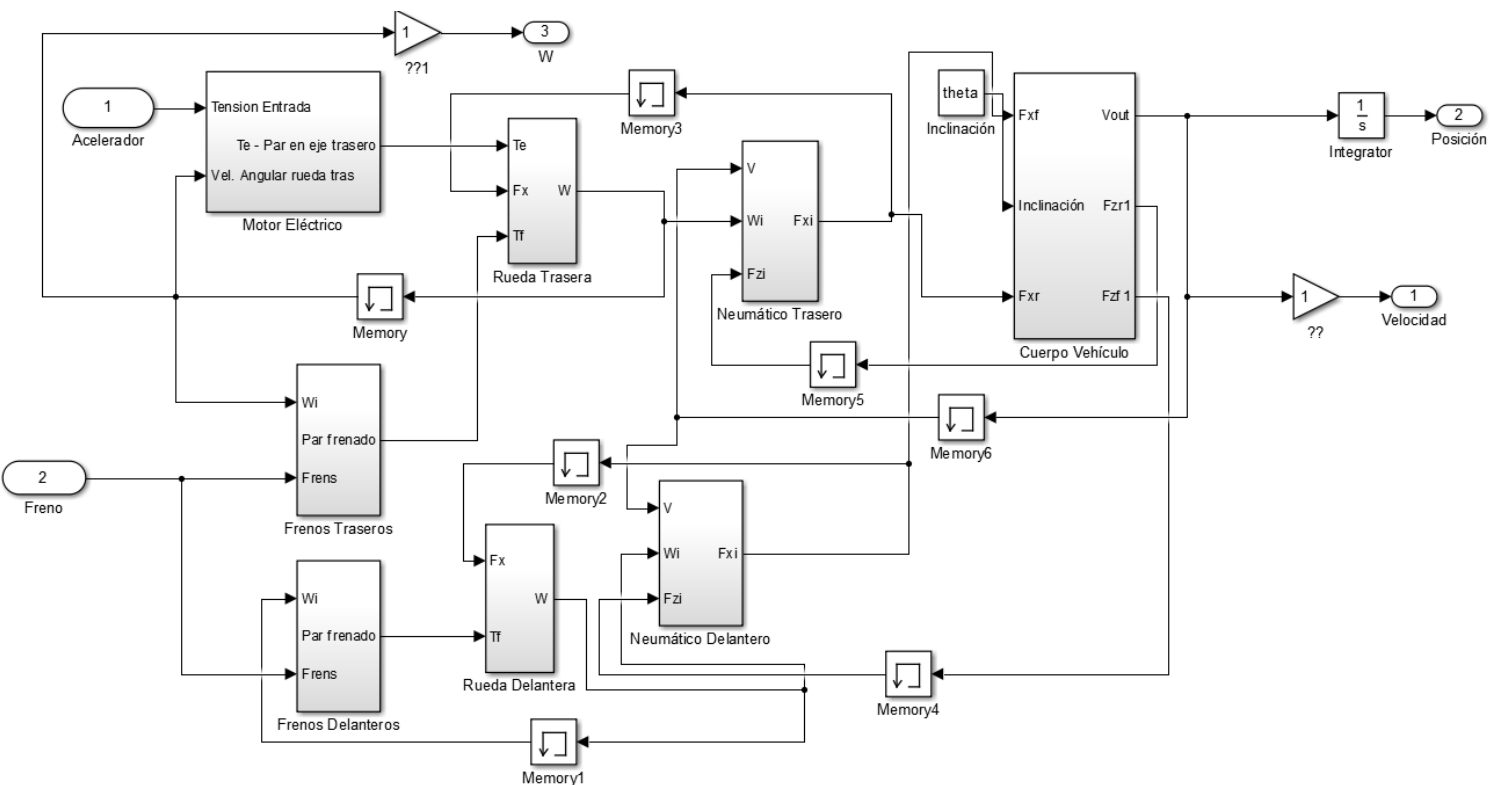


Figura 4.2: Modelo general del control longitudinal, esquematizado en diversos bloques

A continuación se definen los diferentes bloques o partes que se han separado para crear el modelo.

Bloque ‘Cuerpo vehículo’

Este bloque contiene el equilibrio de fuerzas longitudinales que provocan el movimiento del vehículo, la ecuación que lo define está basada en la **segunda ley de Newton**, obteniendo así la aceleración del vehículo.

Además también se calculan las fuerzas verticales que soportan cada eje (Fz_f y Fz_r).

La velocidad del viento y la pendiente de la carretera son parámetros de entrada de este bloque, al igual que las fuerzas de rozamiento de los neumáticos con la carretera que básicamente son las principales responsables del movimiento del vehículo. También será necesaria la velocidad del vehículo, ya que para calcular la velocidad

relativa entre el aire y el vehículo se necesitan ambas velocidades.

La ecuación para el cálculo de la aceleración es la siguiente, y se basa en la segunda ley de Newton:

$$A = \frac{-F_x + mg \cdot \sin(\theta) - F_v - F_r}{m}$$

Siendo F_x la suma de las fuerzas de contacto de los neumáticos multiplicada por 2, para contar ambas ruedas por eje, además será negativa debido a que el deslizamiento también lo será, como veremos posteriormente. F_v es la fuerza resistente del viento y F_r la fuerza resistente de rodadura, definidas a continuación:

$$F_x = 2(F_{xf} + F_{xr})$$

$$F_v = \frac{1}{2} \rho \cdot A_v \cdot C_d \cdot (V + V_v)^2$$

$$F_r = mg \cdot C_r \cdot V$$

Siendo A_v el área frontal del vehículo, ρ la densidad del aire, C_d el coeficiente de fricción con el viento, y C_r el coeficiente de rodadura.

Una vez obtenida la aceleración se integra para obtener la velocidad V del vehículo, y si se desea obtener la distancia recorrida se utiliza otro integrador.

Para calcular las fuerzas verticales en cada eje usamos las siguientes formulas:

$$F_{zf} = mg \cdot \left(\frac{C}{L} \cos(\theta) + \frac{H}{L} \sin(\theta) \right) - \frac{H}{L} \cdot m \cdot A$$

$$F_{zr} = mg \cdot \left(\frac{B}{L} \cos(\theta) - \frac{H}{L} \sin(\theta) \right) + \frac{H}{L} \cdot m \cdot A$$

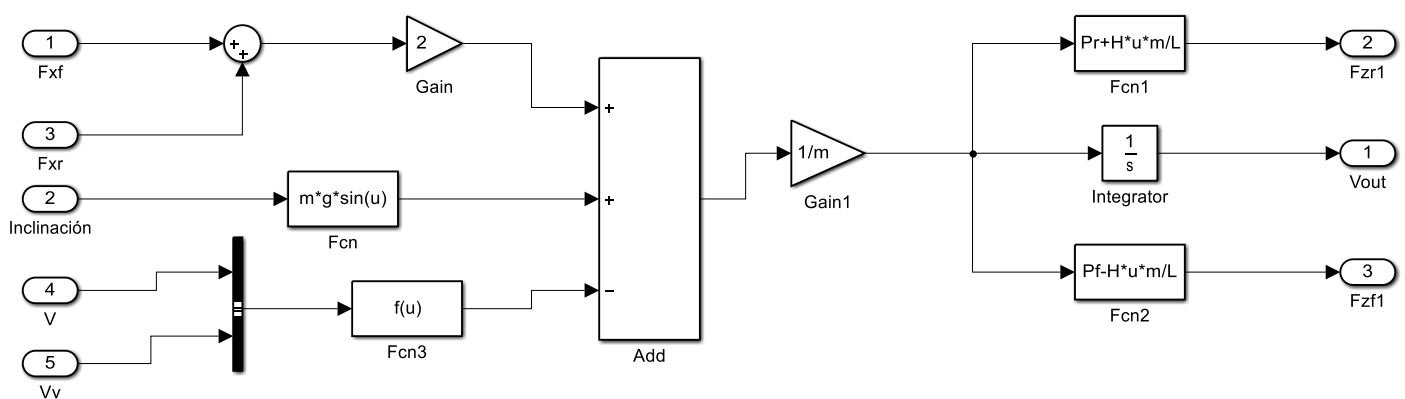


Figura 4.3: Bloque 'Cuerpo Vehículo'

Bloque 'Neumáticos'

El rozamiento de los neumáticos con el suelo es el causante de las fuerzas que hacen moverse longitudinalmente al vehículo, estas fuerzas dependen de la fuerza vertical que soportan las ruedas, y del coeficiente de rozamiento del neumático con la carretera.

Este coeficiente de rozamiento no es constante, varía en función del deslizamiento de los neumáticos con el asfalto, y de las condiciones del asfalto (Seco, húmedo, nevado o con hielo).

El deslizamiento viene definido por la ecuación:

$$S_i = \frac{V - \omega_i \cdot R_i}{\text{Max}\{V, \omega_i \cdot R_i\}} \quad i = f, r$$

Donde V es la velocidad del cuerpo del vehículo, ω_i es la velocidad angular de la rueda de la que se calcula el deslizamiento y R_i su radio.

Para calcular el coeficiente de rozamiento se utilizara la ecuación de Pacejka, obtenida experimentalmente para diferentes condiciones del asfalto, para ello utiliza unos coeficientes distintos según las condiciones del asfalto, debido a que la fricción depende de estas.

$$\mu_i = D \cdot \sin(C \cdot \text{atan}(B \cdot S_i - E \cdot (B \cdot S_i - \text{atan}(B \cdot S_i)))) \quad i = f, r$$

Donde los coeficientes B , C , D y E han sido obtenidos experimentalmente:

Superficie	B	C	D	E
Asfalto Seco	10	1.9	1	0.97
Asfalto Húmedo	12	2.3	0.82	1
Nieve	5	2	0.3	1
Hielo	4	2	0.1	1

Tabla 4.1: Coeficientes de Pacejka

Tomaremos para simplificar el modelo, que el asfalto siempre va a ser seco. Por tanto para un deslizamiento determinado, tendremos un valor del coeficiente de rozamiento entre el neumático y el firme.

Una vez obtenido el coeficiente de rozamiento se calcula las fuerzas F_{xi} :

$$F_{xi} = \mu_i \cdot F_{zi} \quad i = f, r$$

Estas ecuaciones son válidas de igual forma para los neumáticos delanteros como para los traseros.

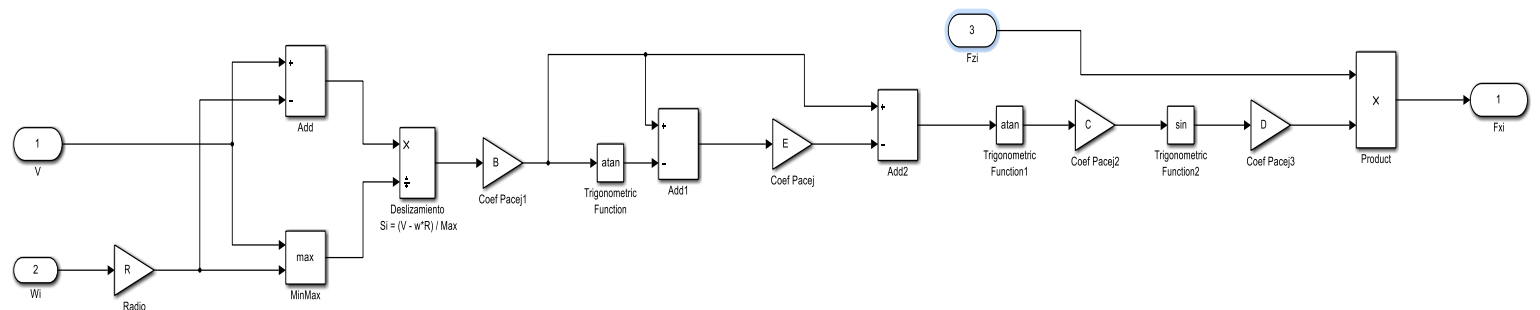


Figura 4.4: Bloque 'Neumático'

Bloque 'Rueda'

Este subsistema consta de 3 entradas y 1 salida, las entradas son los momentos torsores que afectan al movimiento de las ruedas, estos son:

T_e , par que proviene del motor, el que provoca el movimiento del vehículo; T_b , par de frenado; T_r , par de reacción debido a las fuerzas F_x de cada rueda, y su valor se obtiene de:

$$T_{ri} = F_{xi} \cdot R_i \quad i = f, r$$

La salida del subsistema es la velocidad angular de cada eje, para ello se utiliza la segunda ley de newton para movimiento angular, obteniendo así la aceleración angular, e integrándola se conseguirá la velocidad angular.

Al ser un vehículo de **tracción trasera**, el par debido al motor solo tendrá efecto en el eje delantero, siendo nulo la entrada T_e para el eje delantero.

$$\alpha_i = \frac{T_{ei} + T_{ri} - T_{bi}}{J_i} \quad i = f, r$$

Se ha prescindido del par de fricción viscosa, que es debido a pérdidas en los elementos mecánicos del vehículo.

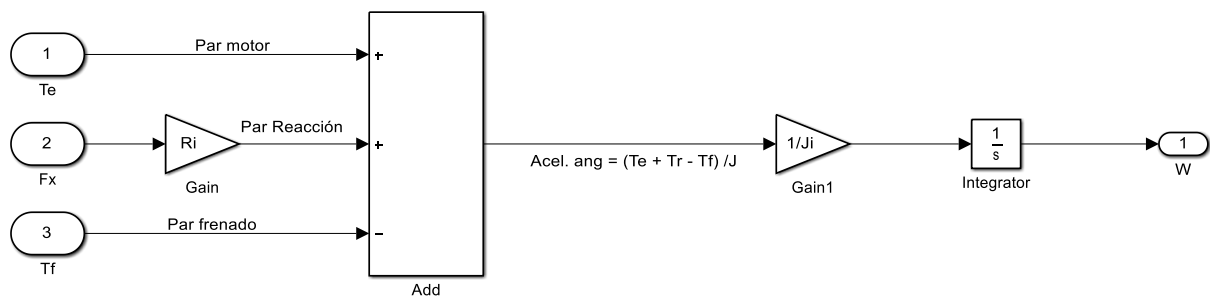


Figura 4.5: Bloque 'Rueda trasera'

Bloque 'Motor Eléctrico'

El modelo que se ha hecho del motor con el que funciona el coche es un modelo de un motor eléctrico con excitación independiente, el cual es el típico modelo matemático de un motor eléctrico.

Las entradas de este bloque son la tensión suministrada al motor y la velocidad actual de las ruedas delanteras. La única salida del bloque es el par mecánico suministrado al eje trasero.

En este bloque también se tiene en cuenta la existencia de un diferencial que hace que la velocidad y el par en el eje del motor y en el eje de las ruedas sean distintos, sin embargo se presupone que la potencia a ambas partes del diferencial es la misma y no hay ninguna pérdida en él.

Las ecuaciones que definen el funcionamiento del motor son las siguientes:

$$E - R_e \cdot I - \omega_r K_b \cdot N - L_e \frac{di}{dx} = 0$$

$$T_e = K_t \cdot N \cdot I$$

Donde T_e es el par mecánico en el eje de las ruedas; K_t es la constante de par electromagnético; N es la relación en el diferencial; E es la tensión aplicada en bornes del motor; ω_r es la velocidad angular de las ruedas traseras, K_b es la constante de fuerza contra electromotriz; R_e es la resistencia eléctrica en el circuito del motor y L_e la inductancia.

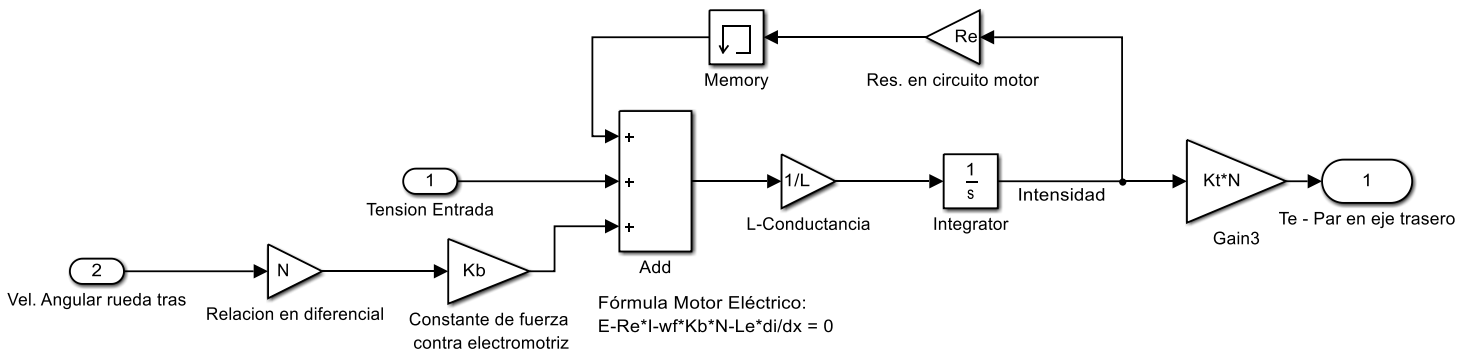


Figura 4.6: Bloque 'Motor Eléctrico'

Bloque 'Frenos'

El sistema de frenos solo tiene dos señales de entrada, una evidentemente es la señal gradual de frenado que se genera cuando el conductor pisa el pedal del freno, esta señal será entre 0 y 1 (grado de accionamiento), y la otra es la velocidad angular de las ruedas. La única señal de salida será el par de frenado generado.

Debido a que el sistema de freno es un sistema hidráulico y por lo tanto no es instantáneo, se modelará con un retraso temporal T_{bs} , y las pinzas de freno tendrán un valor K_c , con estos parámetros se puede obtener la presión creada en los frenos, P_{bi} .

$$P_{bi} = 1.5 \cdot K_c \cdot u_{bi} - T_{bs} \cdot \frac{dP_{bi}}{dt} \quad i = f, r$$

Donde u_b es la señal de frenado comentada anteriormente, y 1.5 se debe a que la presión máxima de frenado en vehículos de similar peso y tamaño se tara en 150 bares. Podemos observar que obviamente la presión ejercida por los frenos dependerá del grado de accionamiento del pedal de este.

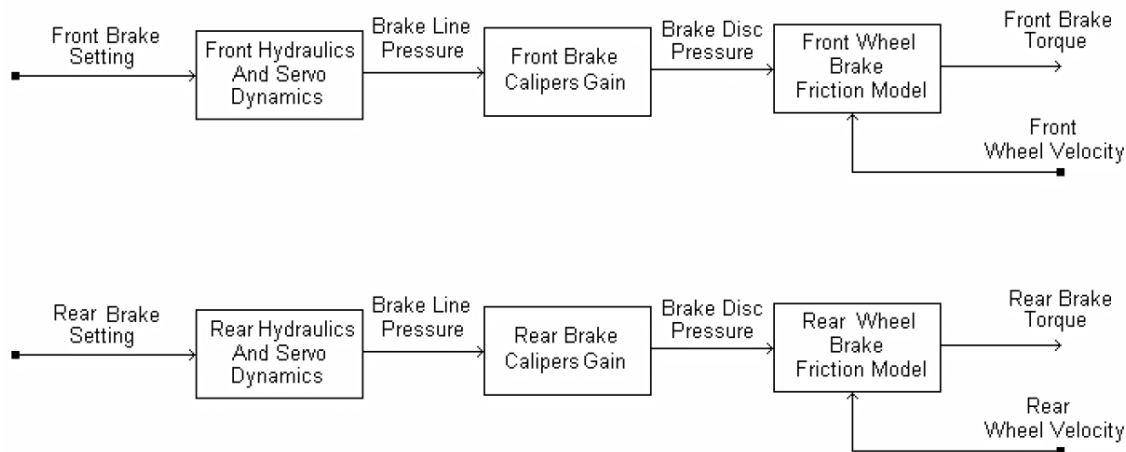


Figura 4.7: Explicación bloque de 'Frenos'

Esta ecuación diferencial puede ser expresada como función de transferencia de la siguiente forma:

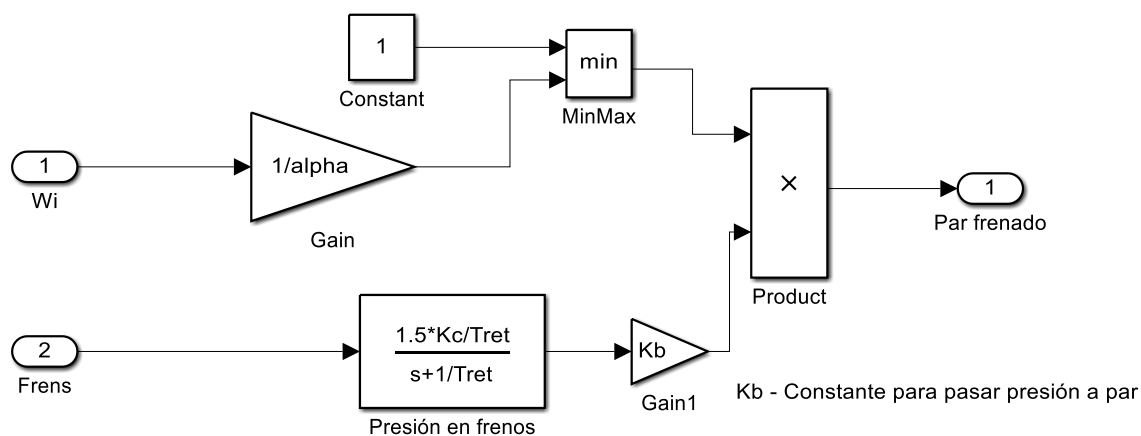
$$\frac{P_{bi}(s)}{U_{bi}(s)} = \frac{1.5 \cdot K_c \cdot \frac{1}{T_{bs}}}{s + 1/T_{bs}} \quad i = f, r$$

Esta presión en los frenos se transforma en un par de frenado que hace que el vehículo reduzca su aceleración, este paso, de presión a par, depende de varios parámetros, como pueden ser la velocidad o la temperatura, pero en este caso solo se tendrá en cuenta la velocidad. Según referencias mencionadas este paso se puede modelar:

$$T_{bi} = P_{bi} \cdot K_{bi} \cdot \min\left(1, \frac{\omega_i}{\alpha_i}\right) \quad i = f, r$$

K_{bi} es una constante que hace la conversión entre presión y par, ω_i es la velocidad angular de la rueda. Se puede observar que el par es proporcional a la presión y a la velocidad angular (siempre que esta no supere el valor de α_i).

Debido a que el reparto de frenada no es igual para los frenos delanteros que para los traseros, normalmente el coeficiente K_b será mayor en los frenos delanteros.



Tret - Retraso temporal (Sist Hidraulico)
 Kc - Valor de pinzas de freno
 1.5 Debido a Pmax es 150bar

Figura 4.8: Bloque 'Frenos'

Parámetros Control Longitudinal

Para realizar posteriormente las simulaciones habrá que establecer los valores de las constantes o parámetros de las ecuaciones establecidas en los apartados anteriores, que serán necesarios para después realizar la simulación con *Matlab*.

Algunos de esos parámetros es imposible determinarlos con exactitud, por lo tanto se harán estimaciones para tener unos datos lo más próximos a la realidad que sea posible, para ello se ha buscado parámetros de otros vehículos de similar tamaño o funcionamiento.

Seguramente a la hora de realizar pruebas con el vehículo los resultados no sean igual a los simulados debido a las diferencias que puede haber en los parámetros reales y los que nosotros estimamos aquí.

```

%%Parámetros del vehículo Renault Twizy 45
m=553;%Con pasajero de 80kg
L=1.686;%Longitud entre ejes
B=0.8430;%%Longitud del eje delant al centro de gravedad, consideramos que se encuentra en la mitad
C=0.8430;%%Longitud del eje tras al centro de gravedad
H=0.5;%altura centro de gravedad
theta=0;%despreciamos inclinación carretera
Rf=0.2;%radio rueda delantera
Rr=0.2;%radio rueda trasera (neumaticos michelin 13in)
Jf=0.5;%inerencia de la rueda delantera
Jr=0.5;%inerencia de la rueda trasera
rho=1.23;%densidad del aire
Av=1.5;%Area frontal vehículo
Cd=0.29;%coef resistencia aerodinamica
Vv=0;%velocidad viento
Cr=0.01;%coeficiente de rodadura
Re=10;%resistencia eléctrica motor
Le=1;%Inductancia Motor
Kb=0.3;%constante de fuerza contra electromotriz
Kt=40;%constante del par electromagnético
N=1;%Relacion en el diferencial
Kc=1;%Valor de las pinzas de freno
Kbf=10;%constante que hace la conversión entre presión y par (Nm/bar)
Kbr=5;%normalmente los frenos delanteros ejercen más presión que los traseros
t=0.2;
alpha=0.01;
B=10;%constantes de ecuacion Pacejka para asfalto seco.
C=1.9;%constantes de ecuacion Pacejka para asfalto seco.
D=1;%constantes de ecuacion Pacejka para asfalto seco.
E=0.97;%constantes de ecuacion Pacejka para asfalto seco.

```

Figura 4.9: Parámetros Control Longitudinal

4.3 Control Lateral

El modelo dinámico, como en el caso anterior se obtiene analizando las fuerzas que ocasionan desplazamiento lateral y longitudinal en el plano $x - y$ (paralelo al suelo) del sistema de coordenadas fijo en el vehículo y movimientos de rotación en torno del eje z .

Serán despreciados los movimientos de rotación alrededor de los ejes x e y , y las ruedas de un mismo eje serán representadas por una rueda posicionada en el centro de este. Estas simplificaciones llevan al modelo de 'bicicleta' expuesto en la siguiente figura.

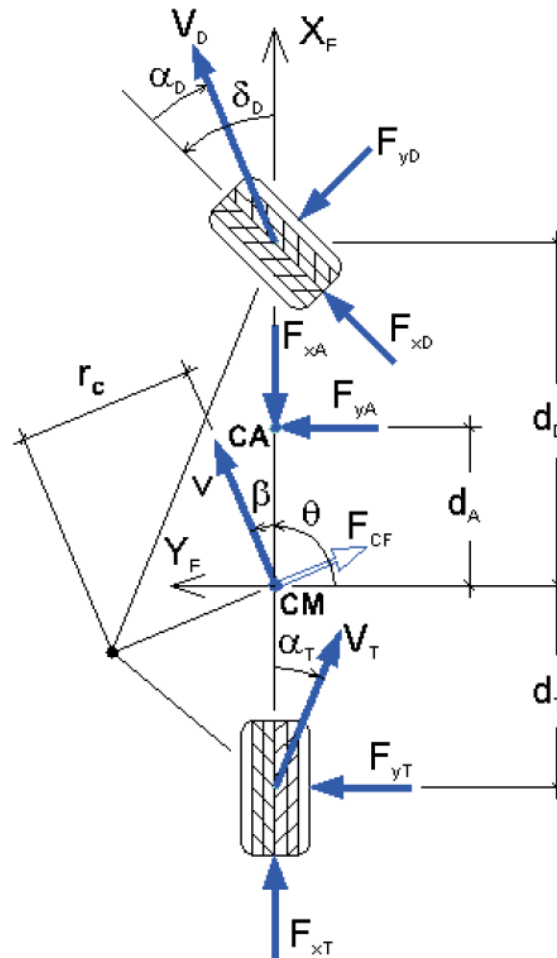


Figura 4.10: Diagrama de fuerzas del vehículo, modelo simplificado 'bicicleta'

De la ECU de nivel alto se recibirá de entrada el ángulo δ_D que simboliza el giro de la rueda delantera del modelo simplificado, y obtendremos de salida el ángulo de deslizamiento lateral del chasis β y la velocidad de rotación del vehículo en el centro de masas $\dot{\theta}$. Además, como se comentará a continuación se va a tomar para el control lateral una velocidad lineal constante, dado que el periodo de muestreo para el bucle de control de v (T_v) es más grande que para el bucle de β y $\dot{\theta}$ ($T_{\beta, \theta}$) y durante $\frac{T_v}{T_{\beta, \theta}}$ periodos de muestreo la velocidad v puede ser considerada constante.

El modelo se obtendrá a través del análisis del diagrama de fuerzas representado.

- Equilibrio de fuerzas actuantes en el eje x :

$$F_{CF} \cdot \sin\beta + F_{xT} - F_{xA} + F_{xD} \cdot \cos\delta_D - F_{yD} \cdot \sin\delta_D = m \cdot \dot{v} \cdot \cos\beta$$

- Equilibrio de fuerzas actuantes en el eje y :

$$-F_{CF} \cdot \cos\beta + F_{yT} + F_{yA} + F_{xD} \cdot \sin\delta_D + F_{yD} \cdot \cos\delta_D = m \cdot \dot{v} \cdot \sin\beta$$

- Equilibrio de pares alrededor del eje z :

$$(F_{yD} \cdot \cos\delta_D + F_{xD} \cdot \sin\delta_D) \cdot d_D - F_{yT} \cdot d_T + F_{yA} \cdot d_A = J_z \cdot \ddot{\theta}$$

Donde β es el ángulo de deslizamiento lateral del chasis, $\dot{\theta}$ es la velocidad de rotación del vehículo en el CM, v es la velocidad lineal del vehículo en el CM, r_c es el radio de curvatura, J_z es el momento de inercia total alrededor del eje vertical, d_D y d_T son las distancias del eje delantero y trasero al centro de gravedad, respectivamente; C_D y C_T son los coeficientes de adherencia de los neumáticos delanteros y traseros, respectivamente; α_D y α_T son los ángulos del vector de desplazamiento lateral de la rueda delantera y trasera, respectivamente; m es la masa total del vehículo, F_{CF} es la fuerza centrífuga, F_{xD} y F_{xT} son las fuerzas de tracción en las ruedas delantera y trasera, F_{yD} y F_{yT} son las fuerzas de adherencia en los neumáticos delantera y trasera, y F_{xA} y F_{yA} son las fuerzas aerodinámicas.

Considerando las características de cada fuerza expuesta como sigue:

Fuerza Centrífuga: la fuerza centrífuga F_{cf} puede ser descompuesta en un producto entre la masa del cuerpo y la aceleración centrífuga, dada por:

$$F_{cf} = m \cdot a_{cf}.$$

Estando la aceleración centrífuga escrita en términos de la velocidad lineal del vehículo y del radio de curvatura al cual el sistema está sujeto, $a_{cf} = v^2/r_c$

Sin embargo, con el objetivo de obtener las ecuaciones dinámicas en función de las variables de interés, se reescribe el radio de curvatura a través de las variables v , $\dot{\beta}$ y $\dot{\theta}$, quedando de la forma: $r_c = \frac{v}{\dot{\beta} + \dot{\theta}}$

Quedando la fuerza centrífuga: $F_{cf} = m \cdot v \cdot (\dot{\beta} + \dot{\theta})$

Fuerza aerodinámica: compuesta por las componentes F_{xA} , F_{yA} será despreciada debida a que su efecto en este modelo es despreciable debido al tamaño y velocidades que soportará nuestro vehículo.

Fuerza de Adherencia en los Neumáticos: las fuerzas de adherencia lateral en las ruedas, contrarias al deslizamiento del neumático, son determinadas a través del producto entre la constante de adherencia del neumático con el suelo (C_D y C_T) y el ángulo del vector de desplazamiento (α_D y α_T). Así, la fuerza de adherencia sobre el neumático delantero está dada por:

$$F_{yD} = C_D \cdot \alpha_D = C_D \cdot \left(-\beta + \delta_D - d_D \cdot \frac{\dot{\theta}}{v} \right)$$

$$F_{yT} = C_T \cdot \alpha_T = C_T \cdot \left(-\beta + d_T \cdot \frac{\dot{\theta}}{v} \right)$$

Agrupando términos y despejando nuestras variables objetivo β y $\dot{\theta}$ nos saldrá un sistema no lineal, linealizando teniendo en cuenta que β y δ_D son pequeños, nos quedarán las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\beta} = \dot{\theta} \cdot \left(\frac{C_T \cdot d_T - C_D \cdot d_D}{m \cdot v^2} - 1 \right) - \beta \cdot \left(\frac{C_T + C_D}{m \cdot v} \right) + \frac{F_{xD} \cdot \delta_D}{m \cdot v} + \frac{C_D \cdot \delta_D}{m \cdot v}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\beta}{J_z} \cdot (C_T \cdot d_T - C_D \cdot d_D) + \frac{C_D \cdot d_D \cdot \delta_D}{J_z} - \frac{\dot{\theta}}{J_z \cdot v} \cdot (C_T \cdot d_T^2 + C_D \cdot d_D^2) + \frac{F_{xD} \cdot d_D \cdot \delta_D}{J_z}$$

Los parámetros utilizados serán los siguientes, algunos ya utilizados en el control longitudinal:

$m=553\text{kg}$ -Masa del vehículo

$d_D=0.8430\text{m}$ -Distancia del eje delantero al Centro de Masas

$d_T=0.8430\text{m}$ - Distancia del eje trasero al Centro de Masas

$C_D=10780\text{N}$ -Constante de adherencia del neumático delantero (tomado de vehículo similar)

$C_T=10780N$ –Constante de adherencia del neumático trasero (tomado de vehículo similar)

$J_z=56.07083Nm$ –Momento de inercia respecto al eje z del vehículo (tomado de vehículo similar)

Procedemos a la implementación de dichas ecuaciones en *Simulink* para obtener el modelo buscado.

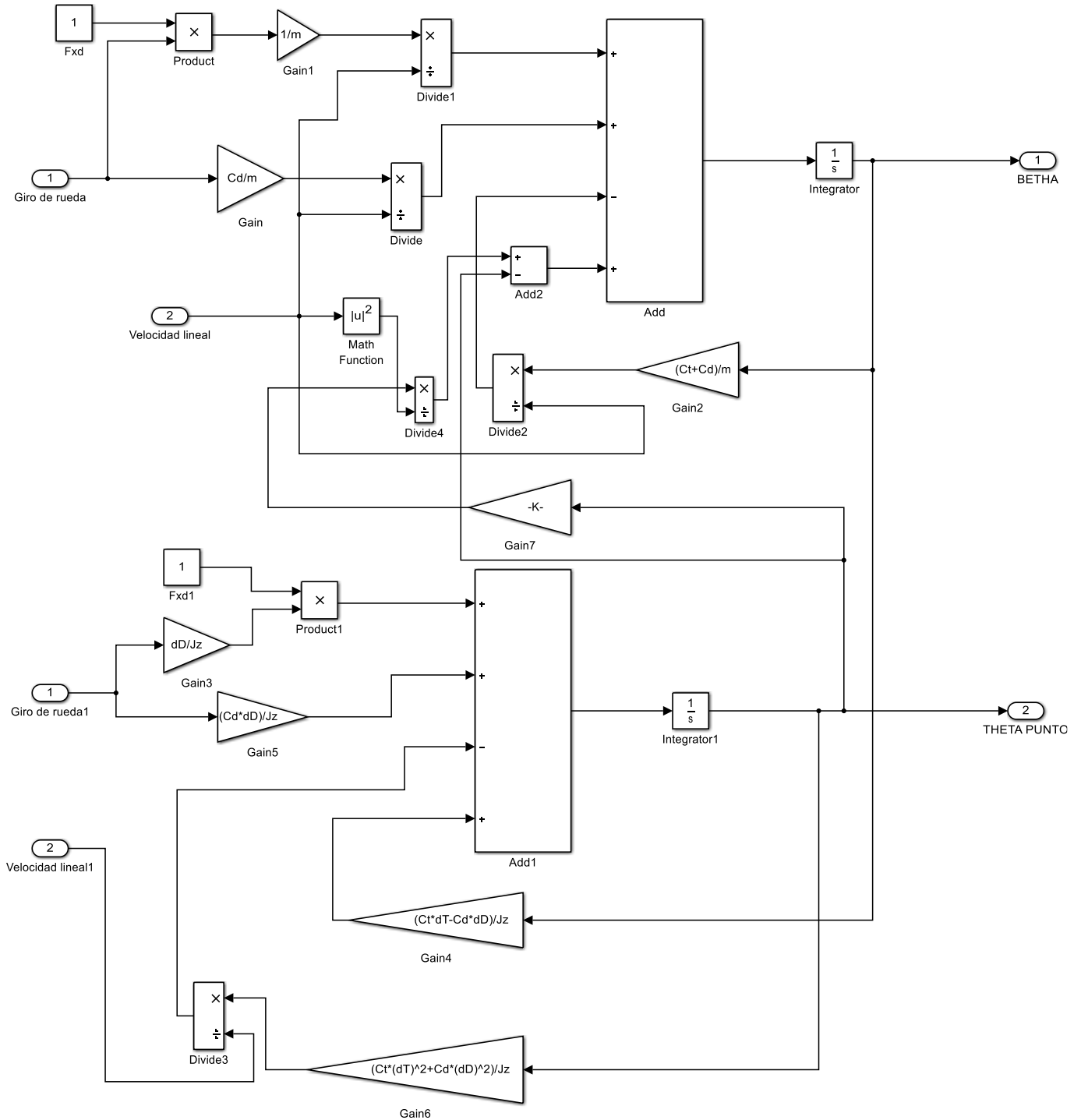


Figura 4.11: Modelo Lateral

5 DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo expondremos la solución de diseño propuesta, explicaremos la arquitectura de control pensada para el proyecto y haremos pequeñas simulaciones a modo de comprobación del modelo. No estará dentro del alcance de este proyecto el diseño del controlador, ni la ingeniería de detalle del proyecto, que se dejará en manos de trabajos futuros.

5.1 Solución propuesta

Tal y como hemos visto, parece haber muchas opciones de combinación de los sensores, algunos de ellos considerados inamovibles (hasta que otro sistema más avanzado lo sustituya) como el módulo IMU y GPS.

Pero en la realidad, la decisión por excelencia es si basar la autonomía del vehículo por sistemas LIDAR o por cámaras de visión inteligente.

En este proyecto, y dado que no existe una elección peor que otra, apostaremos por los elementos de visión como guía principal de nuestro vehículo. Esta decisión está basada en:

1. El alto precio que conllevaría la adquisición de dispositivos cualificados LIDAR para un proyecto de investigación como este.
2. Una predicción futura, dado que los sistemas por visión inteligente están evolucionando de manera exponencial en los últimos años.
3. La aplicabilidad de este tipo de sistemas en la actualidad, parece mucho más factible equipar un vehículo con sistemas de visión (que además son altamente camuflados en el propio diseño de chasis de nuestro vehículo) que montar un sistema LIDAR con su correspondiente subestructura metálica en el techo del coche. Lo que además de condicionar la funcionalidad del coche y su estética, atacaría de lleno en la aerodinámica de este.

Pero nuestro sistema no puede apoyarse solo en sistemas de visión, dado que podríamos tener problemas con niebla espesa o fuertes lluvias, así como las tendría la percepción humana. Por ello, nuestro sistema también contará con un cinturón de sensores ultrasónicos y un radar delantero de alta eficiencia que permita unos 150m de seguridad en predicción, dado que este es un proyecto de investigación académico, en condiciones de mercado se buscaría una distancia de unos 250m.

Por tanto para nuestro vehículo se plantean los siguientes sensores y actuadores:

1. Módulo IMU

Proponemos un módulo IMU modelo **MTi-G-710** de la firma especialista *Xsens*. Este sensor es de pequeño tamaño y cumple con altas exigencias de temperatura, irá montado en el Centro de Gravedad del vehículo (debajo del asiento del piloto)



Figura 5.1: Modelo MTi-G-710 de Xsens

2. Módulo GPS:

En estos dispositivos hay gran variedad en la que elegir, y por tanto de bajo precio. Proponemos **F4 Series GPS Receiver de la marca Linx Technologies**

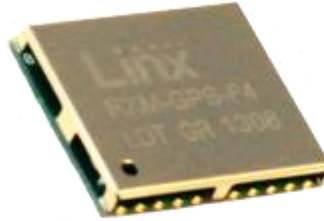


Figura 5.2: Módulo GPS Receiver de Linx Technologies

3. Radar:

Se propone *Delphi ESR 2.5 (multimode Electronically Scanning Radar)*, radar especialmente diseñado para la industria automovilística que combina un amplio campo de visión en rango medio con cobertura de largo alcance (Mid-Range (60m): $\pm 45^\circ$; Long-Range (174m): $\pm 10^\circ$), para proporcionar dos modos de medición simultáneamente. El ESR multimodo de *Delphi* proporciona una amplia cobertura a rango medio y cobertura de largo alcance de alta resolución usando un solo radar. La amplia cobertura de rango medio no solo permite que se detecten vehículos que se incorporan desde carriles adyacentes sino que también identifica vehículos y peatones a lo ancho del vehículo equipado.

La cobertura de largo alcance proporciona datos exactos de rango y velocidad con una poderosa discriminación de objetos que puede identificar hasta 64 objetivos en el camino del vehículo.

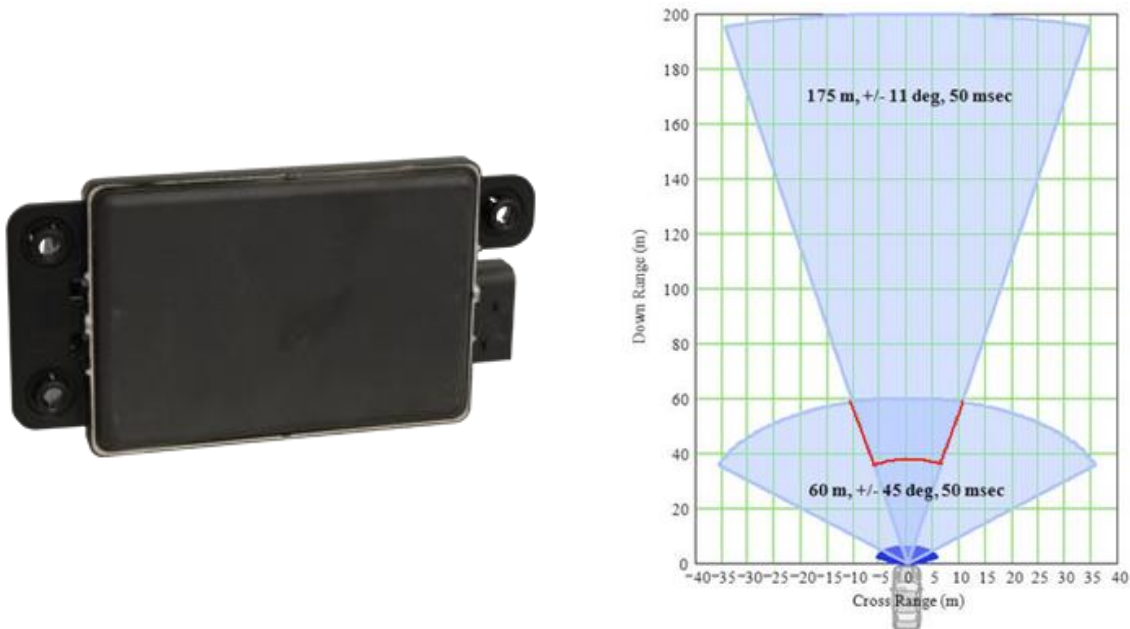


Figura 5.3: Se muestra el modelo de Radar detallado y un esquema de su rango de acción

4. Cinturón de Ultrasonidos:

Se propone formar un cinturón de sensores de ultrasonidos alrededor del perímetro del vehículo para asegurar así el entorno más cercano a este. Sobre modelos, existe una alta variedad de sensores en el mercado, baratos que podrían cumplir esta cuestión, o algunos más exigentes como los diseñados por *Bosch*, pero que ascienden también el presupuesto. Como este pack de 8 sensores de la firma *LST*



Figura 5.4: Sensores ultrasonidos LST

5. Cámaras de visión:

Se proponen las cámaras de visión artificial de la firma *Datalogic*, encaminadas tanto al uso industrial como a la automatización de automóviles. Son cámaras ultra compactas que ofrecen funciones avanzadas de visión artificial incorporadas a dispositivos autónomos.



Figura 5.5: Cámaras T-Series de Datalogic Technologies

6. Engine Control Unit (ecu)

Necesitaremos una controladora de motor, que traerá el coche de serie, un ejemplo de una de muy buena eficiencia es el modelo *Curtis 1232*



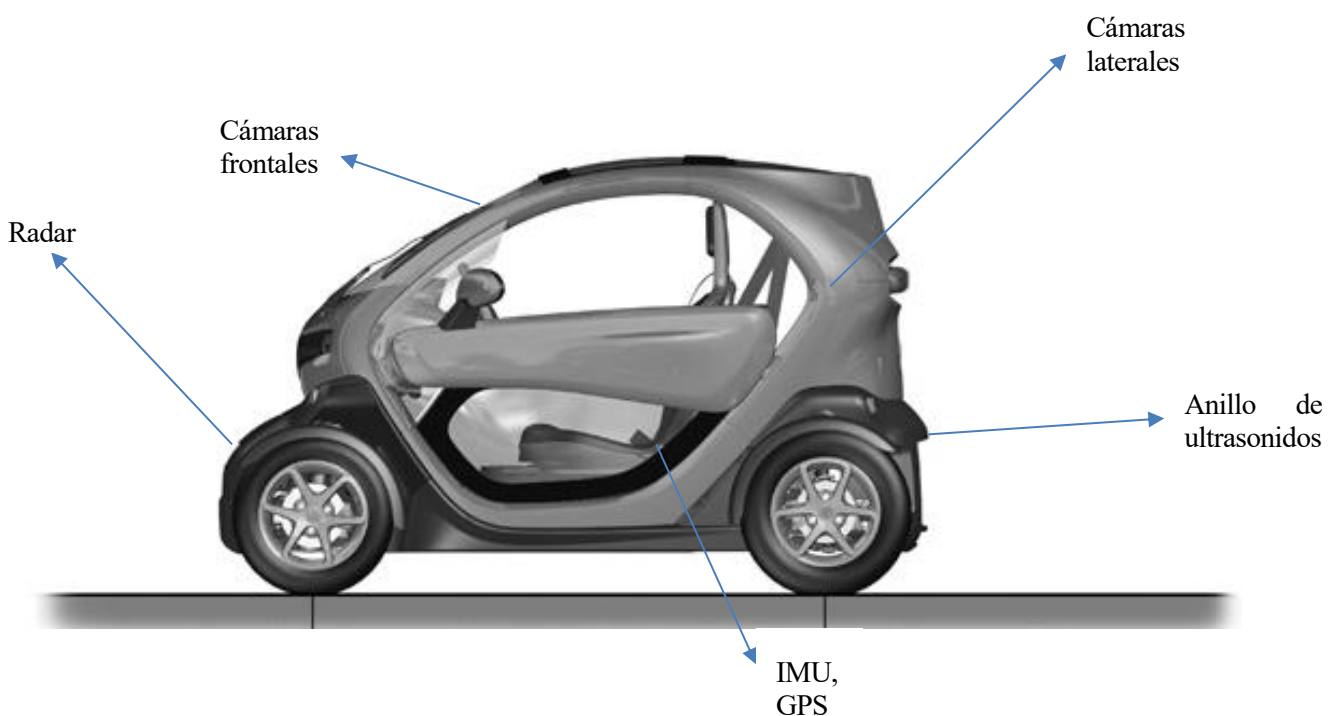
Figura 5.6: Controladora de Motor Curtis (ECU)

7. Motor de Dirección Asistida Eléctrica (DAE)

Como detallaremos en el siguiente capítulo, no entra dentro de este proyecto la ingeniería de detalle de especificar incluso el motor de dirección asistida a utilizar, será cuestión de trabajos futuros. Pero a modo orientativo, modelos de similar tamaño y peso montan un motor de corriente continua alimentado a 12 voltios, cuya intensidad máxima es de 60 amperios, para permitir la asistencia de forma instantánea.

8. Electronic Control Unit (ECU)

Se dejará en manos de trabajos futuros la correcta elección de las controladoras ECU tanto de *bajo* como de *alto nivel*.



5.2 Arquitectura de control

La arquitectura de control de nuestro proyecto se basará en dos ECUs (Electronic Control Unit), una a *nivel alto* donde residirán los algoritmos más complejos, que no están en el alcance de este proyecto (tales como: navegación, evitación de obstáculos, control de crucero), a esta ECU de *nivel alto* llegará la información del bloque sensorial (IMU, GPS, cámaras, radar, ultrasonidos...) y mediante los citados algoritmos de generación de trayectoria y sucesivos generarán unas señales de salida que irán a la ECU de *nivel bajo*, estas señales de salida serán la velocidad v a la que debe ir el vehículo, el ángulo β que simboliza el ángulo de deslizamiento del chasis, como vimos en el capítulo de Control Lateral, y la velocidad de giro $\dot{\theta}$ que simboliza la velocidad de giro que sufre el Centro de Masas, y así el conductor.

Estos valores de salida que se generan en la ECU de *nivel alto* son tomados como referencias a seguir por la ECU *nivel bajo* ya que estas variables deben mantenerse en un rango de tolerancia de lo que dicta el *nivel alto*, por ejemplo el ángulo de deslizamiento β no debe sobrepasar unos 4° ya que el vehículo estaría deslizando, ni la velocidad de giro del centro de masas ser muy acusada, debido a que el conductor notaría incomodidad y sentiría giros bruscos.

La ECU de *nivel bajo* explicada, por tanto, controlará el modelo longitudinal y lateral expuestos y dará como salida los respectivos grados de accionamiento del freno y acelerador, y un giro de rueda determinado que ira a la ecu (Engine Control Unit) de la servodirección, motor de impulsión y sistema de frenado.

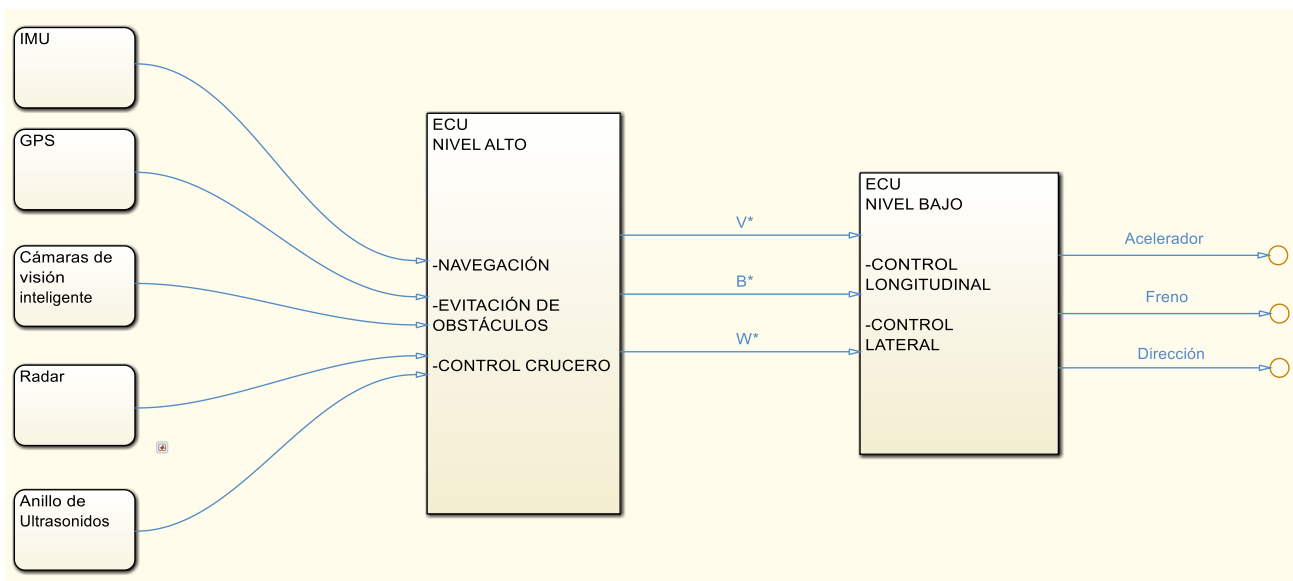


Figura 5.6: Esquema de la Arquitectura de Control utilizada

- Navegación:

La función más importante a desarrollar por el vehículo autónomo, se basa en la percepción del ambiente mediante una red de sensores, los cuales han sido detallados en capítulos anteriores los más utilizados en la industria, para dar paso a un procesamiento de la información recibida realizando lo que comúnmente se denomina 'mapeo'.

Tras este 'mapeo' del entorno, el procesador debe ser capaz de realizar un planeamiento a seguir, dictado también por el usuario (desde punto A hasta punto B), mediante generación de trayectorias, el procesador debe buscar no solo una trayectoria a seguir para llegar al destino objetivo, sino optimizar que esta sea la más rápida, evitar congestión de tráfico urbano, etc.

Esta trayectoria generada o ‘waypoint’ es la enviada a la ECU de *nivel bajo* para ser controlada y aplicada de forma efectiva mediante los actuadores.

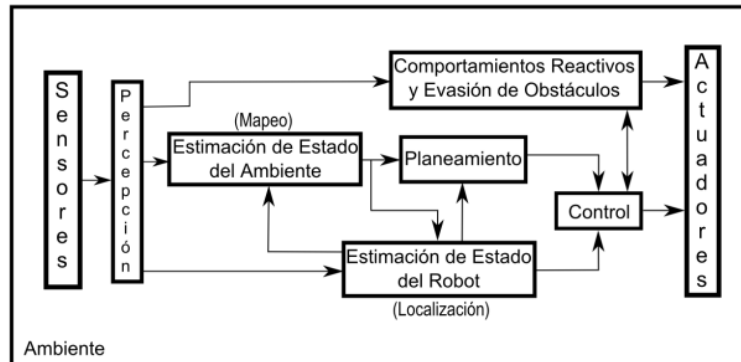


Figura 5.7: Esquema de un sistema de navegación

- Evitación de obstáculos:

Se trata de la identificación mediante el bloque sensorial de cualquier tipo de objeto, persona u obstáculo cualquiera que entorpezca o imposibilite la correcta realización de la trayectoria. El procesador tiene que ser capaz de frenar a tiempo si este obstáculo obstruye la trayectoria, o trazar una trayectoria que lo evite, bien sea mediante un cambio de carril si la calzada lo permite o bien una maniobra de evasión si el frenado de emergencia es inviable.

De este desempeño se encargará básicamente el sistema de visión y el radar de largo alcance, que transmitirán la información a la ECU a *nivel alto* y esta a su vez ordenará a la ECU de *nivel bajo* acciones en consecuencia.

- Control de cruce:

Esta función se basa principalmente en convertir una velocidad requerida en la trayectoria a un valor de voltaje con el que suplir al motor.

5.3 Simulación de modelos

Para esta comprobación, se someterá primeramente el modelo longitudinal a varios valores para la señal de entrada (Aceleración/Freno) para comprobar que la señal de salida (Velocidad) es más o menos la que se espera, para ello la señal de entrada tiene que ser variada, teniendo momentos en las que el vehículo aumentara de velocidad y momentos en los que el vehículo frenará.

Los datos que se obtienen al realizar la simulación serán los siguientes:

- Velocidad del cuerpo del vehículo, es la velocidad real a la que se mueve el coche.
- Velocidad de las ruedas, obtenida al multiplicar la velocidad angular del movimiento de las ruedas por el radio de estas.

Para verificar el modelo longitudinal (velocidad) se ha introducido una señal escalón en el pedal acelerador, que en el instante $t:20s$ se suprime, estimando al sistema con otra entrada en el pedal de freno en el instante $t:20s$

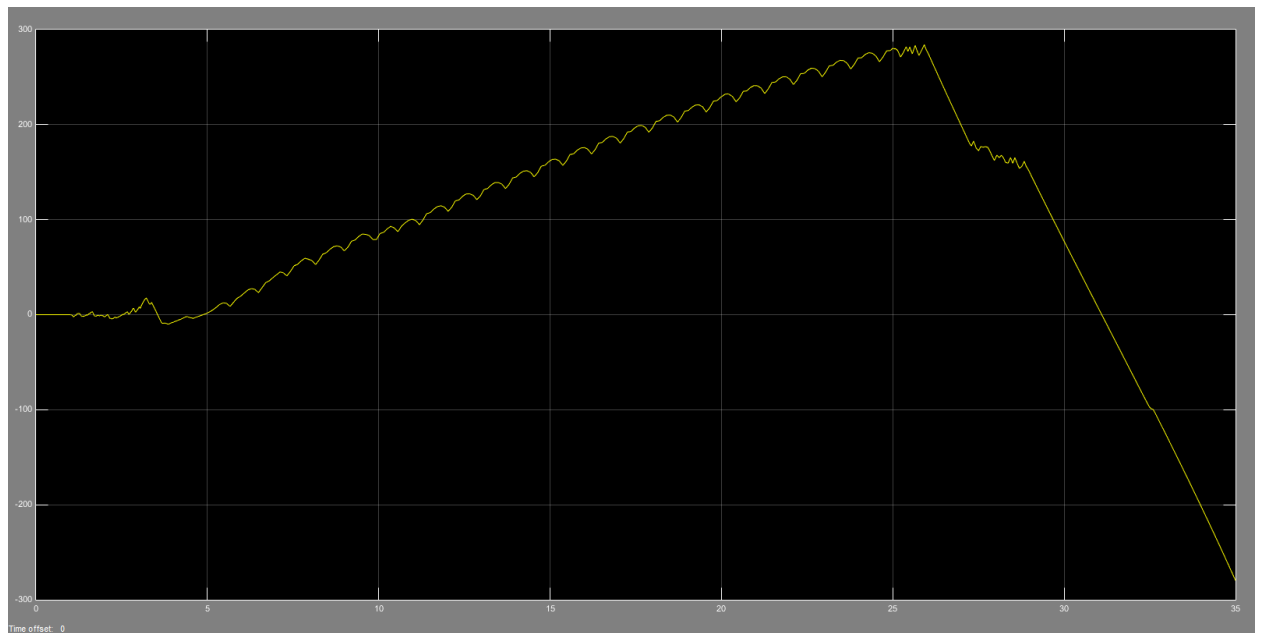


Figura 5.8: Simulación de verificación de modelo ante entrada escalón en acelerador en instante inicial y ataque de freno en $t:25s$.

El control lateral nos deberá dar un ángulo de deslizamiento, que habrá que controlar que se encuentre dentro de un rango de seguridad (suponemos este rango dado como referencia) y una velocidad de giro respecto al eje z también a controlar por una referencia dada (rango de comodidad para el ocupante del vehículo).

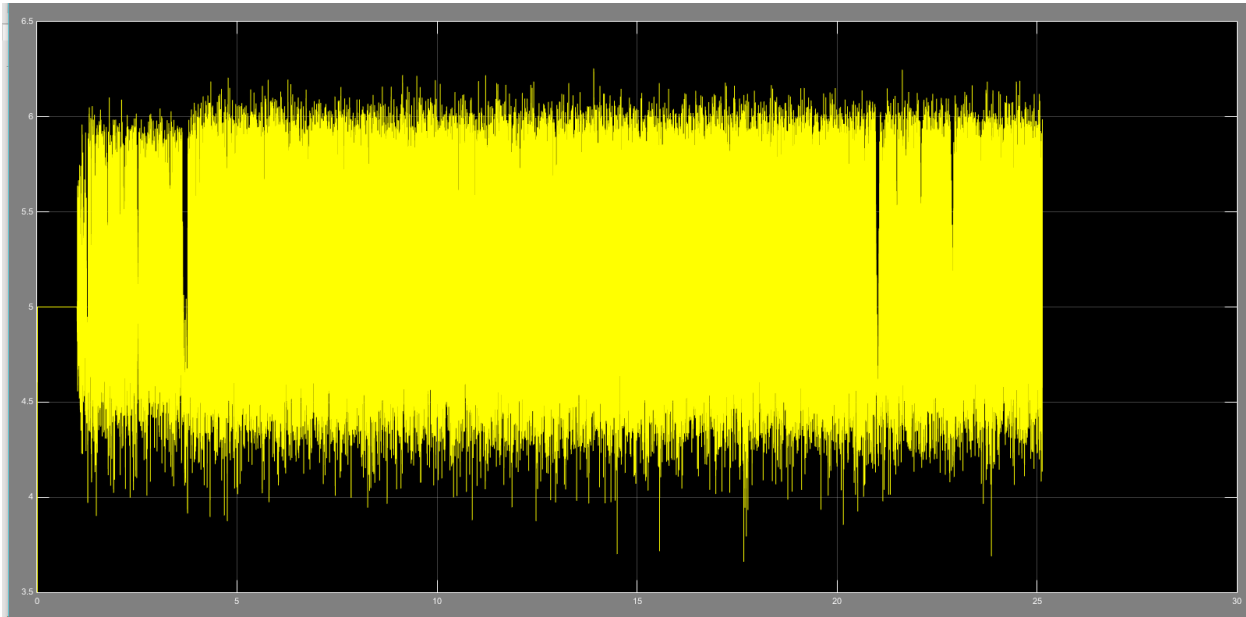


Figura 5.9: β Ángulo de deslizamiento

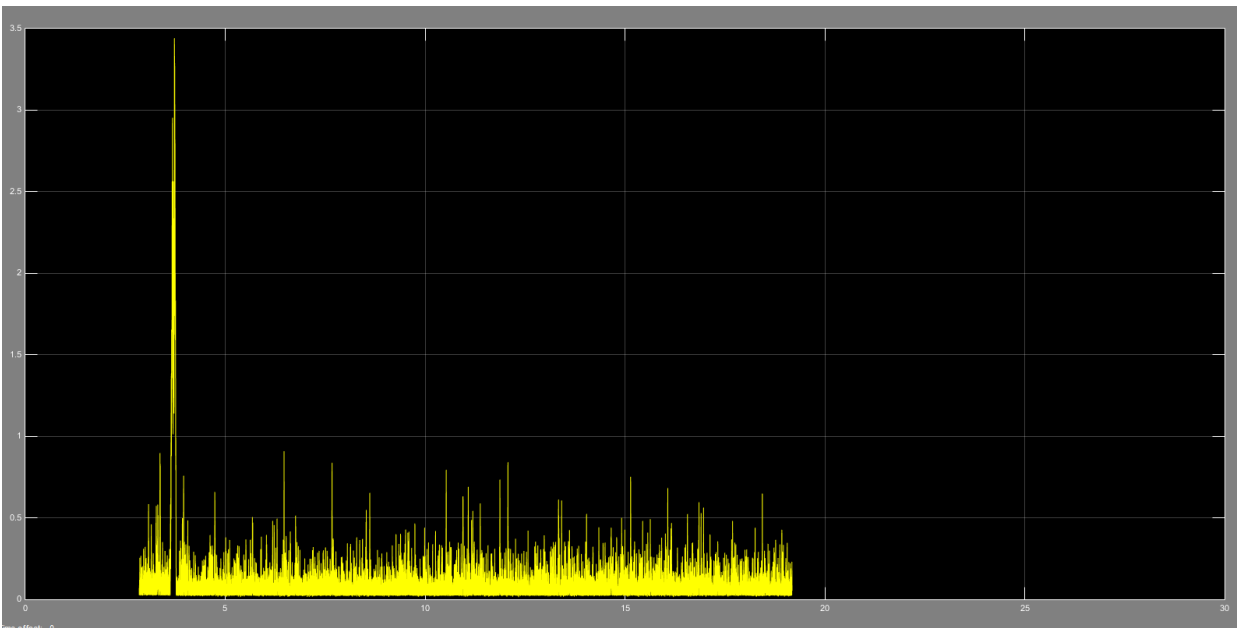


Figura 5.10: $\dot{\theta}$ Velocidad de giro respecto a z

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado un diseño preliminar de un sistema de conducción autónoma para un vehículo eléctrico. Tras repasar los distintos tipos de sensores con los que contamos en la actualidad, se ha elegido una combinación de ellos, tomada como la más eficiente para nuestro caso.

Se ha propuesto una arquitectura de control a seguir para solventar nuestro objetivo, utilizando dos ECUs para controlar nuestro sistema, centrándonos en la de *nivel bajo*, y se han descrito los modelos matemáticos necesarios para ello. Estos modelos y su correspondiente control deberán ser implementados en la controladora de nuestro sistema.

Finalmente se han realizado simulaciones concluyentes para verificar nuestros modelos.

Como trabajos futuros se propone entrar a la ingeniería del detalle y caracterizar con más atención todos los parámetros físicos del sistema, ya que muchos, por inaccesibilidad, se han tomado de vehículos similares. Formará parte también del alcance de otros proyectos, el diseño del controlador del sistema, la definición de la ECU de nivel alto y sus complejos algoritmos, así como implementar todo el sistema en el propio coche.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jerónimo Ramos Teodoro, *TFG Modelado y control de la dirección de un vehículo eléctrico*, 2012.
- [2] M. Norgaard, N.K. Paulsen, *Models for IAU's autonomous guided vehicles*, 2000
- [3] Rafael Martín de Agar Tirado, *Control Automático de un Vehículo Autónomo bajo el sistema operativo GNU/LINUX. Implementación de drivers y software de control*, 2005
- [4] Daniel López Montes, *Sistema de control longitudinal para vehículo eléctrico urbano*, 2014
- [5] Michael Short, Michael J. Pont and Qiang Huang, *Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems: Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics*, 2004
- [6] H. Pacejka, *Tyre and Vehicle Dynamics*, 2012
- [7] Álvaro Padial Moreno, Marta Salvago Ocete y Carlos Bergillos Roldán, *Sensores y Actuadores Automotrices*, 2017
- [8] Guilherme V. Raffo, Julio E. Normey-Rico, Francisco R. Rubio y Christian R. Kelber, *Control Predictivo en cascada de un Vehículo Autónomo*
- [9] Pablo G. Bejarano, *La desconocida historia de los coches autónomos*, 2013
- [10] Juan Carlos López, *Dónde está realmente el coche autónomo y qué han prometido para el futuro*, 2018
- [9] E. De Torres, *Implementación del control lateral sobre un vehículo con dirección asistida eléctrica*, Universidad Carlos III 2011.

