



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y validación de un modelo de vehículo eléctrico para
futuras aplicaciones en el ámbito militar*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Antonio Moreno Cózar

DIRECTOR: Víctor Ángel Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y validación de un modelo de vehículo eléctrico para
futuras aplicaciones en el ámbito militar*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado propone un modelo de simulación para vehículos eléctricos alimentados con baterías, desarrollado bajo el entorno de Matlab/Simulink®. El objetivo principal es poder simular vehículos eléctricos con diferentes configuraciones y para distintos ciclos de conducción, tanto reales como estándar.

Para la obtención de este modelo se implementan ecuaciones que modelan cada una de las partes que compone un vehículo eléctrico de manera independiente: un módulo para la dinámica del vehículo, un módulo para el motor eléctrico y un módulo para la batería. Estos bloques finalmente son implementados en un modelo global para su posterior simulación bajo ciclos de conducción.

Una vez elaborado este modelo global se procede a su simulación y se efectúa la comprobación y validación de los datos obtenidos, los cuales son comparados con fuentes bibliográficas contrastadas.

Además se ha realizado un recorrido real en la Escuela Naval Militar en un scooter eléctrico equipado con un dispositivo GPS, y cuyos datos han sido contrastados con los resultados simulados.

Por último, se realiza una simulación empleando otro recorrido real obtenido por GPS, en un campo de maniobras militar durante la semana de I+A, con una posible configuración de vehículo VAMTAC S3 eléctrico que no está disponible en el mercado actual con el objeto de comprobar si es técnicamente viable.

PALABRAS CLAVE

Simulador, Vehículo Eléctrico, Aplicaciones Militares

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Antonio y María José y a mi hermana María, por apoyarme continuamente durante todos estos años y por su amor incondicional.

A mi novia Diana, por su amor y amistad, ayudándome y animándome siempre que lo he necesitado.

A mis abuelos Francisco, María, Gaspar y Maruja, por educarme y hacerme ser quien soy.

A mis tíos Paco y Paqui, y a mis primas Marina y Tania, por apoyarme y quererme tanto.

A mis suegros, Gregorio y María Isabel, y a mis cuñados David y Clara, por apoyarme y acogerme en su familia como uno más.

A mis amigos y compañeros, en especial a la camareta V3, por todos los buenos momentos juntos y por el apoyo mutuo en los malos.

A mi tutor Víctor, por hacer posible este proyecto.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción.....	7
1.1 Situación actual	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estado del arte	8
1.4 Software de simulación	12
2 Modelado del vehículo eléctrico	14
2.1 Modelado de la Dinámica	14
2.1.1 Ecuaciones para el cálculo de la dinámica	14
2.1.2 Potencia eléctrica necesaria	17
2.1.3 Modelado en Simulink® de la dinámica	18
2.2 Modelado de la batería de tracción	24
2.2.1 Fundamentos de una batería	24
2.2.2 Modelado en Simulink® de la batería	27
2.3 Modelado del motor eléctrico	33
2.3.1 Fundamentos de un motor eléctrico.....	33
2.3.2 Modelado en Simulink del motor eléctrico	39
2.4 Modelo conjunto del simulador	41
3 Simulaciones	43
3.1 Turismo eléctrico GM EV 1.....	43
3.1.1 Batería plomo-ácido.....	44
3.1.2 Motor eléctrico.....	44
3.1.3 Ciclo de conducción SFUDS	45
3.1.4 Resultados.....	45
3.2 Validación del simulador con un scooter eléctrico	47
3.2.1 Resultados.....	50
3.3 Recorrido GPS real con vehículo militar	51
3.3.1 Resultados.....	54
4 Conclusiones y líneas futuras	55
4.1 Conclusiones	55
4.2 Líneas futuras	55

5 Bibliografía.....56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Extracción y consumo mundial de petróleo.....	7
Figura 1-2 Configuración típica de un BEV	10
Figura 1-3 Software de simulación: Simulink®.....	12
Figura 2-1 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento por una pendiente	14
Figura 2-2 Distribución de presiones en un neumático	15
Figura 2-3 Ciclo de conducción estándar (NEDC)	19
Figura 2-4 Bloque de constantes	19
Figura 2-5 Bloque de fuerza de aceleración	20
Figura 2-6 Bloque de fuerza aerodinámica	20
Figura 2-7 Bloque de fuerza de resistencia a la rodadura	21
Figura 2-8 Bloque de fuerza para superar una pendiente	21
Figura 2-9 Bloque de fuerza de tracción	22
Figura 2-10 Bloque de la potencia mecánica	22
Figura 2-11 Función en MATLAB de la potencia de salida	23
Figura 2-12 Bloque de dinámica	23
Figura 2-13 Celda electrolítica	24
Figura 2-14 Circuito equivalente simple de una batería de 6 celdas	28
Figura 2-15 Bloque de constantes para la configuración de la batería.....	29
Figura 2-16 Bloque de resistencia interna	29
Figura 2-17 Bloque de capacidad de Peukert	29
Figura 2-18 Bloque de tensión de circuito abierto	30
Figura 2-19 Función en MATLAB de intensidad	31
Figura 2-20 Bloque de intensidad.....	31
Figura 2-21 Función en MATLAB de carga	32
Figura 2-22 Bloque de carga	32
Figura 2-23 Bloque de SoC	32
Figura 2-24 Modelo global de la batería	33
Figura 2-25 Fuerza de Lorentz	33
Figura 2-26 Estator motor CC	34
Figura 2-27 Rotor motor CC	34
Figura 2-28 Motor CA asíncrono de jaula de ardilla [32]	36
Figura 2-29 Motor CA síncrono	37
Figura 2-30 Constantes de pérdidas del motor eléctrico	40
Figura 2-31 Pérdidas totales del motor eléctrico	40

Figura 2-32 Bloque de eficiencia del motor eléctrico	41
Figura 2-33 Bloque de potencia eléctrica del motor	41
Figura 2-34 Modelo conjunto del simulador	42
Figura 3-1 GM EV1	43
Figura 3-2 Ciclo SFUDS en Simulink®	45
Figura 3-3 Potencia eléctrica GM EV1 de un ciclo SFUDS obtenida con Simulink®	46
Figura 3-4 Potencia eléctrica GM EV1 para un ciclo SFUDS en [20].....	46
Figura 3-5 SoC batería GMEV1.....	47
Figura 3-6 Scooter eléctrico empleado en el recorrido GPS	48
Figura 3-7 Recorrido GPS con Scooter	48
Figura 3-8 Voltaje-SoC batería LiFePO ₄	49
Figura 3-9 Potencia salida del motor Scooter	50
Figura 3-10 Potencia eléctrica de entrada al motor Scooter.....	51
Figura 3-11 SoC Scooter eléctrico para recorrido ENM	51
Figura 3-12 URO VAMTAC S3 policial	52
Figura 3-13 URO VAMTAC S3 militar.....	52
Figura 3-14 Recorrido vehículo militar semana I+A	53
Figura 3-15 Conjunto Simulink® vehículo militar	54
Figura 3-16 Velocidad – tiempo recorrido militar	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Características de las baterías empleadas en EV	11
Tabla 2-1 Valores de coeficientes de rodadura [21].....	16
Tabla 2-2 Coeficientes de Peukert [20]	27
Tabla 2-3 Coeficientes de pérdidas de motores eléctricos [20].....	39
Tabla 3-1 Características GM EV 1	44
Tabla 3-2 Datos de batería plomo-ácido	44
Tabla 3-3 Características motor eléctrico.....	44
Tabla 3-4: Autonomía del GM EV1 obtenida mediante Simulink® para diferentes ciclos estándar	47
Tabla 3-5 Datos scooter eléctrico	49
Tabla 3-6 Datos de la batería de LiFePO ₄	49
Tabla 3-7 Características del motor eléctrico	50
Tabla 3-8 Datos dinámicos URO VAMTAC S3.....	53

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Situación actual

El 80% del consumo de energía mundial proviene de los combustibles fósiles, lo que unido al incremento demográfico actual del planeta provocará en las próximas décadas el fin de este recurso como fuente de energía. Alrededor del 24% del consumo total de energía pertenece al consumo realizado por parte de los vehículos. Debido a que este consumo va en aumento, el problema energético se acentúa cada vez más, existiendo una necesidad crítica de desarrollar sistemas de propulsión más eficientes para los automóviles [1].

La industria del automóvil es una parte fundamental en la economía de cualquier país, ya que está estrechamente relacionada con la vida de las personas y que se ha convertido en un factor esencial de la sociedad moderna.

Sin embargo, aunque estamos provistos de vehículos rápidos y confortables, el consumo de petróleo de la industria tradicional del automóvil ha causado en la economía la profunda dependencia de los combustibles fósiles y ha acrecentado el conflicto entre producción y consumo de energía, como refleja la Figura 1-1.

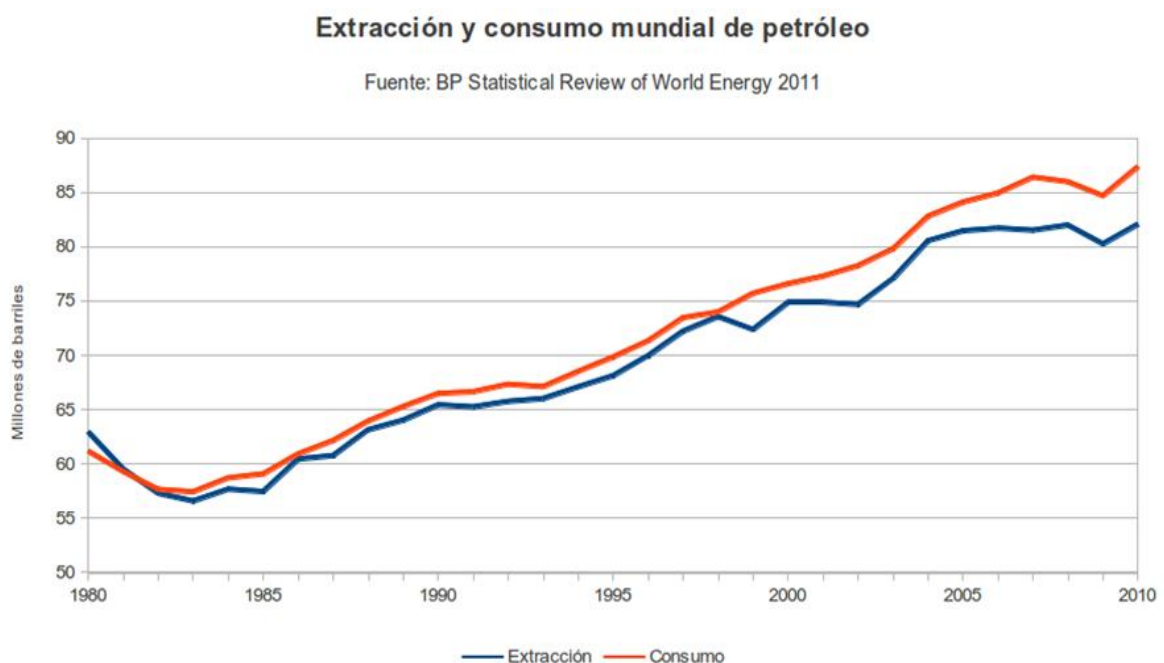


Figura 1-1 Extracción y consumo mundial de petróleo

Más aún, la contaminación de la atmósfera y el calentamiento global son causados por el CO_2 producido en gran medida en los motores de combustión de los vehículos tradicionales [2].

En el momento actual de crisis energética, el incremento de la eficiencia en el consumo de energía y la reducción en la generación de residuos tóxicos es fundamental. Sin embargo, no basta con un avance en la tecnología de los motores de combustión, es necesario desarrollar vehículos con nuevas fuentes de energía. Por lo tanto, el desarrollo de vehículos puramente eléctricos (EV) es una de las soluciones a este problema [3].

Comparados con los vehículos de combustión interna, los vehículos eléctricos presentan múltiples ventajas:

- Alto nivel de eficiencia: la eficiencia de los motores actuales es de entorno al 38%, mientras que en los motores eléctricos se llega a alcanzar eficiencias del 80%.
- Bajo nivel de contaminación y de ruido: al ser propulsados por baterías eléctricas, los EV no generan gases y las vibraciones se reducen en gran medida al no ser un motor de explosión, obteniendo de esta forma un vehículo menos ruidoso.
- Múltiples fuentes de energía posibles: pueden adquirir su energía de la red eléctrica, evitando así el consumo de combustibles fósiles si proviene de fuentes de energía renovables [4].

Por otra parte, la tecnología de los vehículos eléctricos y de otros, como los vehículos de hidrógeno o híbridos, presenta un diseño más complejo que la tecnología de los vehículos tradicionales. El coste de este diseño puede ser reducido mediante simulaciones de vehículos que predigan el comportamiento del vehículo y sus subsistemas ante una gran variedad de condiciones de conducción [5].

Dichas simulaciones son especialmente útiles en el caso de la industria de la automoción, como es el caso de estudio del presente proyecto. Para ello es necesario que el simulador demuestre su precisión y flexibilidad para adaptarse a diferentes entornos de simulación. El software de simulación debe presentarse en una interfaz gráfica para el usuario, que permita la configuración del vehículo y de las condiciones para la simulación.

Gracias al modelo desarrollado en el presente trabajo se puede realizar una estimación de si un vehículo con unas determinadas características dinámicas es factible de ser modificado y sustituir su bloque de propulsión por un bloque de motor eléctrico alimentado con baterías.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es elaborar un modelo global para la simulación de vehículos eléctricos dentro del software Matlab/ Simulink®. Este modelo debe de poder adaptarse a diferentes tipos de vehículos, así como a distintas configuraciones y tecnologías de motor y de baterías.

El segundo objetivo es realizar la comprobación del correcto funcionamiento del modelo global desarrollado, a partir de los datos obtenidos en la bibliografía y de forma experimental utilizando un scooter eléctrico disponible para este Trabajo Fin de Grado.

1.3 Estado del arte

Las emisiones de los gases de efecto invernadero son el producto no deseado y usualmente asociado a la combustión de combustibles fósiles para suplir necesidades energéticas. La severidad del problema del cambio climático debido a los gases de efecto invernadero ha alcanzado un nivel crítico y puede ser fácilmente observable en el calentamiento global y en el deshielo de los icebergs.

Por lo tanto es necesario tomar acciones preventivas inmediatas y políticas climáticas para reducir los impactos del cambio climático. En respuesta a esta necesidad, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) ha señalado algunos escenarios para los futuros sistemas de energía con el objetivo de limitar el

incremento de la temperatura media global en dos grados Celsius para 2050 [6]. La cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2050 se prevé que sea el doble de la actual si las medidas e iniciativas necesarias no son llevadas a cabo. El sector del transporte produjo aproximadamente una cuarta parte de estas emisiones de gases en el año 2009, aumentándose la proporción cada año [7].

Varias opciones han sido descubiertas y desarrolladas para reducir las emisiones del sector del transporte. El principal objetivo es desarrollar nuevos combustibles e introducir tecnologías más limpias en los vehículos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo mejorando el comportamiento de los mismos. El transporte con medios propulsados eléctricamente es uno de los enfoques más prometedores.

Los vehículos eléctricos ("*Electric Vehicles*", EV) podrían mejorar la seguridad energética diversificando sus fuentes de energía, fomentando el crecimiento económico al crear nuevas industrias avanzadas y protegiendo al medio ambiente de las emisiones masivas de gases. Los EV se comportan de forma general mejor que los vehículos de combustión interna debido al uso de transmisiones más eficientes y de motores eléctricos, los cuales presentan un rendimiento mucho mayor que los motores de combustión interna [8].

Muchos gobiernos alrededor de todo el mundo están implementando diferentes iniciativas, políticas y programas para aumentar el uso de los EV, como son los incentivos al coste de adquisición del vehículo, desarrollo de la infraestructura de carga y el incremento de la conciencia pública de los beneficios de este tipo particular de vehículos. De acuerdo al "Panorama Global de los EV" preparado para la "Iniciativa de Vehículos Eléctricos" de la IEA, el stock mundial de estos vehículos es de 180.000 unidades a finales del año 2012. Esta cifra representa un 0,02% del stock mundial de vehículos y la tecnología continúa en vías de investigación y desarrollo para continuar con su aumento [9].

El desarrollo continuo de las tecnologías de los EV es el factor crucial para mejorar su rendimiento y asegurar su competitividad. Por ejemplo, los esfuerzos en la investigación se centran en tecnologías de transmisión, baterías y la infraestructura de carga de las mismas. Con el objetivo de responder a diferentes demandas, se han desarrollado diferentes configuraciones de la transmisión de los vehículos eléctricos, tales como configuraciones en paralelo y en serie [10]. Estas configuraciones de transmisión permiten ahorrar combustible y aumentar la autonomía de los EV debido al uso de motores eléctricos altamente eficientes [8].

De manera similar, la tecnología de las baterías ha evolucionado del plomo-ácido a las basadas en níquel, posteriormente a las ZEBRA y finalmente a los diferentes tipos de baterías de litio, consiguiendo capacidades muy altas de almacenaje con una gran densidad de energía, ligereza, seguridad y durabilidad, sin ser especialmente caras [11]. Nuevas infraestructuras de cargado rápido se están abriendo paso para reemplazar a los lentos cargadores tradicionales, como por ejemplo la estación de cargado rápido de corriente continua que está contribuyendo a la preocupación por la autonomía entre los conductores de EV en algunos países como Holanda, donde se pretende establecer una estación de carga rápida cada 50 kilómetros a lo largo de todo el territorio [12].

Actualmente se están llevando a cabo estudios para analizar el impacto de los EV, principalmente centrados en la economía, el medio ambiente y la mejora en la red de energía. El coste del impacto de los EV depende fundamentalmente de la generación de la energía empleada en los mismos. Como los EV dependen de la electricidad de la red eléctrica para su propulsión, el coste de la generación de dicha energía afecta al coste del uso de los EV, por lo que el impacto económico se puede realizar desde el punto de vista de la red de suministro eléctrico. La red necesita redimensionarse y aumentar la capacidad de generación y almacenamiento de energía para soportar y proveer de forma adecuada de la gran carga eléctrica necesaria para los EV. Sin embargo, con la implementación de estaciones de carga, la comercialización de la energía y políticas eléctricas, el despliegue de los EV podría ser beneficioso para el funcionamiento de la red eléctrica [13] [14].

Es obvio que los EV producen cero emisiones de gases de efecto invernadero, pero por otro lado la electricidad que emplean ha sido generada en la mayoría de los casos produciendo contaminación. Por lo tanto, el impacto ambiental del uso de los vehículos eléctricos depende de las fuentes de las cuales se obtiene la energía empleada en ellos. El reciente incremento y desarrollo de las energías renovables ha favorecido que los EV sean respetuosos con el medio ambiente en mayor medida que los tradicionales vehículos de motores de combustión interna [15].

Los vehículos eléctricos han sufrido una serie de desarrollos tecnológicos antes de conseguir su reciente popularidad. La continua evolución de las tecnologías es muy importante para poder conseguir competir con los vehículos de motor de combustión y para continuar extendiendo el uso de EV. Las atenciones han sido puestas en la mejora de tecnologías tales como las transmisiones, baterías y la infraestructura de carga de vehículos.

La clasificación actual de EV se hace en base al grado de hibridación de los vehículos, pudiendo encontrar vehículos eléctricos híbridos (HEVs), vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEVs) y vehículos eléctricos de baterías (BEVs). HEVs son impulsados mediante una combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico, no pudiendo admitir cargas desde fuentes de energía externas, como por ejemplo la red eléctrica. La batería en este tipo de vehículos es cargada gracias al propio motor de combustión interna o gracias a un freno regenerativo. Este proceso consiste en transformar la energía cinética del vehículo en energía química, la cual es almacenada en la batería para un posterior uso. Los PHEVs son similares a los HEVs pero con características extra, tales como una batería de mayor tamaño y la posibilidad de ser cargados desde una fuente externa. Por el contrario, los BEVs operan únicamente con la energía de la batería.

Tanto los HEVs como los PHEVs son propulsados por dos fuentes distintas, motor de combustión interna y motor eléctrico. Existe un reducido número de configuraciones para la transmisión en estos vehículos donde cada una se emplea para conseguir un objetivo distinto, como mejorar el consumo, incrementar la potencia o reducir el coste. La configuración más común es en serie, seguida por en paralelo y en serie-paralelo. Los HEVs de configuración en serie, por ejemplo, son adecuados para la conducción por ciudad debido a la continua sucesión de aceleraciones y frenadas a la que son sometidos, pudiendo mejorar la eficiencia global del vehículo en un 25% siendo además más simple de diseñar, controlar e implementar que los otros modelos [10].

Los BEVs emplean una única fuente de energía, la batería, y un único motor eléctrico como propulsión. Por lo tanto, el BEV tiene un sistema de propulsión completamente eléctrico y siempre opera en alimentado por la batería. La batería puede ser recargada a través de un freno regenerativo durante la conducción y cargada de forma externa cuando el vehículo se encuentre estacionado. Para todos los BEVs la autonomía depende de la capacidad de carga de la batería. Generalmente este tipo de vehículos es empleado en ciudades, aunque debido a que su autonomía se incrementa de forma continua está adquiriendo importancia en otros ámbitos, no sólo en conducción urbana. Además cuenta con las ventajas de no emitir ningún tipo de contaminante y poseer una sencilla configuración que repercute en un mejor comportamiento del vehículo. Una configuración típica de BEV es la mostrada en la Figura 1-2:

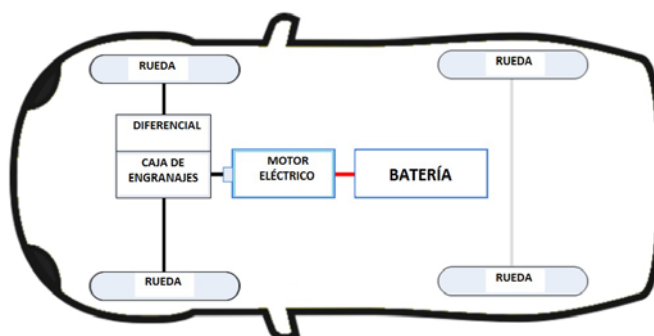


Figura 1-2 Configuración típica de un BEV

La batería es el componente clave de cualquier EV, sobre todo de los BEVs en los cuales es la única fuente de alimentación. Existen todavía algunas restricciones en la tecnología actual de las baterías, que se convierten en algunos casos en una barrera para EV de mayor tamaño, aunque esta tecnología se encuentra en continuo proceso de investigación y mejora. Las baterías empleadas en los vehículos eléctricos modernos presentan una relativamente baja densidad de energía, la cual afecta directamente a la autonomía. Además, el alto coste de las mismas coloca a los EV en una posición de desventaja con respecto a los vehículos de motor de combustión interna. Incluso hay algunas preocupaciones sobre los ciclos de vida de las baterías y de su seguridad.

Sin embargo, las baterías de los EV han hecho tremendas mejoras en las últimas décadas hasta el punto de crear baterías con alta densidad y poder energéticos, seguras y no excesivamente caras. La tecnología inicial empleada fue la de tipo plomo-ácido, cuyo nombre proviene de la combinación de electrodos de plomo y un ácido empleado en generar electricidad. Esta tecnología es barata y se ha desarrollado extensamente, aunque presenta algunos inconvenientes como por ejemplo una baja densidad de energía, elevado peso y requieren revisiones del nivel de electrolitos, no siendo además respetuosa con el medio ambiente.

Debido a estos inconvenientes, las baterías de plomo-ácido fueron reemplazadas por baterías basadas en el níquel, como por ejemplo las de níquel-cadmio y níquel-hidruro de metal. A lo largo del tiempo, conjuntamente con la mejora de las tecnologías, se desarrollaron otros tipos de baterías, como fueron las ZEBRA, de sodio-cloruro de níquel, hasta llegar a las baterías basadas en el litio.

Los dos tipos fundamentales de baterías de litio son la de iones de litio y la de polímero de litio. Constituyen el futuro próximo de las baterías en vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética, ligereza, bajo coste, no toxicidad y posibilidad de cargado rápido. Esta tecnología es la empleada en los EV actuales, sobretodo la $LiFePO_4$, ofreciendo un tiempo de vida más elevado al poder usarse durante más ciclos. En la Tabla 1-1 se puede observar una comparación entre las principales características de las baterías empleadas en EV:

Batería	Energía específica $Wh \cdot kg^{-1}$	Densidad Energética $Wh \cdot L^{-1}$	Potencia específica $W \cdot kg^{-1}$
Plomo-ácido	30	75	250
Níquel-cadmio	50	80	150
Níquel-hidruro de metal	65	150	200
Zebra	100	150	150
Iones de litio	90	150	300
Zinc-aire	230	270	105

Tabla 1-1 Características de las baterías empleadas en EV

Aunque existen otras tecnologías de baterías en vías de investigación, como las de litio-azufre y zinc-aire, habrá que esperar ya que presentan de momento desventajas que impiden su uso en los EV.

El panorama actual por lo tanto de los vehículos eléctricos es muy prometedor y se puede observar en las políticas que están llevando a cabo algunos países y los incentivos para los usuarios que se deciden por adquirir un vehículo de estas características, además de la continua mejora del servicio de alimentación para vehículos eléctricos a partir de la red eléctrica y de la concienciación de la población por la crisis energética y el problema del cambio climático.

1.4 Software de simulación

El objetivo principal del uso de software de simulación es conocer las prestaciones que tendrá un determinado vehículo eléctrico en base a diferentes parámetros de diseño. Para ello se realizan aproximaciones lo más similares a las reales mediante el uso de las ecuaciones que lo modelan. Las simulaciones aquí realizadas serán verificadas mediante ensayos “in situ” con un vehículo eléctrico.

La programación del simulador se llevará a cabo bajo el entorno de MATLAB® (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") el cual es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) [16]. El paquete de MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que aumentan sus prestaciones: Simulink y Guide. En nuestro caso usaremos Simulink® como herramienta de simulación.

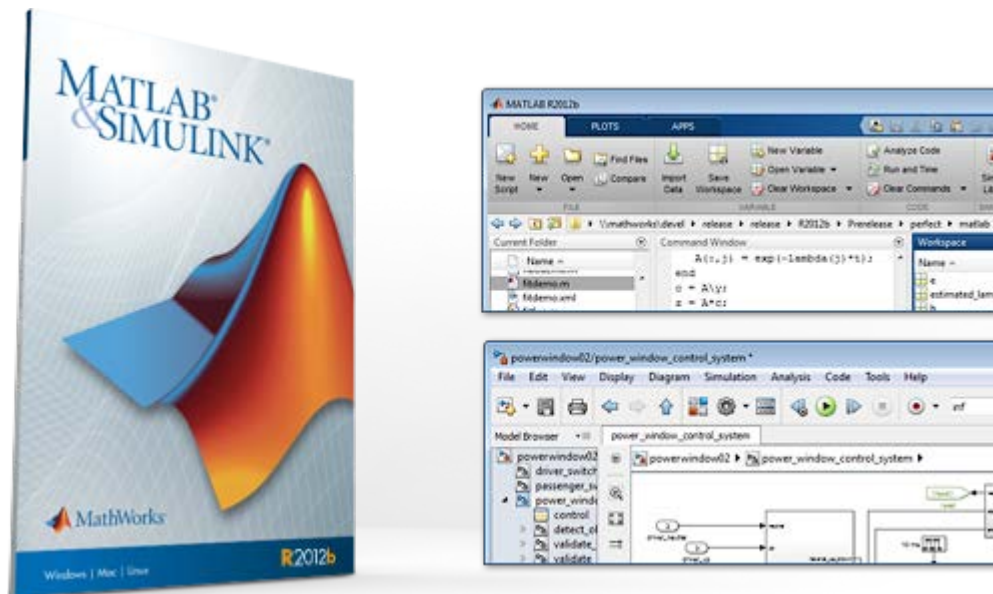


Figura 1-3 Software de simulación: Simulink®

Simulink® funciona bajo un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y diferentes algoritmos de resolución matemática (“solvers”) para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB® para llevar a cabo más análisis [17].

Mediante el uso de esta herramienta es posible simular el comportamiento dinámico del sistema y ver los resultados a medida que se ejecuta la simulación. Para garantizar la velocidad y la precisión de la simulación, Simulink® proporciona diferentes “solvers” de ecuaciones diferenciales ordinarias de paso fijo y paso variable.

Las principales características del software se pueden resumir como [18]:

- Diagramas de bloques de sencilla construcción y comprensión, que permiten manejar sistemas complejos mediante tratamiento modular.
- Librerías de uso común, las cuales se pueden utilizar fácilmente para la realización de simulaciones en lazo cerrado de manera sencilla.
- Estructuras y configuraciones flexibles y funciones definibles por el usuario.
- Potentes métodos de resolución para manejar sistemas no lineales.
- Gráficos y herramientas de gran alcance.

En resumen, Simulink[®] permite modelar sistemas utilizando elementos disponibles en diferentes bibliotecas. Estos elementos son arrastrados al área de trabajo, donde son configurados y conectados a otros elementos. Este es el motivo por el cual se considera que es un entorno de programación visual.

Las ecuaciones usadas para la simulación en este proyecto son de aplicación para cualquier tipo de automóvil (entendiéndose como tal a aquel capaz de realizar desplazamientos por sí mismo, es decir, sin ser arrastrado ni movido por terceros, y con un sistema propio de dirección). Gracias a esto es posible que el simulador creado permita la implementación de diferentes modelos de vehículos siempre y cuando se configure convenientemente y con anterioridad, ya que, aunque las ecuaciones no varían, sí lo hacen los parámetros que definen por ejemplo el área frontal del vehículo, el par transmitido por el motor eléctrico o la capacidad de almacenaje de energía por parte de las baterías.

2 MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

2.1 Modelado de la Dinámica

2.1.1 Ecuaciones para el cálculo de la dinámica

El primer paso para el modelado de un vehículo va a ser el obtener las ecuaciones necesarias para el cálculo de la dinámica que actúan sobre éste. Para ello es necesario conocer cada una de las fuerzas actuantes, ya sea para el cálculo de las fuerzas necesarias para la tracción, las fuerzas resistentes, la fuerza de aceleración lineal o las fuerzas necesarias para superar una pendiente.

2.1.1.1 Fuerza de tracción

Se define fuerza de tracción o fuerza motriz como aquella necesaria para propulsar el vehículo, siendo transmitida a través de las ruedas. Esta fuerza viene dada por una ecuación que considera diferentes parámetros, tales como la masa del vehículo (m), la velocidad (v) y el ángulo de la pendiente a vencer (ψ) [19]. Es necesario en primer lugar definir esta ecuación para realizar el modelado del vehículo eléctrico.

Para ello deben de conocerse las fuerzas que el vehículo debe superar y que se oponen a su movimiento. Estas fuerzas son principalmente la fuerza de resistencia a la rodadura (F_{rr}), la fuerza de resistencia aerodinámica (F_{ad}), la componente del peso del vehículo cuando éste se encuentra en una pendiente (F_{hc}) y la fuerza necesaria para acelerar o decelerar en caso necesario (F_{la}).

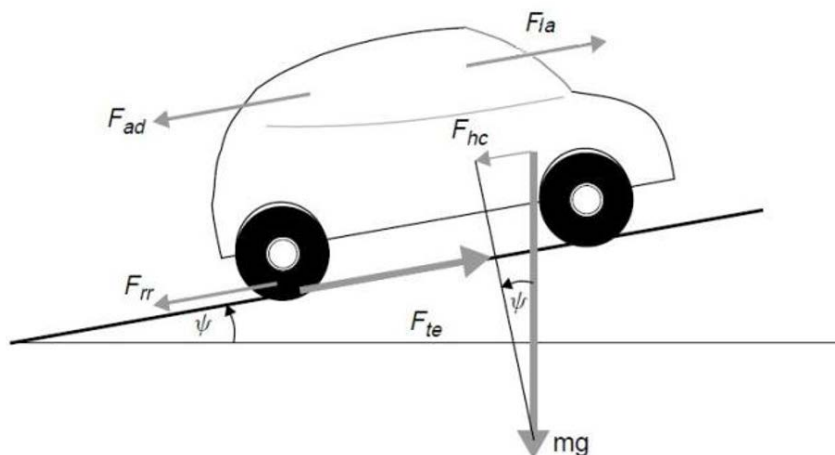


Figura 2-1 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento por una pendiente

En resumen, se deberá modelar una fuerza de tracción capaz de vencer el conjunto de fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, mostradas en la Figura 2-1. Esta fuerza de tracción vendría dada por la siguiente ecuación:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} \quad (\text{Ec. 2. 1})$$

Para el caso de este estudio se excluirá la fuerza correspondiente al momento de inercia. Con el objeto de compensar esta falta, se incrementará un 5% la masa de nuestro vehículo en la ecuación de la fuerza de aceleración lineal para la programación en Simulink® [20].

Como se quiere conocer la energía necesaria que debe aportar la batería, se van a usar intervalos de tiempo de un segundo para la simulación, resultando así que la energía requerida será por tanto la misma que la potencia consumida. Dicha energía requerida por segundo o potencia eléctrica que debe entregar la batería para la tracción (P_{te}), es resultado de:

$$P_{te} = F_{te} \cdot v \quad (\text{Ec. 2. 2})$$

En la simulación uno de los datos de los que se parte y que proporcionará el dispositivo de GPS es la distancia recorrida con un intervalo de tiempo de un segundo. De esta forma se puede obtener directamente la velocidad v , ya que se dispone de la distancia en metros por cada segundo. Gracias a esto la simulación del vehículo será más sencilla una vez que el modelo esté elaborado.

Si sustituimos en la ecuación de suma de fuerzas, obtendríamos la expresión para la potencia de tracción:

$$P_{te} = (F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la}) \cdot v \quad (\text{Ec. 2. 3})$$

A continuación, en los siguientes apartados, se desarrollan cada una de las fuerzas que intervienen en esta expresión.

2.1.1.2 Fuerza de resistencia a la rodadura

Cuando un neumático rueda sobre una superficie dura, sometido a una carga vertical, se produce una deformación radial de cierta importancia. La distribución de presiones en la superficie de contacto no es simétrica respecto del eje Y [21], tal como se representa en la Figura 2-2.

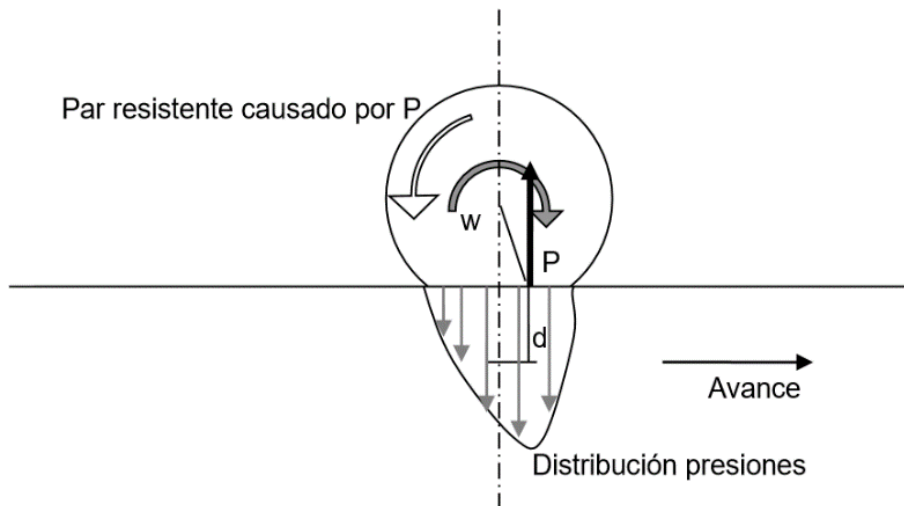


Figura 2-2 Distribución de presiones en un neumático

El centro de presiones y la resultante de fuerzas verticales (P) quedan desplazados en el eje X hacia delante, lo que produce un momento alrededor del eje de rotación del neumático, que se opone a su

movimiento. A este momento se le denomina momento de resistencia a la rodadura, originado por la fuerza de resistencia a la rodadura F_{rr} .

La fuerza de resistencia a la rodadura es producida en su mayor parte por la fricción entre los neumáticos del vehículo y el suelo, aunque también es debida a la fricción entre los cojinetes y los rodamientos internos del vehículo. Está relacionada con una pérdida de potencia que se debe a los siguientes factores: pérdidas por histéresis en el interior de la estructura del neumático, la estructura del mismo, la presión de inflado, la rugosidad del asfalto, tipo de materiales que componen el asfalto y la presencia o ausencia de líquidos en la calzada [21].

Se puede aproximar esta fuerza como constante y directamente proporcional a la componente del peso del vehículo. La ecuación quedaría definida de la siguiente forma:

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde μ_{rr} es el coeficiente de resistencia a la rodadura, m es la masa total del vehículo y g la constante de la gravedad. El coeficiente de resistencia a la rodadura se ve principalmente afectado por el tipo de suelo y por la presión de inflado del neumático. A continuación se muestran algunos de los valores típicos de coeficientes:

VALORES DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA A LA RODADURA	
Carretera en buen estado	0,02 a 0,04
Camino de tierra afirmado	0,03 a 0,05
Camino de tierra	0,04 a 0,06
Suelo baldío	0,06 a 0,10
Rastrojo seco	0,08 a 0,10
Tierra labrada	0,10 a 0,20
Arena y suelo muy suelto	0,15 a 0,30

Tabla 2-1 Valores de coeficientes de rodadura [21]

Existen una serie de ecuaciones que nos permiten calcular dicho coeficiente, pero para simplificar nuestro modelo partiremos de datos predefinidos. Típicos valores de μ_{rr} serían 0,015 para neumáticos radiales y 0,005 para neumáticos desarrollados especialmente para vehículos eléctricos.

2.1.1.3 Fuerza de resistencia aerodinámica

Esta fuerza se debe a la fricción de la carrocería del vehículo en movimiento con el aire. Es función del área frontal del vehículo, forma, salientes como los espejos, los conductos y las vías de aire, entre otros [19].

La ecuación usada para determinar la energía de fricción es una simplificación, se evita la simulación compleja del flujo de aire mientras que se preserva el comportamiento general de la fuerza de fricción con respecto a la velocidad:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Siendo:

- ρ la densidad del aire y tiene un valor de $1,23 \text{ Kg/m}^3$. Esta densidad del aire varía con la temperatura, la altitud y la humedad. Sin embargo este valor tomado es razonable usarlo como aproximación en la mayoría de los casos.

- A_f el área frontal del vehículo y puede tomar valores desde $0,5 \text{ m}^2$ para una bicicleta hasta $2,8 \text{ m}^2$ para un coche poco aerodinámico.
- v es la velocidad instantánea del vehículo.
- C_d el coeficiente aerodinámico que caracteriza el perfil del vehículo. Este coeficiente es una constante sin dimensiones que procura capturar en un término la resistencia de un objeto al flujo de aire. Se puede reducir con un buen diseño del vehículo. Puede oscilar desde 1,2 para una bicicleta con una persona erguida, hasta 0,47 para una esfera o incluso 0,2 para un automóvil moderno muy aerodinámico.

Para simplificar este modelo no se va a considerar la velocidad del viento debido a la complejidad de obtención de este dato en cada instante de tiempo, aunque se podría incluir en la ecuación al sumarla o restarla a la componente de la velocidad en función de la dirección de ambos.

2.1.1.4 Fuerza para superar una pendiente

Ante una pendiente es necesario que el vehículo ejerza una fuerza para superarla (F_{hc}), siendo para ello necesario vencer la componente horizontal del peso en función del ángulo de la cuesta (Ψ) [19]. A través del diagrama de fuerzas se obtiene que la fuerza de resistencia a una pendiente es:

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\Psi) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Cuando el vehículo asciende por una pendiente esta fuerza siempre se opondrá al movimiento, y cuando el vehículo descienda esta fuerza estará a favor.

2.1.1.5 Fuerza de aceleración lineal

Si en algún momento el vehículo cambia su velocidad, será debido a una fuerza, conocida como fuerza de aceleración lineal. Esta debe ser añadida al sumatorio anterior de fuerzas y proveerá al automóvil de una aceleración lineal [19]. Este término es obtenido a partir de la segunda ley de Newton:

$$F_{la} = m \cdot a \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Siendo F_{la} la fuerza de aceleración lineal, m la masa del vehículo y a la aceleración lineal que sufre este vehículo y que es debida al aumento o disminución de su velocidad.

Para el cálculo de la fuerza necesaria de aceleración del vehículo es necesario considerar el momento de inercia de los elementos rotacionales del mismo, es decir, la fuerza necesaria para que los elementos rotatorios giren más rápido, lo que complicaría en exceso la simulación. Para simplificar este desarrollo, tal y como comentábamos anteriormente, se aumentara la masa del vehículo un 5% al aplicar la fórmula de Newton. Por lo tanto, la fórmula a introducir será:

$$F_{la} = 1,05 \cdot m \cdot a \quad (\text{Ec. 2.8})$$

2.1.2 Potencia eléctrica necesaria

La potencia se refiere a la velocidad con que un par o una fuerza son aplicados, así, si tenemos dos motores generando el mismo par, el motor que lo aplica a mayores revoluciones por minuto, tiene más potencia [19].

La influencia de la potencia en la velocidad del vehículo está dada en la aceleración, por ejemplo, un vehículo más potente acelerará en un menor tiempo que el motor menos potente.

La potencia eléctrica necesaria viene dada por la ecuación 2.3 definida anteriormente. Al sustituir en ésta fórmula obtendremos:

$$P_{te} = (\mu_{rr} \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\Psi) + 1,05 \cdot m \cdot a) \cdot v \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Para obtener la potencia de salida del motor a partir de la energía necesaria de tracción, necesitaremos conocer previamente la eficiencia de la caja de cambios ($Gear_{Effic}$). Esta eficiencia es normalmente tomada como constante, ya que los vehículos eléctricos generalmente disponen de una sola velocidad.

Como el sistema de engranajes normalmente será sencillo, su eficiencia va a ser muy elevada, tomando como valor de referencia un 95%. Este parámetro podrá modificarse en función del vehículo simulado en cualquier momento.

La potencia mecánica de salida se puede expresar en función de esta eficiencia, que variará en función de si estamos aumentando la velocidad ($P_{te} > 0$) o si la estamos disminuyendo ($P_{te} < 0$), por lo tanto, la eficiencia trabajará en sentidos opuestos si se trata de un caso o de otro. Si estamos disminuyendo la velocidad la potencia mecánica también se reducirá.

Cuando $P_{te} < 0$, utilizaremos previamente una corrección que definiremos como relación de regeneración (Reg_{Ratio}), y que reduce la potencia requerida para la tracción de nuestro vehículo en el caso en el que estemos frenando. Este frenado regenerativo permite recuperar parte de la energía que se pierde en la frenada, y para ello el motor funcionará como generador cargando la batería y al mismo tiempo frenando el vehículo.

Por lo tanto, los cálculos realizados en la función de la Figura 2-1 son los descritos a continuación:

1.-La velocidad angular de la rueda es mayor que cero (hay movimiento):

Si la potencia de tracción es mayor o igual que cero, la potencia de salida del motor será la potencia de tracción por la eficiencia de los engranajes.

$$P_{mot_{out}} = P_{te} * Gear_{Effic} \quad (Ec. 2.10)$$

Si no es mayor o igual, la potencia mecánica será igual a la relación de regeneración por la potencia. La potencia de salida del motor será la potencia mecánica calculada entre la eficiencia de los engranajes:

$$P_{te} = Reg_{Ratio} * P_{te} \quad (Ec. 2.11)$$

$$P_{mot_{out}} = P_{te} / Gear_{Effic} \quad (Ec. 2.12)$$

El par (*Torque*) será la potencia de salida del motor entre la velocidad angular de la rueda:

$$Torque = P_{mot_{out}} / Omega \quad (Ec. 2.13)$$

2.-La velocidad angular de la rueda es menor o igual a cero. En este caso, la potencia de salida y el par serán nulos.

2.1.3 Modelado en Simulink® de la dinámica

El objetivo para el modelado de la dinámica del vehículo es obtener la potencia generada, la velocidad y el par motor transmitido a partir de dos entradas de datos: velocidad y pendiente. Para ello será necesario en primer lugar definir estas entradas de datos, y que serán a posteriori los inputs del modelo global de esta simulación dinámica.

2.1.3.1 Ciclos de Conducción

La velocidad será implementada mediante un recorrido obtenido por GPS o ciclo de conducción (ECE-15, EUDC, NEDC, etc.).

Los ciclos de conducción están predefinidos e intentan emular el comportamiento al volante de los usuarios, y son válidos tanto para tramos urbanos como en interurbanos. Para ello se combinan tramos de distintas velocidades en una escala temporal. Son usados normalmente por los fabricantes de vehículos a la hora de calcular el consumo de combustible de un determinado motor [22].

En Europa se emplea el NEDC (New European Driving Cycle), cuyo uso es necesario para homologar un vehículo en este continente. Este ciclo se muestra en la siguiente gráfica (Figura 2-3):

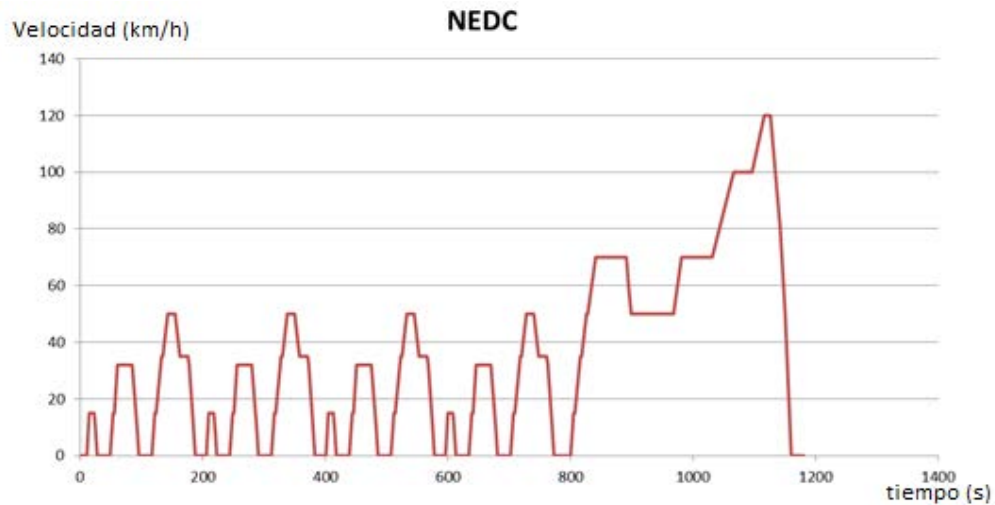


Figura 2-3 Ciclo de conducción estándar (NEDC)

La crítica fundamental para estos tipos de ciclos estándar, es la incapacidad para representar una conducción real. La prueba reproduce un patrón de aceleraciones suaves, velocidades de crucero constantes y muchos períodos al ralentí. Sin embargo, en la práctica las aceleraciones son mayores y dinámicas debidas en parte al exceso de potencia de los motores modernos. La media de aceleración de 0 a 100 km/h ha descendido de 14 segundos en 1981 a 9 segundos en 2007. La brecha entre las cifras homologadas y las reales aumentaron de un 8% en 2001 a un 21% en 2012 y a un 40% en 2014 [23].

Es por todos estos motivos por los que los ciclos de conducción, aunque permiten esbozar el comportamiento de un vehículo, no representan con fidelidad el comportamiento real. Es por ello que en el simulador desarrollado en el presente trabajo se llevará a cabo una simulación real con un ciclo de conducción real, con el fin de corregir posibles discrepancias entre ambos métodos (ciclos de conducción y recorridos reales).

2.1.3.2 Bloque de configuración del vehículo

Una vez definida la entrada de datos del sistema, se hace necesario definir todos los parámetros o constantes del modelo que usaremos a lo largo de la simulación e introducirlos en el programa. Estos términos variarán en función del vehículo que queramos simular. Los parámetros a utilizar serán: coeficiente de resistencia a la rodadura, área frontal del vehículo, coeficiente aerodinámico, masa total, relación de transmisión, radio del neumático, relación de regeneración y eficiencia de los engranajes. Se muestran en la siguiente figura (Figura 2-4) en el orden descrito:

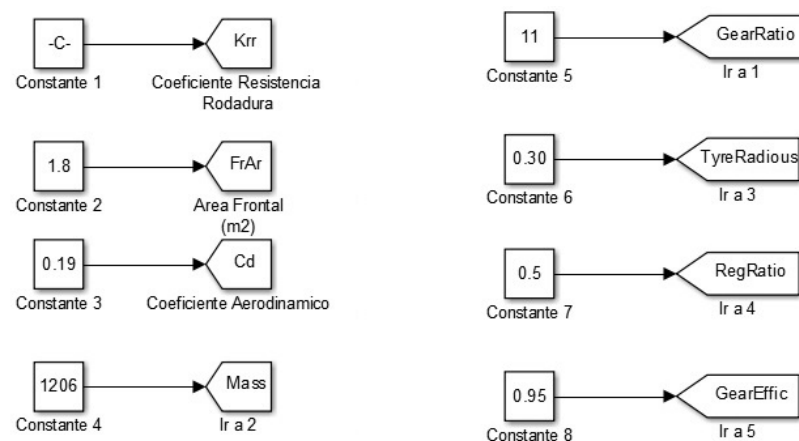


Figura 2-4 Bloque de constantes

Una vez definidas las constantes que necesitaremos para el estudio dinámico del vehículo, se desarrollarán los diferentes bloques de los que se compone. Estos bloques serán de: fuerza de aceleración, fuerza de resistencia aerodinámica, fuerza de resistencia a la rodadura y fuerza necesaria para superar una pendiente.

Estas fuerzas se unirán en un bloque denominado fuerza total de tracción, añadiendo como entradas la velocidad y el ángulo de la pendiente. Posteriormente se empleará esta fuerza total para el cálculo de la potencia mecánica, obteniendo a la salida del simulador los valores de la potencia de salida del motor, la velocidad de giro del neumático y el par desarrollado.

2.1.3.3 Bloque de fuerza de aceleración

Este bloque (Figura 2-5) calcula la fuerza de aceleración lineal del vehículo a partir de tres entradas: la aceleración, la velocidad y la masa. También se incluye la compensación del momento de inercia explicada con anterioridad, para ello bastará con multiplicar la masa del vehículo por un factor de 1,05. Las tres entradas se multiplicarán para obtener la fuerza de aceleración en Newtons.

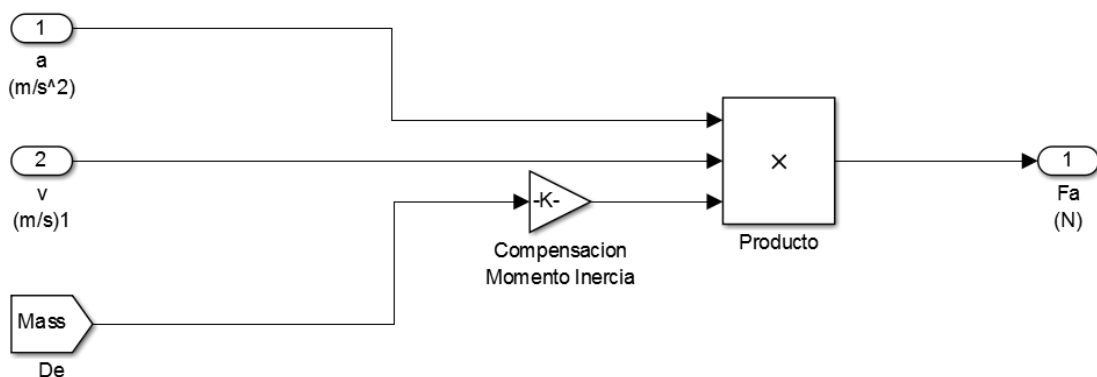


Figura 2-5 Bloque de fuerza de aceleración

2.1.3.4 Bloque de fuerza de resistencia aerodinámica

Para el cálculo de la fuerza de resistencia aerodinámica será necesario introducir múltiples parámetros. Estos parámetros a definir son la densidad del aire, el área frontal del vehículo y el coeficiente aerodinámico del mismo. Todos ellos, multiplicados por la velocidad al cuadrado, darán como resultado la fuerza que se busca. En la Figura 2-6 se muestra el resultado de todo este proceso para el cálculo de la fuerza de resistencia aerodinámica.

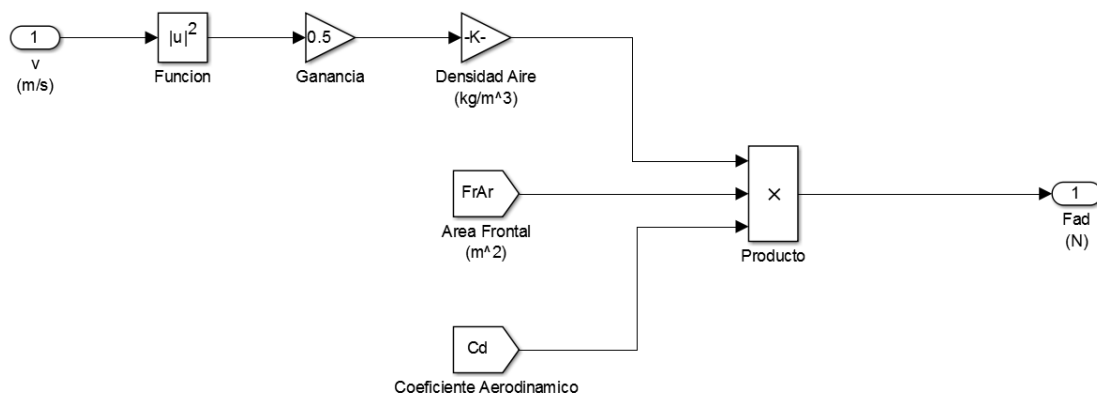


Figura 2-6 Bloque de fuerza aerodinámica

2.1.3.5 Bloque de fuerza de resistencia a la rodadura

Es necesario un bloque que desarrolle la resistencia a la rodadura (Figura 2-7) y calcule la fuerza necesaria para vencerla. Se consigue mediante el siguiente bloque, que multiplica la masa del vehículo por la gravedad y el coeficiente de resistencia a la rodadura.

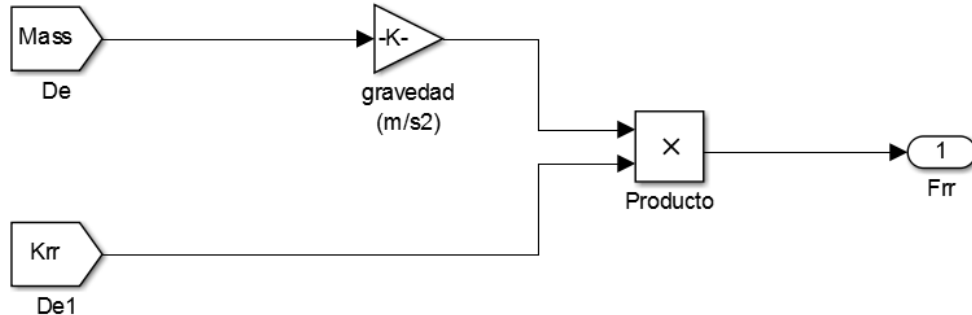


Figura 2-7 Bloque de fuerza de resistencia a la rodadura

2.1.3.6 Bloque de fuerza para superar una pendiente

Durante el movimiento del vehículo, este deberá superar sucesivas cuestas que requerirán de una fuerza adicional para que se pueda continuar avanzando, a esta fuerza se la denomina como “*Hill climbing force*” o F_{hc} . Estas pendientes vendrán definidas por un ángulo Ψ o ángulo de pendiente.

Para la implementación de este ángulo en Matlab/Simulink® será necesario convertir de grados sexagesimales a radianes dicho dato. Esta conversión se realiza con una función que viene incorporada en la librería de Simulink®. Posteriormente será necesario multiplicar el seno del ángulo hallado por la masa y por la gravedad con el fin de conseguir la fuerza deseada. El resultado final de todo esto puede observarse en la Figura 2-8.

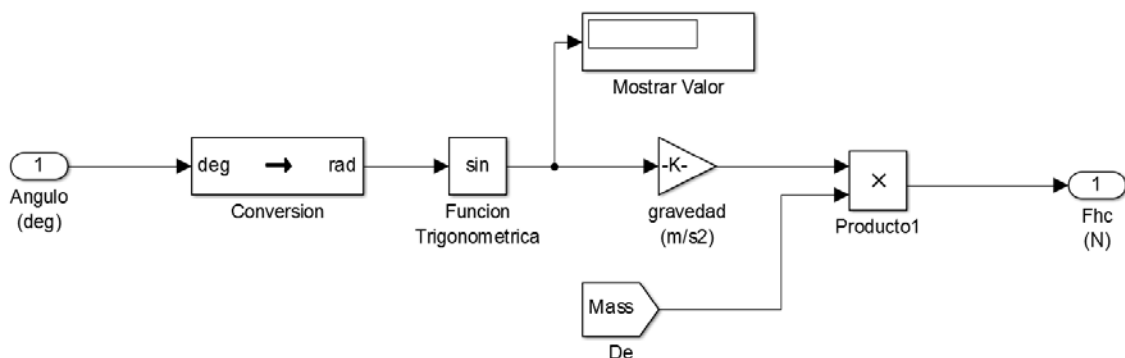


Figura 2-8 Bloque de fuerza para superar una pendiente

2.1.3.7 Bloque de fuerza total de tracción

Una vez calculadas las cuatro fuerzas que debe vencer el vehículo en su movimiento, mediante su suma se obtendría la fuerza total de tracción. Esta acción resulta de unir las salidas de los bloques descritos anteriormente mediante una función suma tal y como se muestra en la (Figura 2-9).

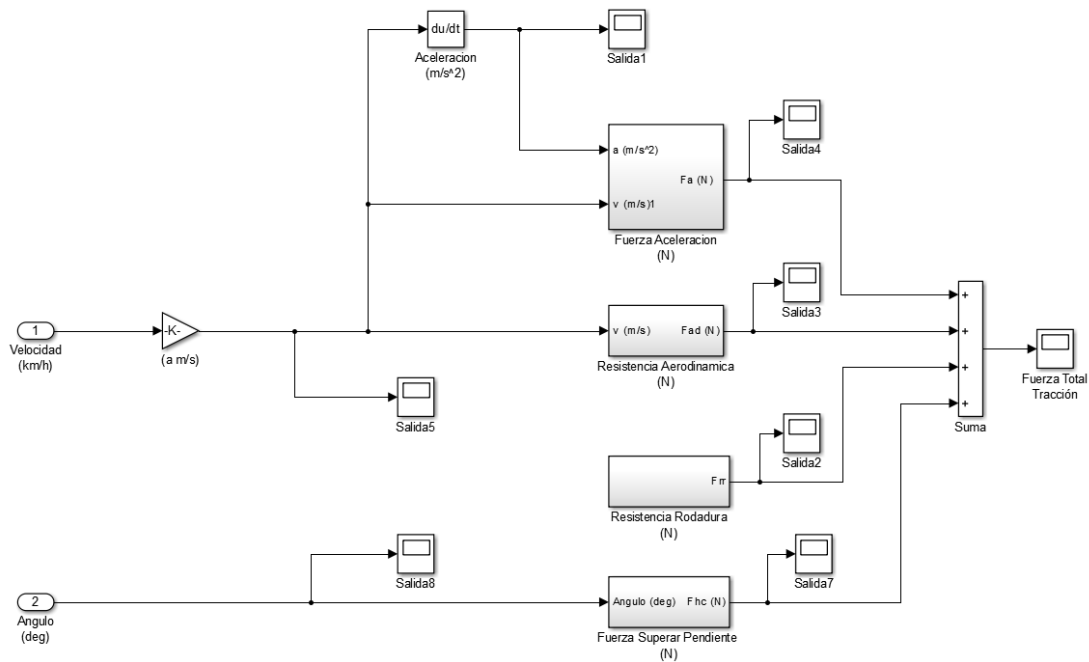


Figura 2-9 Bloque de fuerza de tracción

Por lo tanto, la parte del cálculo de la fuerza de tracción estaría ya completada. Y por tanto al añadir como entradas la velocidad y el ángulo de la pendiente de forma vectorial, se podría llevar a cabo la simulación dinámica de forma adecuada.

2.1.3.8 Bloque de la potencia mecánica

La anterior fuerza de tracción calculada se multiplica por la velocidad a la que circula el vehículo para obtener la potencia eléctrica de tracción necesaria para mover el vehículo (P_{te}). Esta potencia o energía, desarrollada teóricamente en el apartado 2.1.2, es el paso previo para poder obtener la potencia mecánica de salida que debe aportar nuestro motor eléctrico (P_{mot_out}).

Por otra parte, se calcula la velocidad de giro de la rueda usando para ello el radio del neumático y la relación de transmisión, además de la velocidad de desplazamiento del vehículo.

Los cálculos descritos se realizarán mediante una función de MATLAB® integrada en el bloque de la potencia mecánica, mostrado a continuación (Figura 2-10):

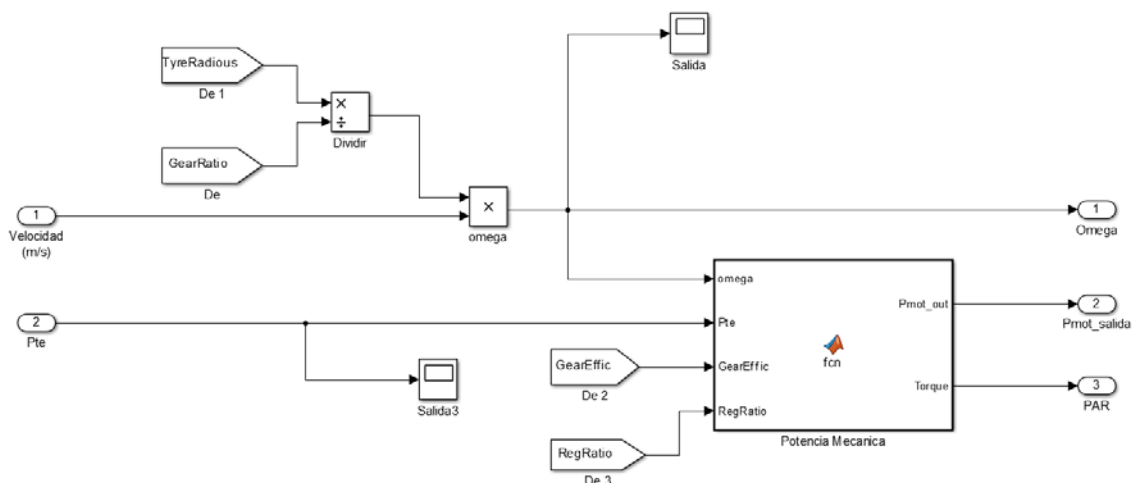


Figura 2-10 Bloque de la potencia mecánica

La función de MATLAB® se desarrolla bajo dos condiciones opuestas: que la velocidad angular de la rueda sea mayor que cero (hay movimiento) o que la velocidad angular de la rueda sea igual o inferior a cero. Esta función nos permite, como se muestra en la Figura 2-11, obtener la potencia de salida del motor eléctrico ($P_{\text{mot_out}}$) y el par (Torque) a partir de la velocidad angular de la rueda (ω), la fuerza necesaria de tracción (P_{te}), la eficiencia de la caja de cambios (GearEffic) y la relación de regeneración (RegRatio).

```
function [Pmot_out,Torque] = fcn(omega,Pte,GearEffic,RegRatio)

if omega > 0 %Movimiento

    if Pte>=0
        Pmot_out=Pte*GearEffic; %Gear Efficiency
        %pte=Pte;
    else
        Pte=RegRatio*Pte;
        Pmot_out=Pte/0.95;
        %pte=Pte;
    end
    Torque=Pmot_out/omega;
else
    Pmot_out=0;
    %pte=0;
    Torque=0;
end
```

Figura 2-11 Función en MATLAB de la potencia de salida

2.1.3.9 Modelo final dinámico

Una vez finalizados los bloques correspondientes a cada una de las fuerzas actuantes en el vehículo, es necesario integrar todos ellos en uno único, para crear el modelo de simulación de la dinámica del vehículo. Para ello basta con unir los datos iniciales y los parámetros a las entradas de los bloques que así lo requieran, y al mismo tiempo unir la salida de estos bloques con las entradas de bloques posteriores. El resultado sería el mostrado a continuación en la Figura 2-12.

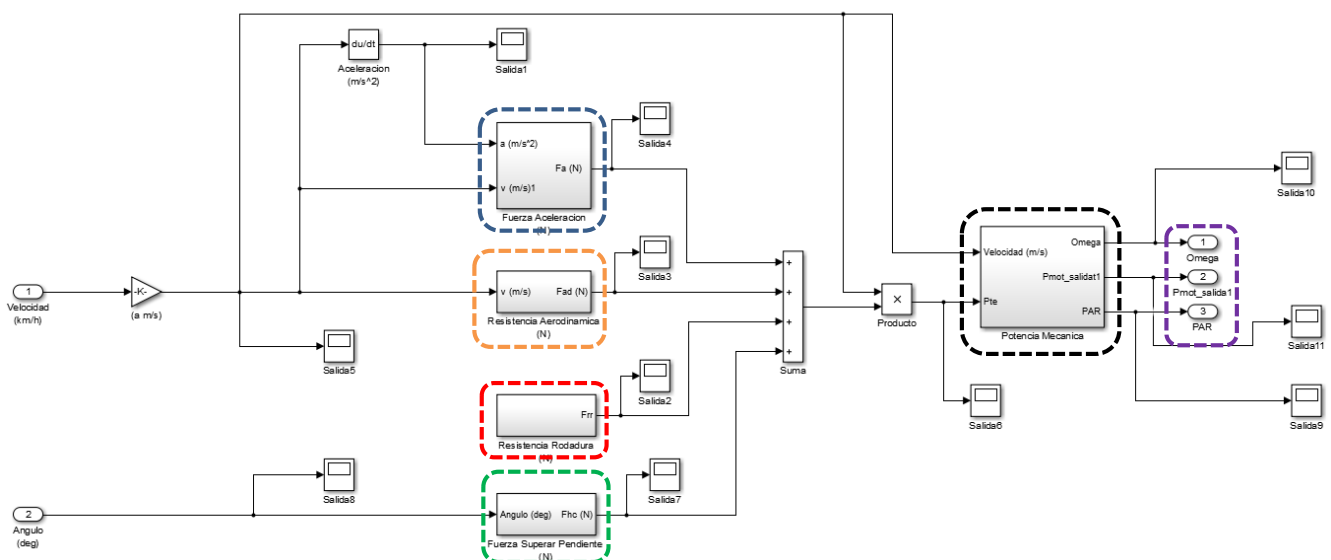


Figura 2-12 Bloque de dinámica

En dicha figura se pueden observar los bloques correspondientes a la fuerza de aceleración (azul), la fuerza de resistencia aerodinámica (naranja), la fuerza de resistencia a la rodadura (rojo) y la fuerza para superar la pendiente (verde), la potencia mecánica (negro) y las salidas de torque, potencia del motor y omega (violeta).

2.2 Modelado de la batería de tracción

Las baterías son un componente clave en los vehículos eléctricos. Su función es almacenar energía gracias a las reacciones electroquímicas de oxidación y de reducción que se producen en su interior. En los vehículos eléctricos clásicos, de hecho, la batería es el único medio de almacenamiento de energía, siendo además el componente de mayor peso, coste y volumen.

2.2.1 Fundamentos de una batería

Una batería eléctrica es un conjunto de dos o más celdas eléctricas unidas entre sí. Las celdas convierten la energía química a energía eléctrica, y se componen de un electrodo positivo o ánodo y de un electrodo negativo o cátodo, unidos por un electrolito. Durante la reacción que tiene lugar en el interior, el oxidante es el elemento que recibe electrones. Sin embargo, el proceso de oxidación consiste en la pérdida de electrones y el proceso de reducción en la ganancia de los mismos. Por lo tanto, el oxidante sufrirá siempre un proceso de reducción y el reductor por el contrario sufrirá un proceso de oxidación [24].

En general, las baterías están compuestas de un recipiente con dos electrodos, relleno de un electrolito metálico o de grafito. Este electrolito es una disolución de una sal, ya sea en estado sólido o líquido. Ambos electrodos pueden compartir electrolito, o si están en electrolitos distintos se unirán mediante un puente salino. Siempre tendrá lugar la oxidación en uno de los electrodos (ánodo) y la reducción en el otro (cátodo) [25], como se muestra en la Figura 2-13 Celda electrolítica.

El puente salino no es más que un tubo que contiene una sal concentrada (normalmente cloruro o nitrato potásico) en una gelatina que actúa como electrolito y permite a los iones viajar entre los dos compartimentos y cerrar el circuito.

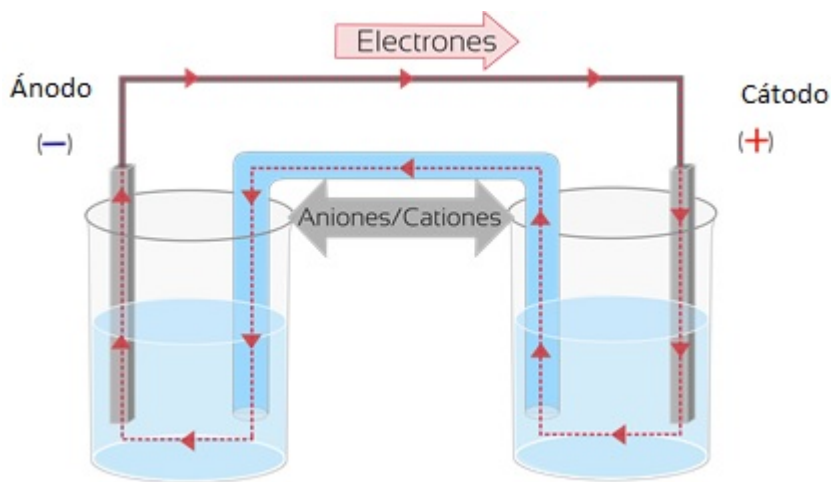


Figura 2-13 Celda electrolítica

2.2.1.1 Tipos de celdas electrolíticas

Existen dos tipos: las celdas primarias y las celdas secundarias [26].

- Las celdas primarias o pilas transforman la energía química en energía eléctrica de manera irreversible. Cuando se agota la cantidad inicial de reactivos presentes en la pila, la energía no puede ser fácilmente restaurada o devuelta a la celda electroquímica por medios eléctricos.
- Las celdas secundarias o baterías pueden ser recargadas, es decir, pueden revertir sus reacciones químicas mediante el suministro de energía eléctrica a la celda, hasta el restablecimiento de su composición original. Las del tipo “Plomo-Ácido” son las baterías

recargables más conocidas y extendidas, pero hay muchos otros tipos, algunos de los cuales se desarrollarán en apartados siguientes.

2.2.1.2 Características de las baterías

En las simulaciones que tienen lugar en este trabajo, se implementará un modelo genérico de batería, por lo que es necesario conocer y comprender las características que rigen su comportamiento. Las más importantes empleadas en la descripción de una batería son las siguientes [27]:

- *Energía específica*: cantidad de energía que la batería puede almacenar por unidad de masa. Su unidad es el Watio hora por kilogramo (Wh/kg).
- *Potencia específica*: potencia que es capaz de suministrar la batería por unidad de masa. Cuanto mayor sea esta potencia, mayor corriente puede aportar con una menor caída de tensión en los bornes. Su unidad es el Watio por kilogramo (W/kg).
- *Densidad de energía*: cantidad de energía que una batería puede almacenar por unidad de volumen. Se mide en Watio hora por litro (Wh/l).
- *Cantidad de ciclos de vida*: número de cargas y descargas que soporta la batería sin variar sus características. Variará en función del uso dado a la batería.

Además es importante resaltar tres conceptos que ayudan a entender el funcionamiento de las baterías. Estos conceptos son característicos para cada modelo distinto de batería y serán empleados en el posterior modelado en Simulink®.

- *Estado de Carga o “State of Charge” (SoC)*: indica el porcentaje de energía presente en la batería en relación con su carga total en un instante concreto.
- *Profundidad de descarga o “Deep of Discharge” (DoD)*: indica el porcentaje de carga que le falta a la batería para estar al 100% de energía ($DoD = 100 - SoC [\%]$). Es el porcentaje que se ha consumido de la batería.
- *Tensión en circuito abierto o “Open Circuit Voltage” (OCV)*: tensión en los bornes de la batería cuando no se conecta a una carga eléctrica.

Todas las baterías proporcionan datos de tensiones nominales, los cuales dan una idea aproximada del estado de la batería.

Por otra parte, las celdas pueden ser conectadas en serie para proporcionar una tensión superior al nominal. Las baterías empleadas en la tracción de vehículos eléctricos suelen emplear una tensión de 6 o 12 voltios, las cuales son conectadas en serie hasta alcanzar el voltaje requerido. Este voltaje podrá variar su valor durante el empleo del conjunto de baterías [20].

2.2.1.3 Tipos de baterías

Debido a que las baterías son el método de almacenaje de energía más empleado en la actualidad, es lógico que se hayan desarrollado múltiples tipos, todas ellas con características dispares unas respecto de otras. En este capítulo se hará referencia a aquellas más comúnmente usadas en aplicaciones de tracción eléctrica en la actualidad, para finalmente desarrollar aquella seleccionada en este proyecto.

2.2.1.3.1 Baterías de Plomo-Ácido

Este modelo de baterías es ampliamente utilizado en la actualidad y además uno de los más antiguos. Emplean óxido de plomo como electrodo positivo y plomo metálico como electrodo negativo, siendo el electrolito ácido sulfúrico. El comportamiento que describen estas baterías durante la descarga es proporcional a la tensión de circuito abierto.

La resistencia interna que presenta este tipo de baterías es muy pequeña, en torno a $0,022\Omega$ por celda y para una capacidad de 1Ah. Es decir que la caída de tensión sufrida al aumentar la intensidad es muy baja.

2.2.1.3.2 Baterías de Níquel-Cadmio

El origen de esta batería se aproxima al de las baterías de Plomo-Ácido, siendo casi tan antiguas como ellas. Se encuadran dentro de las baterías alcalinas caracterizadas por emplear un electrolito de solución acuosa de hidróxido potásico.

La resistencia interna de este modelo es mayor que las de Plomo-Ácido rondando los $0,06\Omega$ por celda con una capacidad de 1Ah. El comportamiento de estas baterías no es lineal, a diferencia de las citadas en el apartado anterior. Dicho comportamiento se muestra a continuación:

2.2.1.3.3 Baterías de Níquel-Hidruro de Metal

Se caracterizan por tener una aleación en el electrodo negativo cuya labor es almacenar el hidrógeno en estado gaseoso. El hidrógeno es absorbido como hidruro almacenándolo a bajas presiones. Esta capacidad de almacenaje es elevada.

Las aleaciones suelen contener titanio y son empleadas en vehículos cuyo combustible es el hidrógeno.

2.2.1.3.4 Baterías de Litio-Ion

El litio es uno de los materiales más empleados en baterías debido a que es el metal alcalino con menor peso molecular y a que su potencial estándar es 3,045V. Este alto valor de potencial indica que se reducirá fácilmente, es decir, es un buen oxidante. El potencial estándar es la diferencia de potencial entre una celda construida con un electrodo de un elemento (en nuestro caso litio) y un electrodo estándar de hidrógeno, siendo la concentración de iones en cada electrodo de 1 mol por litro, la presión 1 atmósfera y la temperatura 298K (25°C).

Las baterías recargables de electrodos de litio con ciertos tipos de grafito permiten una absorción o descarga simultánea de electrones. El ion se descarga pero no se produce reacción química definida. La absorción de litio se produce durante la carga de la batería, mientras que la liberación de los iones de litio es la descarga de los electrodos negativos.

Por otro lado estas baterías tienen una tensión alta en comparación con las otras clases, de 3.6V. Lo que implica por ejemplo que una batería de Litio-Ion puede sustituir a tres del tipo de Níquel-Cadmio o de Níquel-Hidruro de Metal. Algunos de los usos típicos de este modelo son como fuente de energía para teléfonos móviles, para ordenadores portátiles y para cámaras de video, por su rendimiento y bajo peso [28].

2.2.1.3.5 Baterías de Sodio-Cloruro de Níquel (ZEBRA)

El acrónimo ZEBRA significa “Zero Emissions Battery Research Association” y es un tipo de tecnología innovadora que utiliza sodio-aluminio-cloro o sodio-níquel-cloro como materiales, siendo el electrodo negativo de níquel y el electrodo positivo de sodio. Debido a que estos dos materiales son insolubles en soluciones básicas y neutras, se puede acercar el electrolito al electrodo disminuyendo así la resistencia interna.

Suponen una posible alternativa a las baterías de iones de litio en el futuro, ya que actualmente necesitan ser desarrolladas e investigadas en mayor profundidad. Tiene varios inconvenientes, como la temperatura de operatividad de entre 270°C y 350°C y las pérdidas térmicas cuando no se está usando. El electrolito se congela a 157°C, por lo que si la batería se enfría y éste se solidifica, es necesario un recalentamiento por un periodo que puede llegar incluso a 2 días, en función del diseño de la batería, el estado de carga, la temperatura inicial y la potencia usada para el recalentamiento [26].

2.2.1.4 Capacidad y coeficiente de Peukert

La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que se obtiene al descargar por completo una batería que se encontraba al máximo de energía. Su valor vendría dado por el producto de la intensidad a la cual es descargada la batería, multiplicada por el tiempo que se requiere para realizarlo.

Esta capacidad va a depender de diferentes factores, entre los más importantes se encuentran la temperatura y la magnitud de la intensidad de carga/descarga. Este primer factor no va a ser objeto de estudio, sin embargo el segundo sí que lo va a ser. Como norma general resulta que a mayor intensidad de descarga menor cantidad de carga es capaz de proporcionar [24].

Es muy importante tener en cuenta este proceso en los vehículos eléctricos, debido a que las descargas de batería son a intensidades elevadas, reduciendo la capacidad por debajo del valor esperado.

Para prever este proceso se emplea el modelo de Peukert, el cual aunque no es demasiado preciso a corrientes de descarga muy bajas, sí permite obtener buenas aproximaciones para corrientes altas, y por lo tanto se adaptará bastante bien a los vehículos eléctricos.

El primer paso previo al estudio de cómo afecta este fenómeno de Peukert para una batería, va a ser el cálculo del coeficiente k , también denominado coeficiente de Peukert. Este cálculo se puede llevar a cabo si conocemos los datos del fabricante y las especificaciones concretas de la batería sometida a estudio. En el caso de no conocerlos se puede estimar esta constante en función del tipo de batería, siendo comunes los mostrados en la Tabla 2-2 Coeficientes de Peukert:

COEFICIENTES DE PEUKERT	
Plomo-Ácido	1,12
Níquel-Cadmio	1,024
Zebra	1,05
Litio	1,056

Tabla 2-2 Coeficientes de Peukert [20]

En el caso de querer realizar el cálculo del coeficiente necesitaríamos las máximas capacidades de descarga de dicha batería (C_1 , C_2) en dos instantes diferentes de tiempo (t_1 , t_2). Como norma general se suelen emplear la máxima capacidad de descarga a 1 hora y a 20 horas.

Una vez obtenidos estos datos se podría hallar el coeficiente de Peukert a través de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\log(t_2) - \log(t_1)}{\log(C_1/t_1) - \log(C_2/t_2)} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

El siguiente paso es introducir la constante hallada en la siguiente fórmula para obtener la Capacidad de Peukert o lo que es lo mismo, la capacidad de la batería corregida para este fenómeno con el coeficiente de Peukert:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde C_p es la capacidad de Peukert en Amperios por hora, I la intensidad en Amperios, k el coeficiente de Peukert y t el tiempo en horas.

2.2.2 Modelado en Simulink® de la batería

En este capítulo se desarrollará el modelado de una batería genérica en Simulink®, con el objetivo de que sea válido para casi cualquier tipo de batería y para situaciones de uso. Este modelo pretende estimar de forma precisa el comportamiento que tendrá la batería a partir de unas características determinadas en diferentes circunstancias. Es decir, predecirá el rendimiento de una batería de tracción cuando estas sean utilizadas en un vehículo eléctrico.

El modelado de las baterías es un tema complejo debido a que se basan en reacciones químicas difíciles de predecir y modelar, debido a que estas varían según diferentes parámetros, como el uso dado

con anterioridad a la batería o el tiempo que ha estado funcionando. Es posible también que diferentes celdas dentro de una batería varíen algunas características entre ellas, como pueden ser la temperatura o la tensión, provocando así comportamientos distintos.

El modelado de una batería suele ser a priori complejo, ya que para realizar dicho modelado sería necesario implementar todas las ecuaciones que rigen los procesos electroquímicos que tienen lugar en la batería, sin embargo en este trabajo se ha utilizado un modelo sencillo pero que ofrece buenos resultados.

2.2.2.1 Circuito equivalente de la batería

Es necesario, en primer término, recrear el comportamiento de la batería a través de un circuito equivalente simple. Este circuito, aunque sencillo, permitirá realizar una aproximación de la tensión batería en función de su estado de carga. Mediante el uso de elementos sencillos, tales como una resistencia y una fuente de tensión se puede predecir el comportamiento de la tensión de la batería objeto de estudio [26].

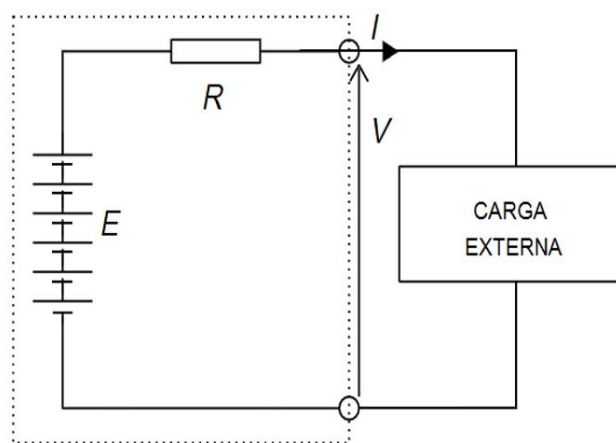


Figura 2-14 Circuito equivalente simple de una batería de 6 celdas

Siendo E la tensión de circuito abierto, R la resistencia interna de la batería, V la tensión e I la intensidad. En primer lugar debemos establecer la tensión de circuito abierto, la cual varía en función de la profundidad de descarga (*Depth of discharge*, DoD) o lo que es lo mismo el estado de carga de la batería (*State of Charge*, SoC), siendo el $\text{SoC} = 1 - \text{DoD}$. A su vez la tensión de circuito abierto va a ser función de la batería elegida.

Por este motivo se ha seleccionado una ecuación que se adapte a las necesidades de cada tipo distinto de batería. Dicha ecuación va a proporcionar la tensión de circuito abierto a partir de la profundidad de descarga. Esta DoD tendrá un valor de cero cuando la batería almacene el máximo de energía y un valor de uno cuando se encuentre completamente vacía.

2.2.2.2 Bloque configuración de las baterías

Al igual que ocurre con el modelado de la dinámica del vehículo eléctrico, es necesario establecer con anterioridad a la simulación diferentes constantes o parámetros de la batería. Estos parámetros son: el número de celdas, el coeficiente de Peukert, la capacidad (para unas horas determinadas, como vimos en apartados anteriores varía en función del tiempo de carga/descarga), el tiempo nominal, el reloj (indica el tiempo en el cual nos encontramos) y el valor de la resistencia interna (R_{in}). En la Figura 2-15 se muestran por orden las constantes descritas:

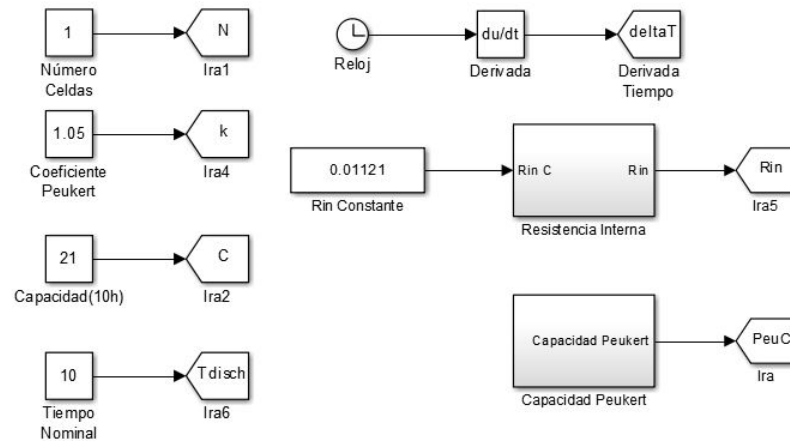


Figura 2-15 Bloque de constantes para la configuración de la batería

2.2.2.3 Bloque de resistencia interna

La resistencia interna (R_{in}) de cualquier batería tiene un valor distinto cuando se produce la carga y cuando se produce la descarga. Para realizar el cálculo basta con multiplicar el número de celdas por el valor inicial de la resistencia interna y el resultado dividirlo entre la capacidad de carga para el tiempo de carga o descarga de la batería [20]. Su unidad será el Ohmio y viene representado en el siguiente bloque:

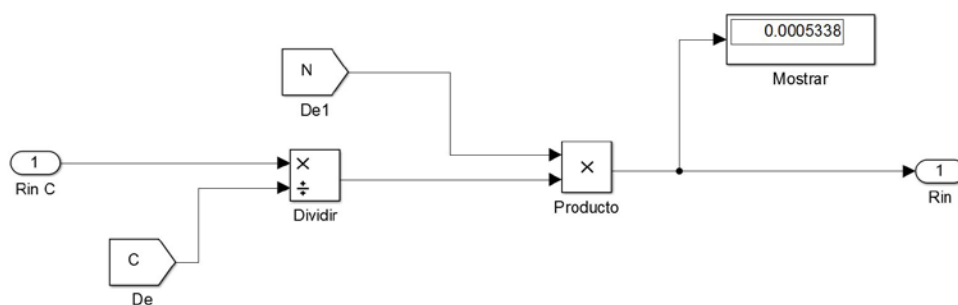


Figura 2-16 Bloque de resistencia interna

2.2.2.4 Bloque de capacidad de Peukert

Como se ha desarrollado en el apartado 2.2.1.4 Capacidad y coeficiente de Peukert, la capacidad de descarga de una batería viene dada en función de la intensidad a la que se descarga y el tiempo que requiere el proceso. La Figura 2-17 muestra el cálculo para obtener la capacidad de Peukert de la batería.

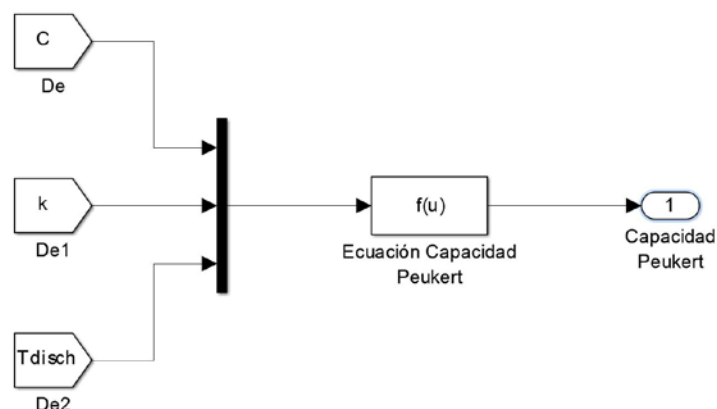


Figura 2-17 Bloque de capacidad de Peukert

La función implementada en el simulador es la siguiente:

$$\left(\left(\frac{C}{T_{disch}} \right)^k \right) \cdot T_{disch} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Siendo T_{disch} el tiempo requerido en la descarga, C la capacidad y k la constante de Peukert.

2.2.2.5 Bloque de tensión de circuito abierto (OCV)

La tensión de circuito abierto (OCV) fue definida en el apartado 2.2.1. A partir del estado de carga expresado en tanto por uno y el número de celdas existentes en la batería se calcula la OCV.

En la Figura 2-18 se muestra el bloque que resulta de insertar la ecuación y los parámetros en Simulink®:

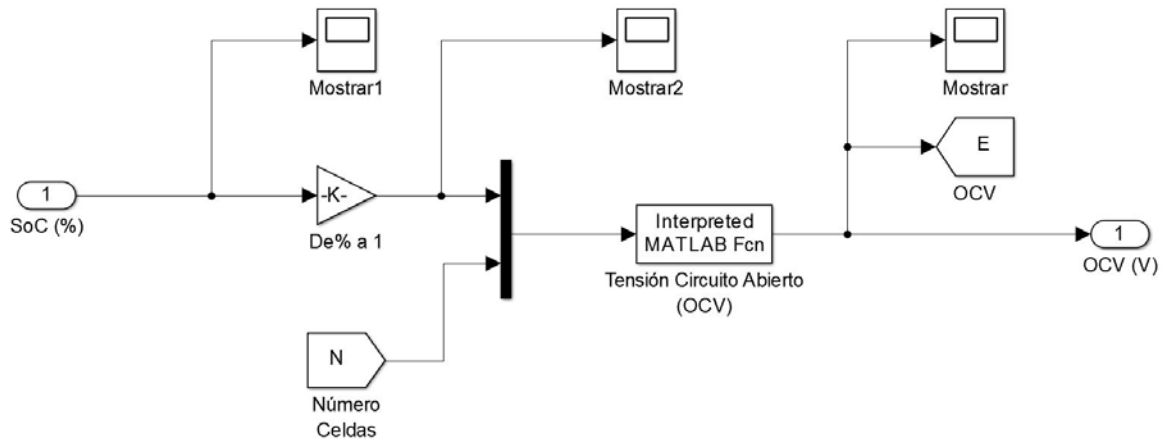


Figura 2-18 Bloque de tensión de circuito abierto

2.2.2.6 Bloque de intensidad

Para que un vehículo cualquiera sea capaz de circular a una determinada velocidad, es necesario proporcionar una potencia (P) al motor, que en el caso de estudio será una potencia eléctrica y vendrá proporcionada por las baterías. Las baterías se descargarán si el motor demanda esta potencia eléctrica, pero por el contrario se cargarán si el motor genera potencia eléctrica, algo que ocurre al frenar debido a un freno regenerativo presente en el vehículo. Este freno regenerativo básicamente consiste en que al frenar parte de la potencia eléctrica se disipa en el interior de la batería.

Es necesario saber la intensidad que se gana o se pierde para poder averiguar la cantidad de carga que está disponible en la batería. Para ello partimos de la ecuación de la ley de Ohm para la potencia eléctrica:

$$P = V \cdot I \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Si se sustituye la ecuación básica de la tensión en una batería (Ec. 2.19) en la fórmula anterior el resultado sería la Ec. 2.20:

$$V = E - I \cdot R \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$P = E \cdot I - R \cdot I^2 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Si se despeja la intensidad I de la anterior ecuación obtenemos:

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot R_{in} \cdot P}}{2 \cdot R_{in}} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Existen dos posibilidades, que la batería se descargue porque se demanda energía o que la batería se cargue porque al frenar se suministra energía a través de un freno regenerativo. En cualquier otro caso la intensidad será cero.

El desarrollo en MATLAB de la Ec. 2.21 sería el mostrado en la Figura 2-19:

```
function out=Intens(E,Power,Rin)

if Power>0 % Se descarga la batería
    Intens = (E - ((E*E) - (4*Rin*Power))^0.5)/(2*Rin);
elseif Power<0 % Se carga
    Intens = (E - ((E*E) - (4*Rin*Power))^0.5)/(2*Rin);
else
    Intens=0;
end

out=(Intens);
```

Figura 2-19 Función en MATLAB de intensidad

La función definida se implementará a continuación en Simulink®, como muestra la Figura 2-20:

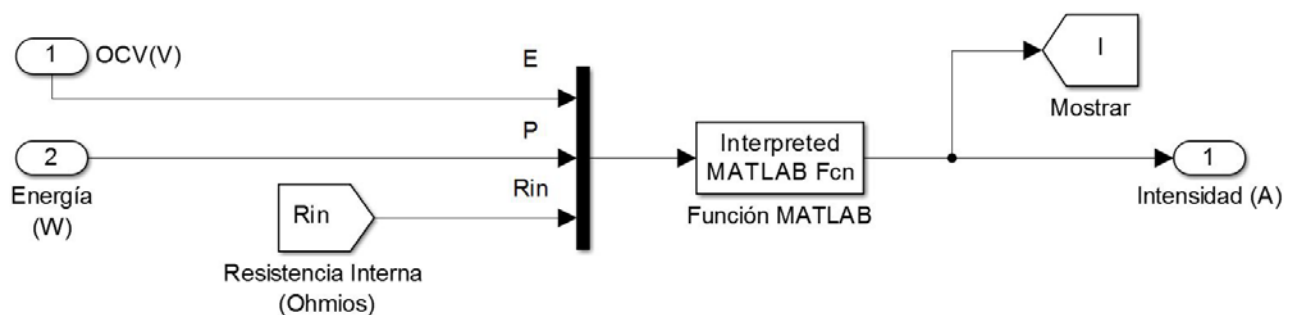


Figura 2-20 Bloque de intensidad

2.2.2.7 Bloque de carga y descarga

Este apartado trata de la cantidad de carga que se suministra o se elimina en función de la intensidad (I), del coeficiente de Peukert (k_p) y del tiempo transcurrido (δt). Es necesario combinar la ecuación de la intensidad (Ec. 2.21) con la ecuación de la capacidad de Peukert para así obtener la carga eliminada o suministrada ($CRCS$) en cada instante de tiempo (δt). La ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$CRCS = I^k \cdot \delta t / 3600 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Nótese que la división entre 3600 es necesaria para transformar el tiempo en segundos, resultando así que la unidad en la que se expresa esta cantidad de carga es el Amperio por segundo.

La batería será descargada si la intensidad calculada en el bloque de la Figura 2-20 es superior a cero. Por el contrario, si la intensidad es inferior a cero, la batería se carga. Por lo tanto al ser valores positivos o negativos de intensidad, el resultado se expresará con el mismo signo, indicando de esta forma el estado en el que nos encontramos.

La expresión de la carga o descarga en MATLAB® es la mostrada en la Figura 2-21 Función en MATLAB de carga:

```

function out=borrar(I,Kp,deltaT)

if I>0 % Se descarga la batería (se elimina carga)
    CRCS=(I^Kp)*deltaT/3600;
elseif I<0 %se carga la batería (se suministra carga)
    CRCS=I*deltaT/3600;
else
    CRCS=0;
end

out=(CRCS);

```

Figura 2-21 Función en MATLAB de carga

Para su implementación en Simulink® es necesario integrar el resultado en función del tiempo, como se observa en la Figura 2-22:

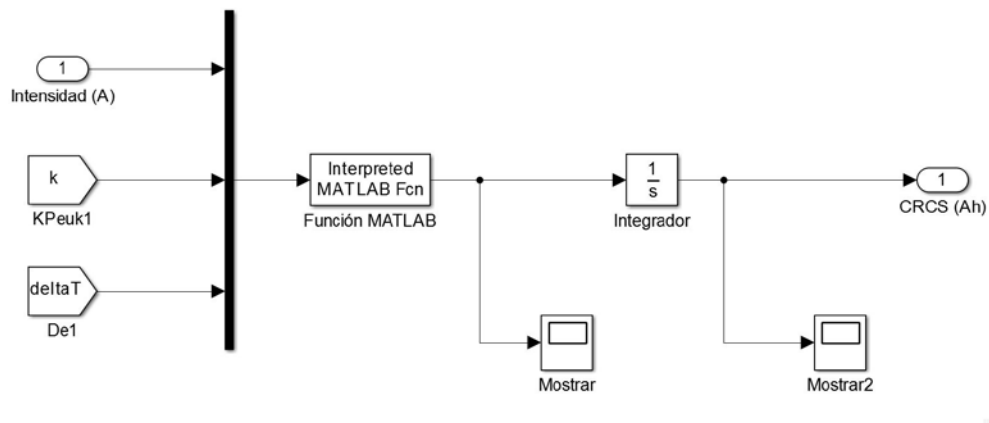


Figura 2-22 Bloque de carga

2.2.2.8 Bloque de estado de carga (SoC)

Primeramente es necesario hallar la profundidad de descarga de la batería (DoD) como paso previo al cálculo del estado de carga (SoC). Para ello basta con dividir la carga calculada en el apartado 2.2.2.7 entre la capacidad original de la batería.

Todo ello se implementa en Simulink® tal y como aparece en la Figura 2-23:

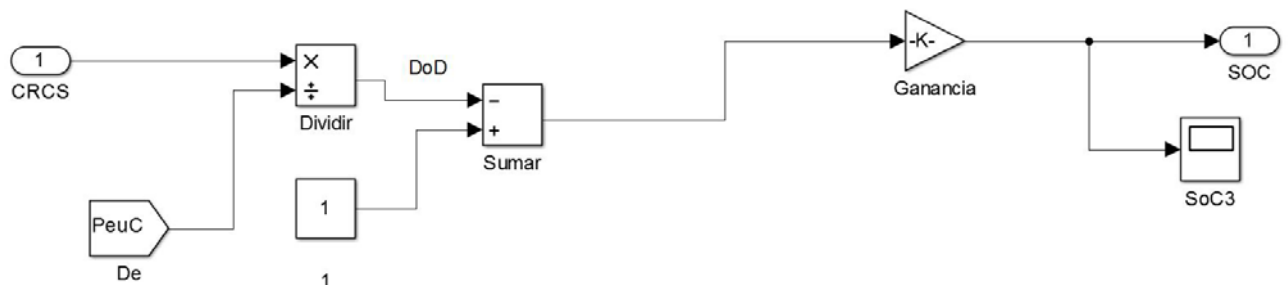


Figura 2-23 Bloque de SoC

2.2.2.9 Modelo global de la batería

Una vez completados de forma individual cada bloque, se pasa a la unión de todos ellos como muestra la Figura 2-24. Hay que tener en cuenta que es necesario unir la salida del estado de carga (SoC)

con la entrada de la tensión de circuito abierto, ya que el modelo debe realimentarse a sí mismo para funcionar correctamente.

El resultado final de la unión mostrado en la Figura 2-24 será obtener el porcentaje del estado de carga en cada instante del tiempo simulado.

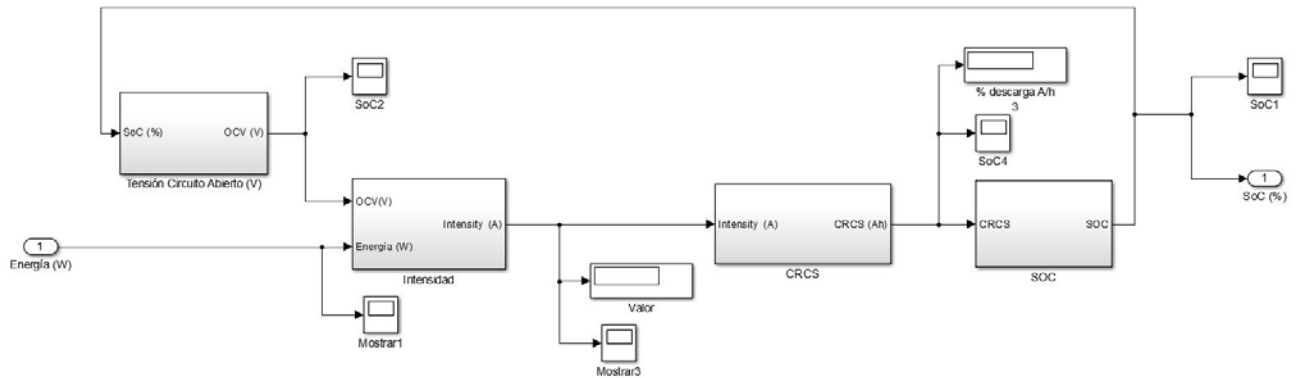


Figura 2-24 Modelo global de la batería

2.3 Modelado del motor eléctrico

El tercer y último componente clave en el modelo es el motor eléctrico. En la actualidad existe un amplio abanico de tipos de motores eléctricos, aunque el funcionamiento básico de todos ellos es común. A continuación se desarrolla los principios de funcionamiento y principales componentes, así como los diferentes modelos que existen.

2.3.1 Fundamentos de un motor eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica gracias a las interacciones electromagnéticas entre un cable por el que pasa una corriente y varios imanes. Estas interacciones dan origen a una fuerza que es aprovechada para hacer girar un eje, produciéndose así la transformación de energía eléctrica a energía mecánica (Ley de Lorentz [29]). Algunos motores son reversibles, pudiendo transformar energía mecánica en eléctrica, ejerciendo de esta forma como generadores.

Todo motor eléctrico tiene dos componentes esenciales: el estator, que es la parte fija, y el rotor, el cual es móvil con respecto al estator. Estos componentes son de material ferromagnético para permitir que al ser afectados por un campo magnético sus electrones se alineen con dicho campo creando la fuerza electromotriz que les obliga a moverse (Fuerza de Lorentz), la cual aparece en la Figura 2-25.

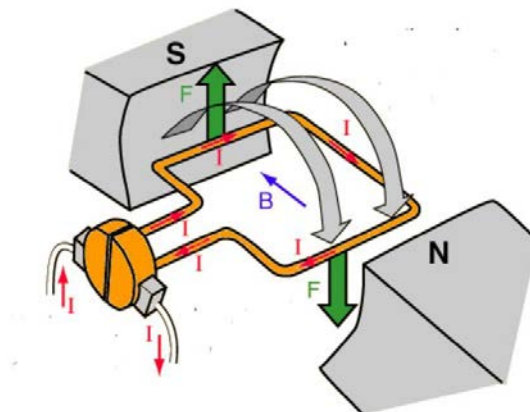


Figura 2-25 Fuerza de Lorentz

La velocidad de giro del motor se puede regular a través de la tensión que circula por el devanado mientras que el par se controla a través de la intensidad. La relación velocidad-par es más sencilla de controlar que en los motores de combustión interna ya que se pueden controlar independientemente, es decir, para una misma velocidad de giro se puede variar el par [30].

El devanado o bobinado presente en un motor eléctrico puede ser inductor o inducido. El devanado inductor es un componente pasivo que origina el campo magnético para inducir tensiones en el devanado inducido, como resultado de ser atravesado por una corriente. El devanado inducido es aquella parte donde se transforma la energía eléctrica en energía mecánica gracias a un movimiento de rotación.

Los motores eléctricos se clasifican principalmente según el tipo de alimentación que reciben, siendo divididos en motores de corriente continua y motores de corrientes alterna. Dentro de estos dos grupos, la forma de construcción del rotor y del estator diferenciará unos motores de otros.

2.3.1.1 Motores de corriente continua

Este tipo de motores presenta como principal característica que el estator hace la función de devanado inductor (Figura 2-26) y el rotor el de devanado inducido (Figura 2-27).



Figura 2-26 Estator motor CC



Figura 2-27 Rotor motor CC

Ambos componentes son alimentados con corriente continua con el objetivo de que el devanado del estator cree un campo magnético constante. Se distinguen tres tipos de motores de corriente continua:

1. Estator y Rotor devanados
2. Estator de imanes permanentes y rotor devanado (motor de imanes permanentes)
3. Estator devanado y rotor de imanes permanentes (motor brushless)

Los motores de corriente continua suelen ser de mayor volumen, de mayor peso y más caros que los de corriente alterna, sin embargo su control es más sencillo.

Como ventajas cabe resaltar que poseen buena capacidad de respuesta ante exigencias de par elevado o de variaciones de velocidad.

Algunos inconvenientes son el elevado mantenimiento por el uso de escobillas y colectores, la limitación de velocidad máxima de giro debido al rozamiento entre escobillas y rotor y además el aumento de calentamiento del mismo [31].

2.3.1.1.1 Motores de campo devanado

En función del modo en el que es alimentado el inductor, los motores se dividen en:

1. Motores de excitación en serie, estando conectados tanto el inductor como el inducido en serie.
2. Motores de excitación independiente, estando el inductor y el inducido alimentados con distintas fuentes de alimentación.
3. Motores en derivación, los cuales tienen conectados en paralelo el inductor y el inducido.
4. Motores compound o de excitación compuesta, caracterizados por tener un devanado en serie y otro en paralelo.

Los primeros motores eléctricos que se emplearon en vehículos fueron los de excitación en serie, ya que permitían tener un par elevado al arrancar pero que se debilitaba a altas velocidades. Con la evolución de la tecnología, los motores de excitación independiente ganaron importancia ya que permitían mantener pares elevados a altas velocidades.

2.3.1.1.2 Motores de imanes permanentes

Estos motores son empleados cuando no se requiere una potencia elevada. Presentan la ventaja de que no es necesario alimentarlos con energía eléctrica para excitarlos y tienen mayor fiabilidad que los de campo devanado debido a que no tienen bobinas excitadoras de campo que puedan fallar y no se pueden producir sobrevelocidades por pérdidas de campo. Además al no necesitar excitar eléctricamente el campo se mejora la eficiencia y la refrigeración del motor [31].

Los principales inconvenientes de estos motores son la falta de control del campo magnético y la dificultad de respuesta ante necesidades especiales de par-velocidad. Es posible que una sobrecarga cause una desmagnetización parcial, lo que significaría un cambio en las características de par y velocidad del motor hasta que se restablezca su magnetización original.

Los motores de imanes permanentes suelen ser de mayores tamaños y un poco más costosos que los motores de campo devanado. Están en un lugar intermedio entre los motores de devanado compound y los de devanado en serie, tienen mejor par de arranque pero la mitad de velocidad en vacío que los devanados en serie. En aquellas aplicaciones en las que se empleen los motores compound, podría considerarse sustituirlo por un motor de imanes permanentes si se busca una eficiencia mayor y una más alta capacidad de sobrecarga. Si se quisiera sustituir por un motor de devanado en serie el factor principal a considerar sería el coste.

2.3.1.1.3 Motores Brushless o sin escobillas

La característica fundamental de estos motores es que no se emplean escobillas para alimentar al inducido debido a que éste es estacionario, mientras que el inductor formado por imanes permanentes tiene un movimiento de rotación, al contrario que ocurre en los motores convencionales de corriente continua. Esta disposición permite aumentar la rapidez de disipación del calor y al mismo tiempo reduce la inercia del rotor [30].

El inducido es alimentado con corriente continua a través de transistores, en lugar de las escobillas de motores convencionales. Estos motores suelen constar de un conjunto de entre dos y

seis bobinas, número mucho menor que en los motores convencionales los cuales suelen tener entre diez y cincuenta.

Al carecer de escobillas estos motores alcanzan rendimientos de hasta el 85%, sin embargo presentan mayor complejidad en el control.

2.3.1.2 Motores de corriente alterna

2.3.1.2.1 Motores asíncronos o de inducción

En los motores asíncronos el inductor es el estator el cual se compone de un devanado trifásico, mientras que el inducido es el rotor y se compone de barras conductoras. La denominación de motor asíncrono se debe a que la velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la velocidad de giro del campo magnético del estator, producido por el rozamiento en los cojinetes, rozamiento con el aire y a la carga acoplada al eje del rotor. La diferencia de velocidad recibe el nombre de deslizamiento, expresado normalmente en tanto por ciento [29].

La corriente alterna del estator genera un campo magnético giratorio que induce una corriente en el rotor, provocando el par de rotación. La característica principal de estos motores es que las corrientes secundarias del inducido se crean exclusivamente por inducción, al igual que ocurre en un transformador, en lugar de ser alimentadas como ocurre en las máquinas síncronas.

Los motores asíncronos se clasifican en motores de jaula de ardilla y motores de rotor devanado.

Los motores de jaula de ardilla (Figura 2-28), también llamados de rotor en cortocircuito, son los más sencillos y empleados actualmente. El núcleo del rotor está constituido de chapas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras, normalmente de aluminio moldeado a presión. Las barras del devanado van conectadas a unos anillos conductores denominados anillos extremos, creando así la forma de jaula de ardilla. Las ranuras del rotor y las barras suelen tener forma oblicua para evitar puntos muertos en la inducción electromagnética. El principal problema de estos motores es que en el arranque consumen una corriente muy intensa (del orden de 4 a 7 veces la intensidad nominal) sin proporcionar un par elevado. Por el contrario, la baja resistencia del rotor permite que estos motores tengan muy buenas características cuando deben proporcionar una velocidad constante.

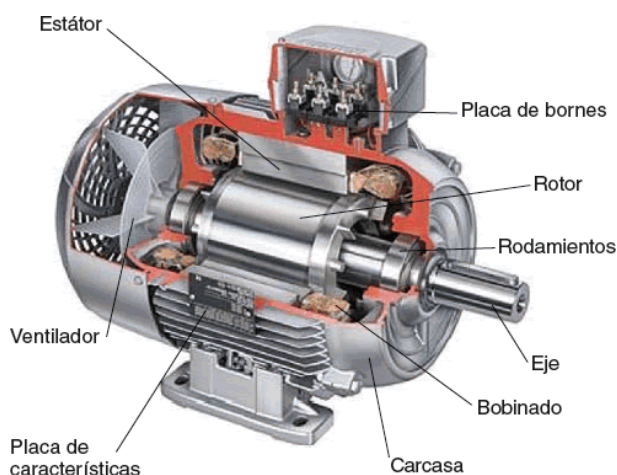


Figura 2-28 Motor CA asíncrono de jaula de ardilla [32]

El otro tipo de motores asíncronos, los de rotor devanado, presentan un devanado trifásico de cobre dispuesto en las ranuras del rotor conectado a tres anillos metálicos por uno de sus extremos y en el otro es conectado en estrella. Esta disposición permite controlar la resistencia total del circuito rotórico, facilitando el control de la velocidad y de la corriente de arranque, proporcionando un mejor par de arranque y factor de potencia que con el motor de jaula de ardilla.

En general los motores asíncronos son simples, robustos, de bajo coste y apenas necesitan mantenimiento, siendo más compactos que los de corriente continua para una misma potencia de salida. Su mayor inconveniente es que precisan de un sistema de control complejo y de elevado coste.

2.3.1.2.2 Motores síncronos

Estos motores presentan como inductor el rotor siendo alimentado por corriente continua, al mismo tiempo que el devanado estatórico actúa de inducido y es alimentado por corriente alterna trifásica, como muestra la Figura 2-29.

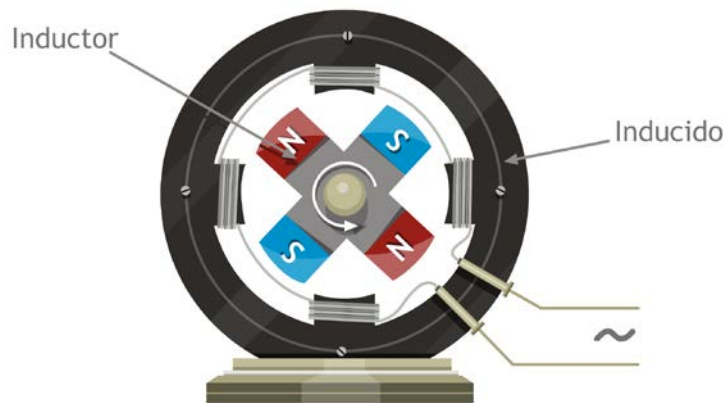


Figura 2-29 Motor CA síncrono

Proporcionan un rendimiento muy elevado y facilitan la liberación de calor gracias a que el inducido es el estator, permitiendo también reducir el tamaño total del motor. Los dos modelos principales de motores síncronos son los de rotor bobinado y los de imanes permanentes o brushless [29].

El motor síncrono de rotor bobinado presenta unas características muy similares a las de un motor de corriente continua y funciona de forma parecida, proporcionando un par constante hasta una determinada velocidad para después proporcionar potencia constante. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión suministrada y del número de pares de polos de los que se compone el motor, por eso se le llama “velocidad de sincronismo”.

El motor síncrono de imanes permanentes o brushless consta de un estator formado por un devanado trifásico conectado en estrella y de un rotor formado por imanes permanentes, además evita los problemas de mantenimiento ocasionados por las escobillas. Son más compactos que los de rotor bobinado y tienen mayor potencia específica, presentando una inercia mucho menor que los motores de corriente continua. Como inconvenientes principales presentan un funcionamiento complejo al operar a flujo constante, los imanes permanentes son caros y su fuerza se debilita con la temperatura por lo que necesitan una buena refrigeración y son costosos del mismo modo que lo son los controladores que necesitan.

2.3.1.3 Pérdidas de los motores eléctricos

Las mayores causas de pérdidas en los motores de escobillas de corriente continua son comunes para todos ellos y determinan la eficiencia del motor. Estas pérdidas se clasifican en cuatro tipos principales:

2.3.1.3.1 Pérdidas debidas a los conductores de cobre

Se producen debido a la resistencia eléctrica que presentan los cables y escobillas del motor. Esta resistencia tiene aparejada un calentamiento, lo que provoca que parte de la energía eléctrica suministrada se desaproveche al transformarse en energía calorífica en lugar de producir un trabajo [30]. El efecto del calentamiento de la corriente es proporcionar al cuadrado de la misma:

$$P = I^2 \cdot R \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Como la corriente es proporcional al par (T) proporcionado por el motor eléctrico, obtenemos:

$$P\acute{e}rdidas\ del\ cobre = k_c \cdot T^2 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Donde k_c es una constante que depende de la resistencia de las escobillas, el bobinado y el flujo magnético. Estas pérdidas del cobre causan en motores eléctricos pequeños las mayores pérdidas siendo la principal causa de ineficiencia.

2.3.1.3.2 Pérdidas en el entrehierro

Son la segunda mayor causa de las pérdidas de un motor. Se producen debido a los efectos magnéticos en el hierro del motor, especialmente en el rotor, lo que causa dos tipos de pérdidas.

Las primeras son llamadas pérdidas por histéresis, y se deben a la energía requerida para magnetizar y desmagnetizar continuamente el hierro del motor para alinear sucesivamente los dipolos magnéticos. Depende de la facilidad de magnetización que posea el hierro, por ejemplo si los materiales féreos empleados son altamente paramagnéticos, éstas pérdidas serían muy pequeñas, pero no despreciables [31].

El segundo tipo de pérdidas en el entrehierro es debido a la corriente eléctrica originada por los cambios del campo magnético (inducción electromagnética), denominada corrientes de Foucault. Dichas corrientes son producidas cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, provocando una corriente inducida dentro del conductor. Las corrientes circulares inducidas originan electroimanes con campos magnéticos propios que se oponen al campo magnético aplicado. Por lo tanto cuanto mayor sea el campo aplicado mayores serán las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault. Para reducir este tipo de pérdidas, se instalan rotores compuestos de múltiples láminas de hierro separadas unas de otras por una fina capa de pintura.

En general todas las pérdidas en el entrehierro dependen de manera proporcional de la frecuencia con la que cambia el campo magnético, resultando que a una mayor frecuencia las pérdidas por histéresis y las pérdidas por las corrientes inducidas de Foucault son mayores. La tasa de cambio del flujo magnético depende de la velocidad del rotor, por lo que resulta:

$$P\acute{e}rdidas\ en\ el\ entrehierro = k_i \cdot \omega \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Siendo k_i un valor que tomamos como constante, aunque en realidad puede variar por la fuerza del campo magnético y por otros factores. En nuestro proyecto se empleará un valor que proporcione una buena aproximación al real.

2.3.1.3.3 Pérdidas por fricción y ventilación

Las pérdidas por fricción son producidas por los rozamientos en las escobillas y los rodamientos internos del motor, considerándose aproximadamente constantes. Por otro lado, el rotor opone una resistencia al viento que se denomina pérdidas por ventilación, y aumentan si el motor es refrigerado por un ventilador [29]. Esta resistencia al viento depende del cuadrado de la velocidad de giro del rotor. Para obtener la potencia se multiplica el par por la velocidad:

$$Potencia = T \cdot \omega \quad (\text{Ec. 2.26})$$

La potencia consumida por las pérdidas descritas será:

$$Potencia\ de\ fricción = T_f \cdot \omega \quad (\text{Ec. 2.27})$$

$$Potencia\ ventilación = K_\omega \cdot \omega^3 \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Siendo T_f el par de fricción, y K_ω es una constante que depende principalmente del tamaño y forma del rotor y de si el motor posee un ventilador.

2.3.1.3.4 Pérdidas constantes

Son aquellas que se producen incluso cuando el motor se encuentra en estado completamente estacionario, sin que varíe ni la velocidad ni el par. Estas pérdidas se deben a los circuitos electrónicos de control. Se denominan usualmente con la letra “C”.

2.3.1.3.5 Pérdidas totales

Como resultado de la suma de todas las pérdidas descritas con anterioridad se obtiene:

$$\text{Pérdidas totales} = k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + k_\omega \cdot \omega^3 + C \quad (\text{Ec. 2.29})$$

A continuación se muestran los valores de los coeficientes de pérdidas nombrados anteriormente en la Tabla 2-3:

COEFICIENTES DE PÉRDIDAS DE MOTORES ELÉCTRICOS		
Parámetro	Motor imanes permanentes con escobillas 2-5 kW	Motor inducción alta velocidad 100 kW
k_c	1.5	0.3
k_i	0.1	0.01
k_ω	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-6}$
C	20	600

Tabla 2-3 Coeficientes de pérdidas de motores eléctricos [20]

2.3.1.3.6 Eficiencia y potencia del motor eléctrico

La eficiencia de cualquier máquina eléctrica se obtiene del cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la misma. En nuestro caso la potencia de entrada viene determinada por la suma de la potencia de salida y las pérdidas producidas en el motor, tal y como se desarrolla a continuación:

$$\eta_m = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{P_{\text{mot}_{out}}}{P_{\text{mot}_{out}} + \text{pérdidas}}$$

$$\eta_m = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + k_\omega \cdot \omega^3 + C} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

La potencia eléctrica suministrada por la batería necesaria para que el motor proporcione la potencia mecánica requerida por el vehículo se calcula del siguiente modo:

$$P_{\text{eléctrica}} = \frac{P_{\text{mecánica}}}{\eta_m} \quad \text{si } P_{\text{mecánica}} > 0 \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$P_{\text{eléctrica}} = P_{\text{mecánica}} \cdot \eta_m \quad \text{si } P_{\text{mecánica}} < 0 \quad (\text{Ec. 2.32})$$

2.3.2 Modelado en Simulink del motor eléctrico

A continuación es necesario el desarrollo del motor eléctrico que permita relacionar la potencia requerida por el vehículo simulado con la energía que debe proporcionar la batería. Para ello es necesario incluir la eficiencia del motor en base a las pérdidas que tendrían lugar en un motor eléctrico real, con el objetivo de realizar una simulación fidedigna de su comportamiento.

2.3.2.1 Bloque de configuración del motor eléctrico

Todo motor eléctrico presenta múltiples pérdidas internas debidas a factores propios del motor, de la ventilación o de la alimentación que recibe. Éstas se desarrollaron en el apartado 2.3.1.3, y a continuación se implementan en el programa Simulink® los parámetros que las caracterizan:

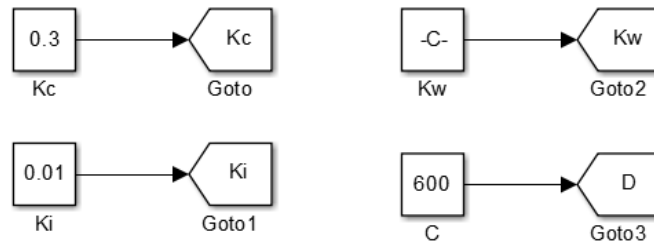


Figura 2-30 Constantes de pérdidas del motor eléctrico

2.3.2.2 Bloque de pérdidas

En este apartado se introducen en el programa las pérdidas del motor eléctrico, empleando las ecuaciones desarrolladas en el apartado 2.3.1.3 y los parámetros introducidos en el bloque de la Figura 2-30, con el objetivo de obtener las pérdidas totales del motor:

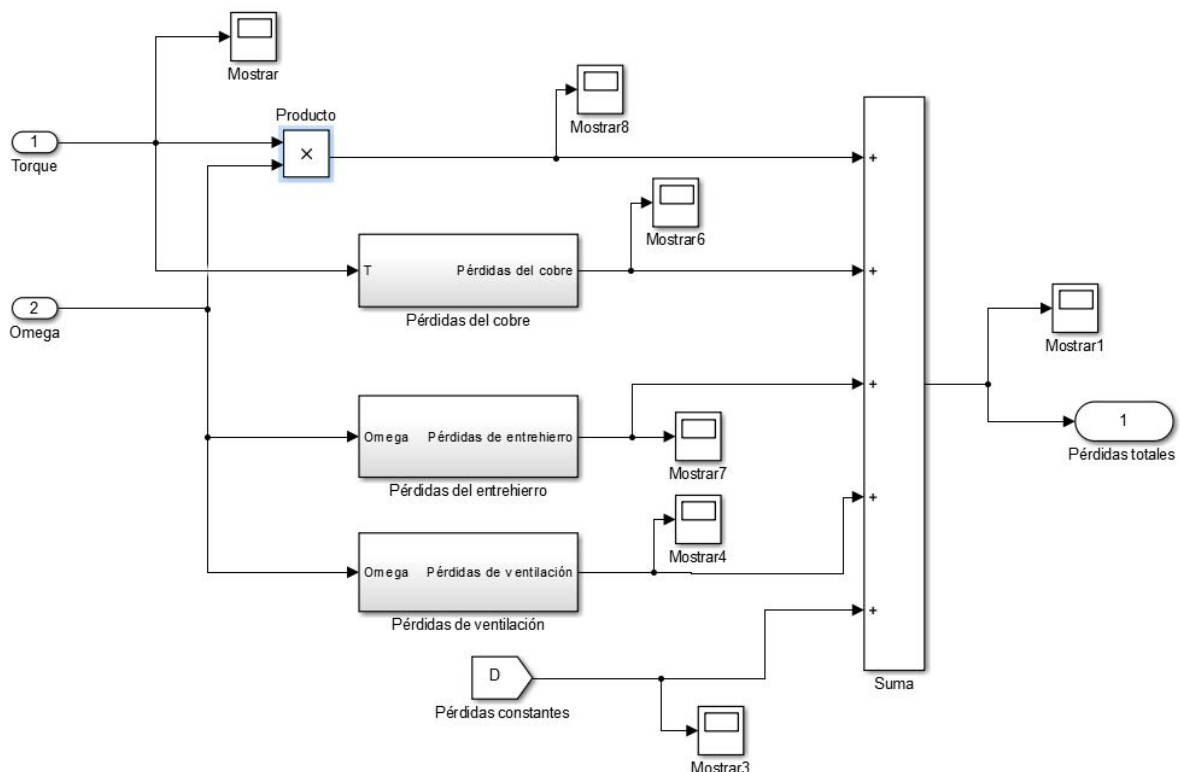


Figura 2-31 Pérdidas totales del motor eléctrico

2.3.2.3 Bloque de eficiencia

La eficiencia se obtiene a partir de la Ec. 2.29 en la cual se incluyen las pérdidas de un motor eléctrico genérico. Las pérdidas fueron implementadas en el simulador en el apartado anterior, y sirven de base para el cálculo de la eficiencia. En el bloque de eficiencia se establecen dos bloques de pérdidas en paralelo en función de si el par tiene valor positivo o negativo, como se muestra en la Figura 2-32:

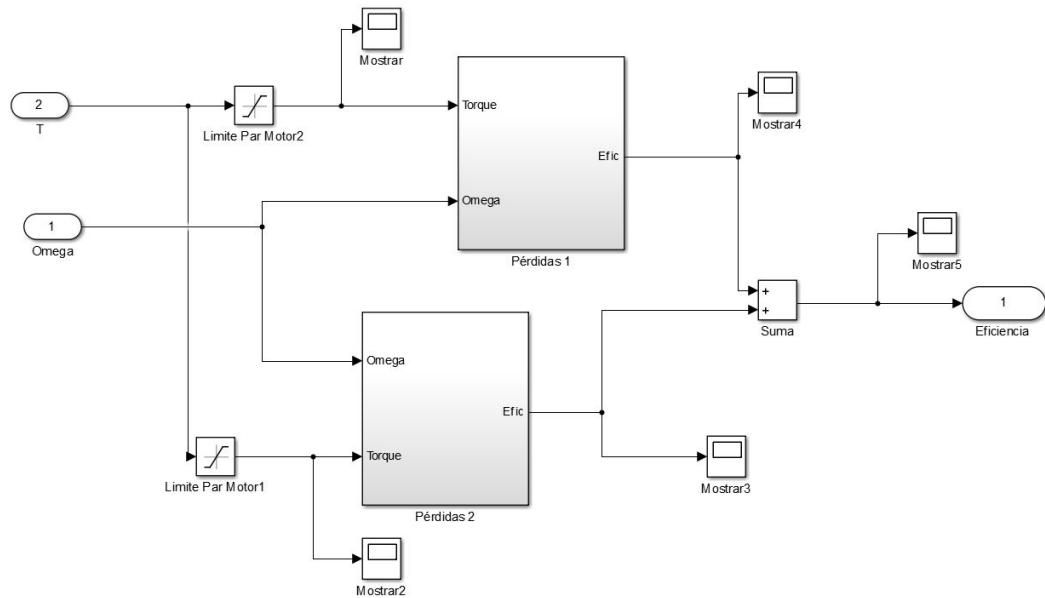


Figura 2-32 Bloque de eficiencia del motor eléctrico

2.3.2.4 Bloque de potencia eléctrica

El cálculo de la potencia eléctrica suministrada por la batería necesaria para que el motor proporcione la potencia mecánica requerida por el vehículo se realiza mediante las ecuaciones 2.20 y 2.21. Estos cálculos una vez implementados en Simulink® son mostrados en la Figura 2-33:

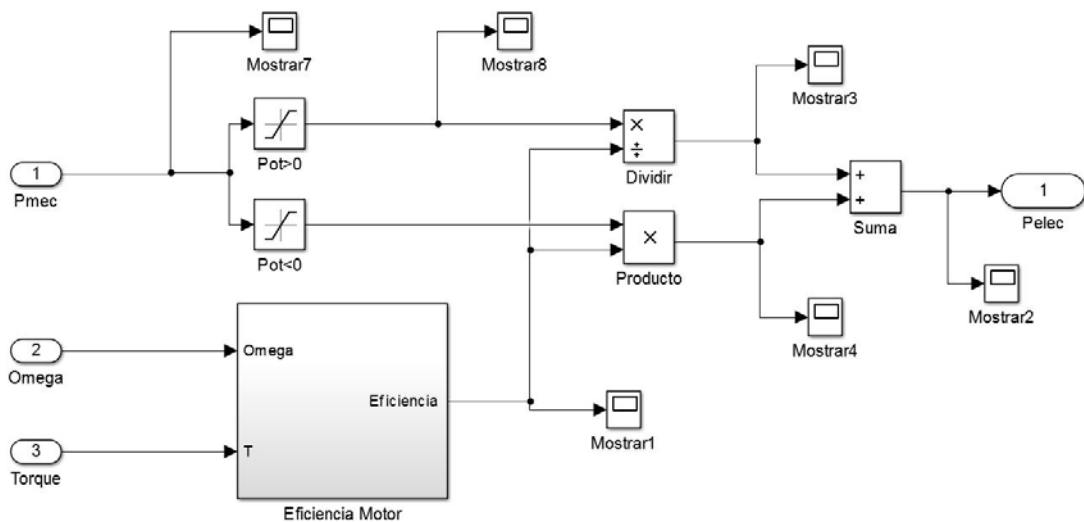


Figura 2-33 Bloque de potencia eléctrica del motor

2.4 Modelo conjunto del simulador

El último paso en la creación del simulador es la unión de los tres bloques en un mismo entorno de Simulink®. Para ello es necesario unir las salidas del bloque de Dinámica desarrollado en el apartado 2.1.3 con las entradas del bloque del Motor Eléctrico 2.3.2.4, y a su vez la salida del motor con la entrada del bloque de la Batería, formulado en el apartado 2.2.2.9. El modelo conjunto una vez ensamblado se muestra en la Figura 2-34:

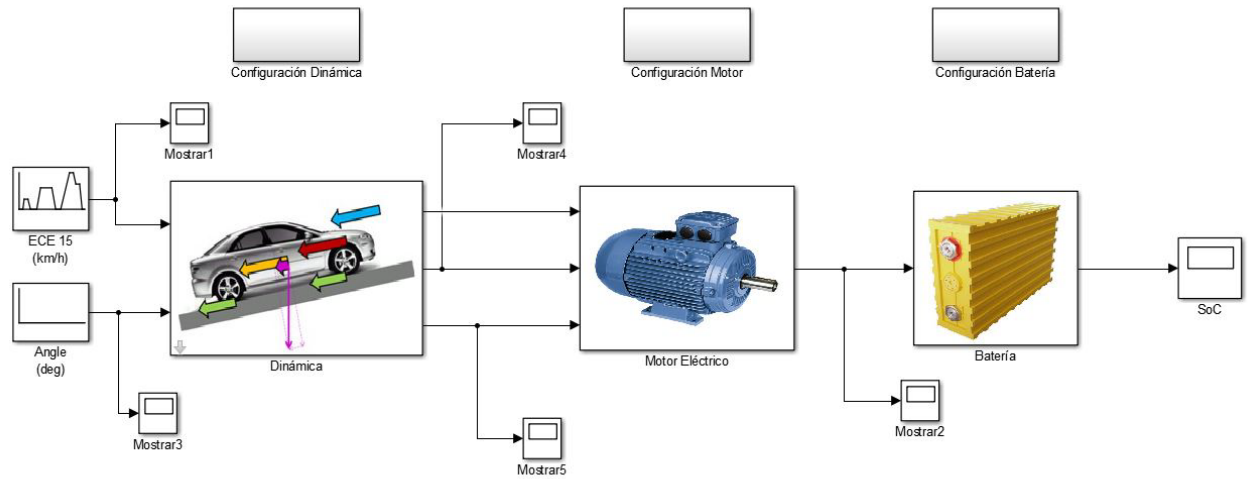


Figura 2-34 Modelo conjunto del simulador

3 SIMULACIONES

Una vez realizada la unión de los tres conjuntos principales se lleva a cabo la simulación conjunta con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del simulador. Esta comprobación se realiza con el GM EV 1 (General Motor Electric Vehicle), las baterías y el motor eléctrico que vienen recogidos en el libro “Electric Vehicle Technology Explained” de James Larminie para el ciclo de conducción SFUDS [33]. Gracias a esta comprobación se solucionan pequeños errores que se habían cometido en la creación del simulador y permitirá realizar los siguientes hitos del proyecto, la validación del programa mediante una prueba real con un Scooter eléctrico y finalmente la simulación de un hipotético vehículo eléctrico militar utilizado durante un recorrido de maniobras.

3.1 Turismo eléctrico GM EV 1

El vehículo seleccionado para la comprobación del modelo es el General Motors Electric Vehicle 1 (GM EV 1). Este modelo fue creado por General Motors, una de las mayores empresas de automoción, y fue el primer vehículo eléctrico moderno. Se puso a la venta en 1996 y su comercialización duró hasta 1999. Este vehículo se fabricó en primer lugar con baterías de plomo-ácido, pero posteriormente se modificó y se sustituyeron por baterías de níquel-metal hidruro. Su autonomía aproximada fue de 115 kilómetros para las primeras versiones y de hasta 250 kilómetros en la última versión [34].

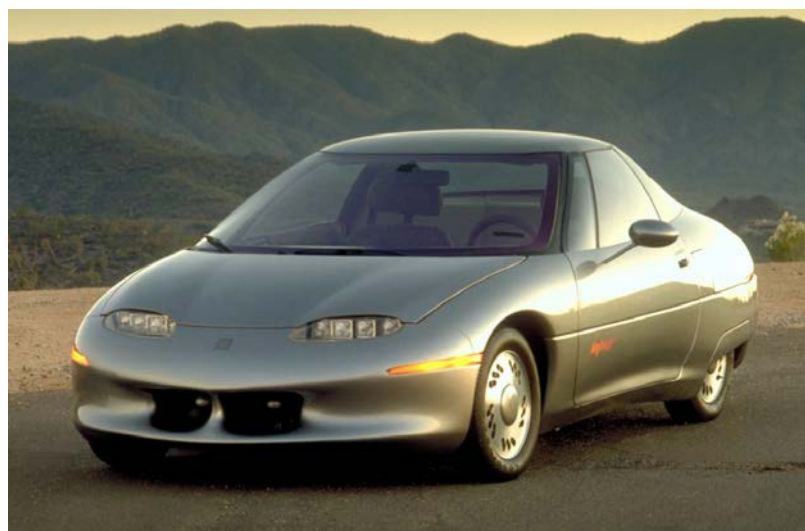


Figura 3-1 GM EV1

Las principales características del GM EV 1 que usaremos en nuestra simulación vienen definidas en la Tabla 3-1:

Características GM EV 1	
Masa vehículo con dos pasajeros	1540 kg
Área frontal	1,8 m ²
Coeficiente de resistencia a la rodadura	0,0048
Coeficiente aerodinámico	0,19
Relación de transmisión	11:1
Radio de la rueda	0,3 m
Eficiencia transmisión	95 %
Tasa de regeneración	30 %

Tabla 3-1 Características GM EV 1

3.1.1 Batería plomo-ácido

Para configurar la batería usada en esta simulación emplearemos el modelo que incluían las primeras versiones del GM EV 1, las de plomo-ácido. Este tipo de baterías fue desarrollado en el apartado 2.2.1.3.1, aunque a continuación se exponen detalles del modelo concreto empleado.

Datos de la batería de plomo-ácido	
Número de celdas	156 (26 baterías de 6 celdas (12 voltios))
Capacidad	60 Ah
Tensión nominal	1872 Voltios
Coeficiente de Peukert (k)	1,12

Tabla 3-2 Datos de batería plomo-ácido

3.1.2 Motor eléctrico

Además es necesario configurar el motor eléctrico, para lo cual estableceremos los parámetros recogidos en el “Electric Vehicle Technology Explained” [20]. El motor eléctrico se trataría de un motor trifásico de inducción de 102 kW (137 CV), y cuyas características se muestran en la Tabla 3-3:

Características motor eléctrico	
k_c	0,3
k_i	0,01
k_w	0,000005
C	600

Tabla 3-3 Características motor eléctrico

3.1.3 Ciclo de conducción SFUDS

Una de las opciones para realizar una simulación es introducir ciclos de conducción estándar. Esto permite realizar simulaciones sin la necesidad de realizar pruebas reales con un vehículo. Además se puede repetir estos ciclos las veces necesarias hasta que la batería se descargue por completo. En nuestro caso se ha introducido el ciclo de conducción obviando la pendiente a superar.

El ciclo de conducción SFUDS empleado en la comprobación tiene su origen en el ciclo LA-4, creado en Los Ángeles (California). A partir del LA-4 se desarrolló el Federal Urban Driving Schedule (FUDS), el cual tiene una duración de 1500 segundos y se asocia a una velocidad distinta en cada segundo.

Existe una versión simplificada de dicho ciclo, denominado Simplified Federal Urban Driving Schedule, o SFUDS. La ventaja del ciclo simplificado es que su duración es reducida, de 350 segundos con sus respectivas velocidades en cada segundo. El ciclo SFUDS se muestra a continuación en la Figura 3-2:

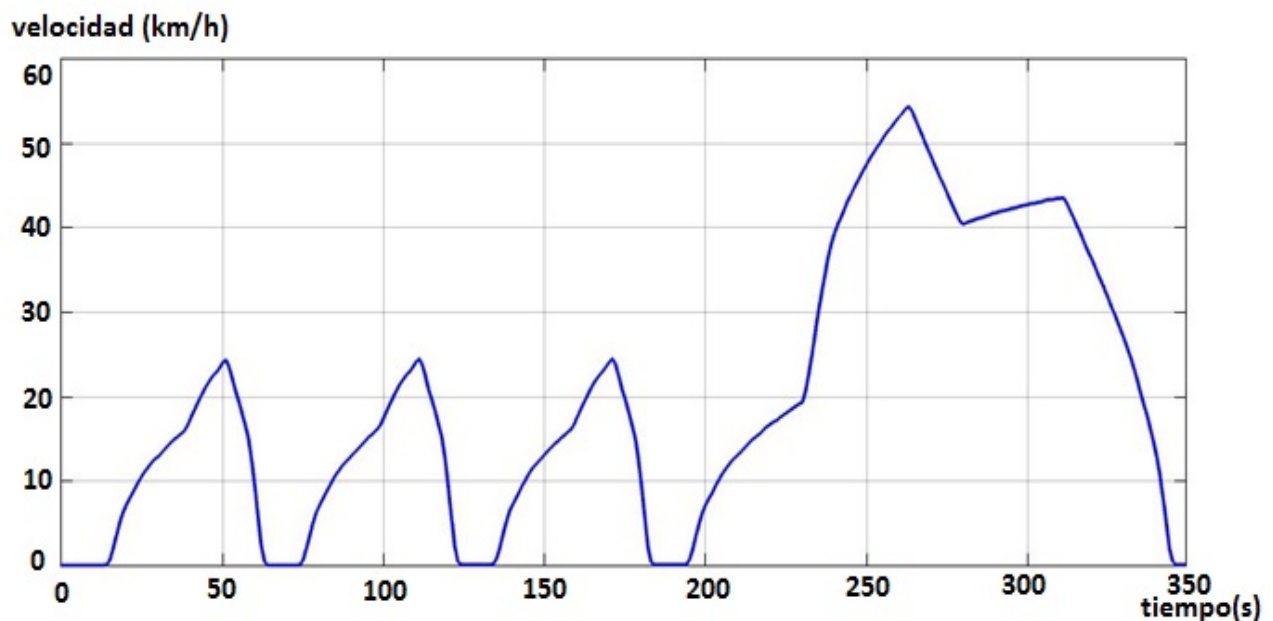


Figura 3-2 Ciclo SFUDS en Simulink®

3.1.4 Resultados

Es el momento de introducir en Simulink® la configuración desarrollada en los apartados 3.1, 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3. Al ejecutar la simulación se obtienen resultados que se asemejan a aquellos obtenidos en el libro de James Larminie, al realizar una simulación similar con el GM EV 1 y el ciclo de conducción SFUDS.

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas de la simulación en Simulink®. La Figura 3-3 muestra la gráfica de la potencia de salida del motor, aquella que requiere el vehículo para realizar el recorrido definido en el ciclo de conducción SFUDS:

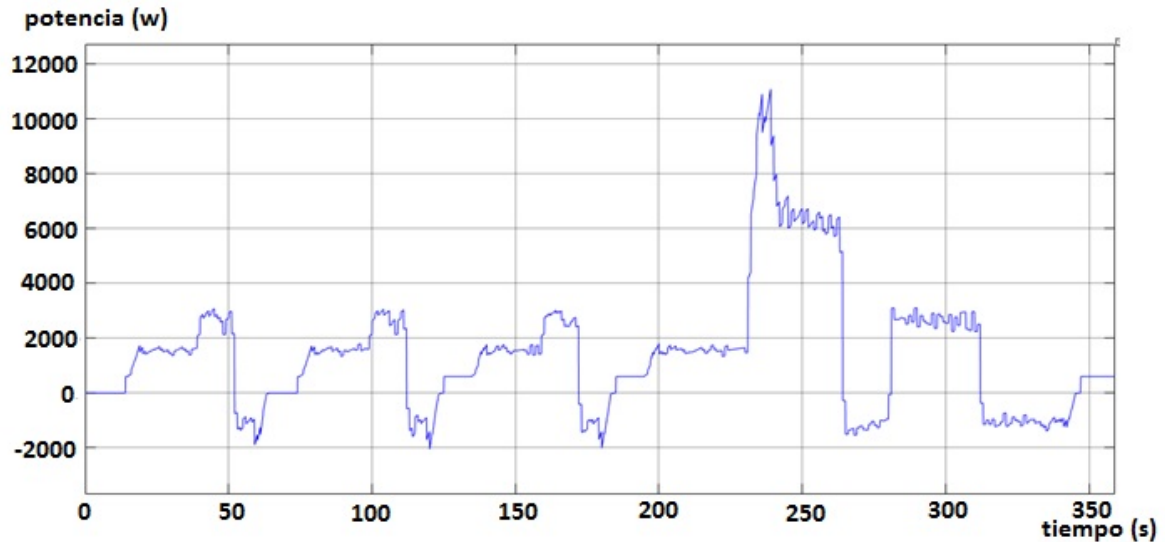


Figura 3-3 Potencia eléctrica GM EV1 de un ciclo SFUDS obtenida con Simulink®

Como se puede comprobar en la Figura 3-4, la potencia eléctrica que hemos obtenido en la simulación con el modelo aquí desarrollado en Simulink® es muy similar a la que obtiene el “Electric Vehicle Technology Explained”. Con esto se comprueba que el modelo ofrece una muy buena aproximación al presentado por Larminie.

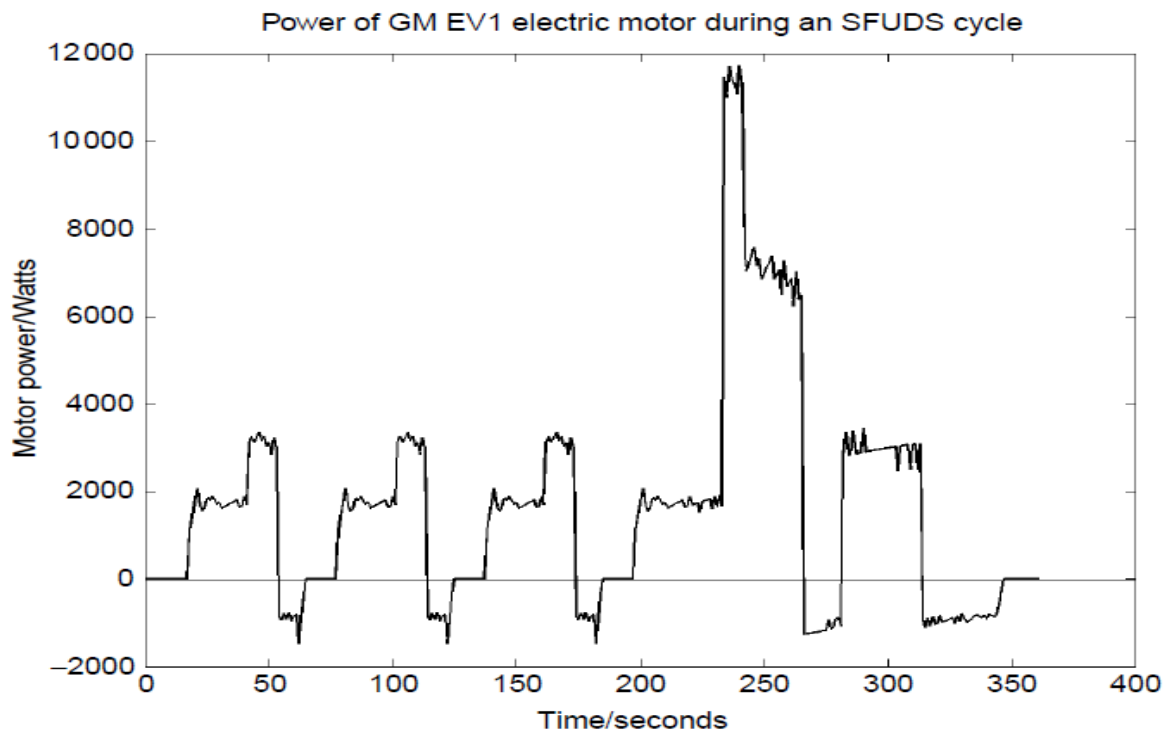


Figura 3-4 Potencia eléctrica GM EV1 para un ciclo SFUDS en [20]

La Figura 3-5 muestra el porcentaje de estado de carga de la batería en función del tiempo en segundos para el ciclo anterior SFUDS. En este tiempo la batería se descarga un 0,72% y la distancia recorrida es de 1.933 metros.

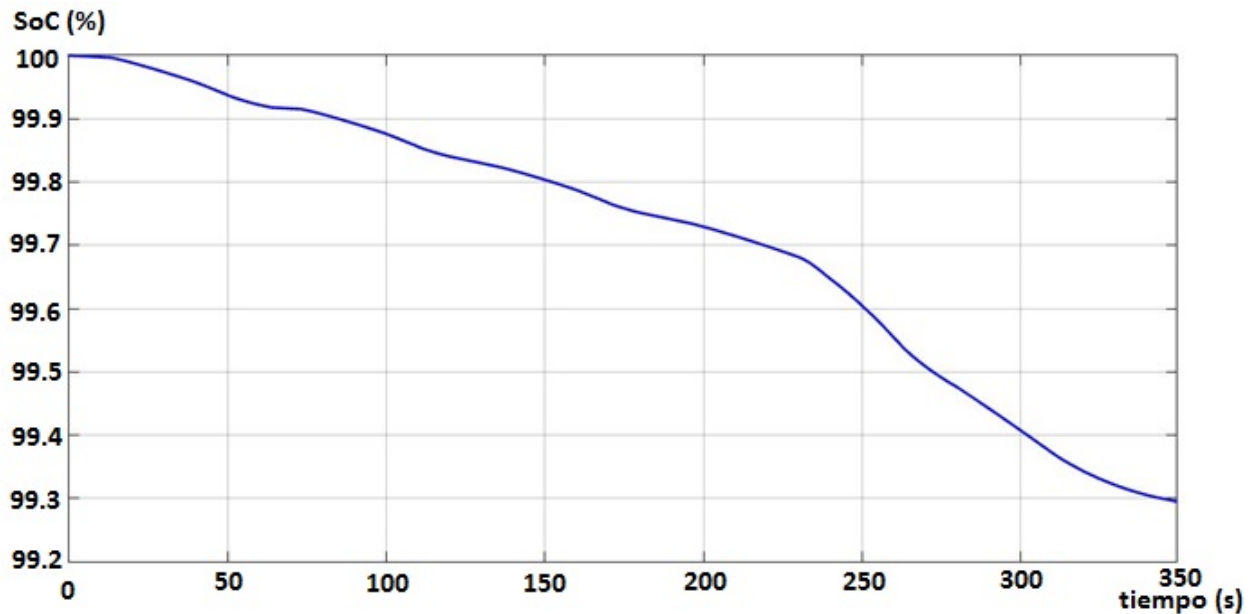


Figura 3-5 SoC batería GMEV1

Una vez realizada la simulación completa hasta un estado de descarga aproximado del 80% para el ciclo SFUDS y para distintos ciclos estándar se obtiene una tabla de autonomías para GM EV 1. Los valores obtenidos de autonomía se encuentran dentro del rango de autonomía que establece General Motors en las especificaciones de su vehículo eléctrico:

Ciclo	Autonomía (km)	SoC final(%)
SFUDS	151,35	18,97
ECE15	108,67	19,63
EUDC ALTA VELOCIDAD	97,90	16,28
EUDC BAJA VELOCIDAD	108,55	18,93
NEDC ALTA VELOCIDAD	106,46	13,02
NEDC BAJA VELOCIDAD	114,81	14,37

Tabla 3-4: Autonomía del GM EV1 obtenida mediante Simulink® para diferentes ciclos estándar

3.2 Validación del simulador con un scooter eléctrico

En este caso la validación se llevará a cabo gracias a recorridos reales con un Scooter eléctrico (Figura 3-6) mediante la introducción de los datos GPS del recorrido realizado. Con estos datos se comprobará si el estado de carga real de la batería y el estado de carga calculado por el simulador coinciden.

Para la validación del programa se han realizado un recorrido con el Scooter eléctrico variando la velocidad y el ángulo de inclinación del suelo para comprobar el correcto funcionamiento del modelo.



Figura 3-6 Scooter eléctrico empleado en el recorrido GPS

Para ello el recorrido ejecutado se ha llevado a cabo dentro de la Escuela Naval Militar, obteniendo las coordenadas del vehículo en intervalos de un segundo, facilitando de esta forma la compatibilidad de los datos con el simulador. El recorrido realizado con el Scooter es el mostrado en la Figura 3-7:

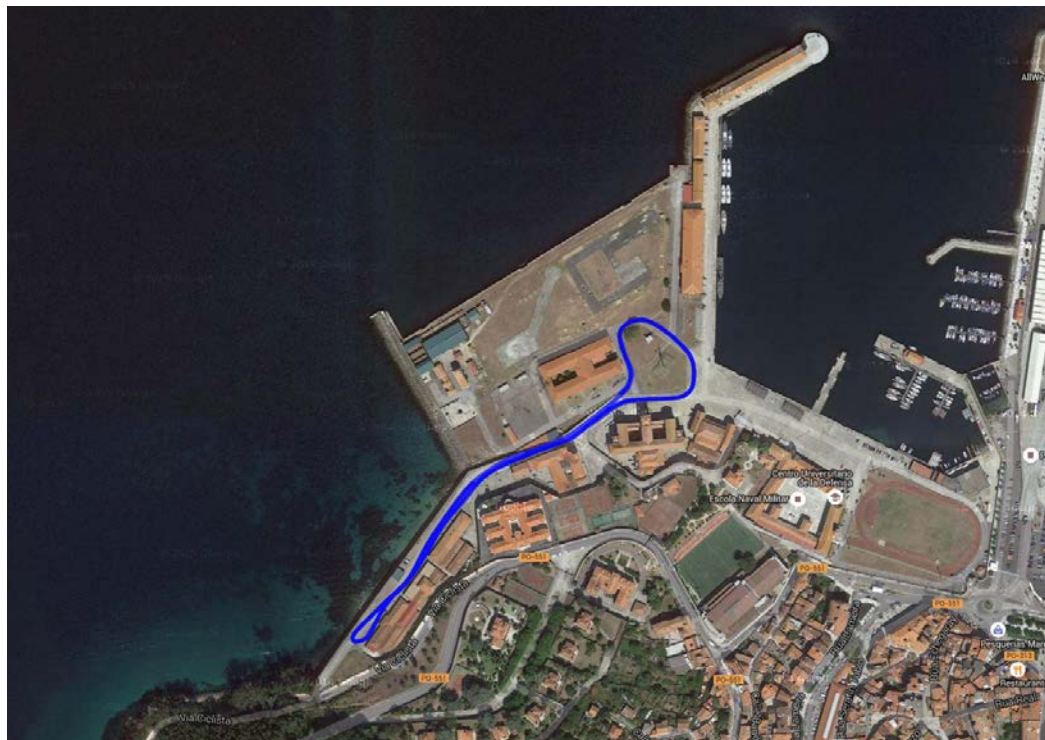


Figura 3-7 Recorrido GPS con Scooter

El scooter empleado es el modelo EVT-168, cuya configuración dinámica se desarrolla en la Tabla 3-5:

Datos scooter eléctrico	
Peso con un pasajero	185 kg
Área frontal	$0,6 \text{ m}^2$
Coefficiente aerodinámico	0,75
Relación de transmisión	2/0,21
Eficiencia de transmisión	0,97
Tasa de regeneración	0,5
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0,007

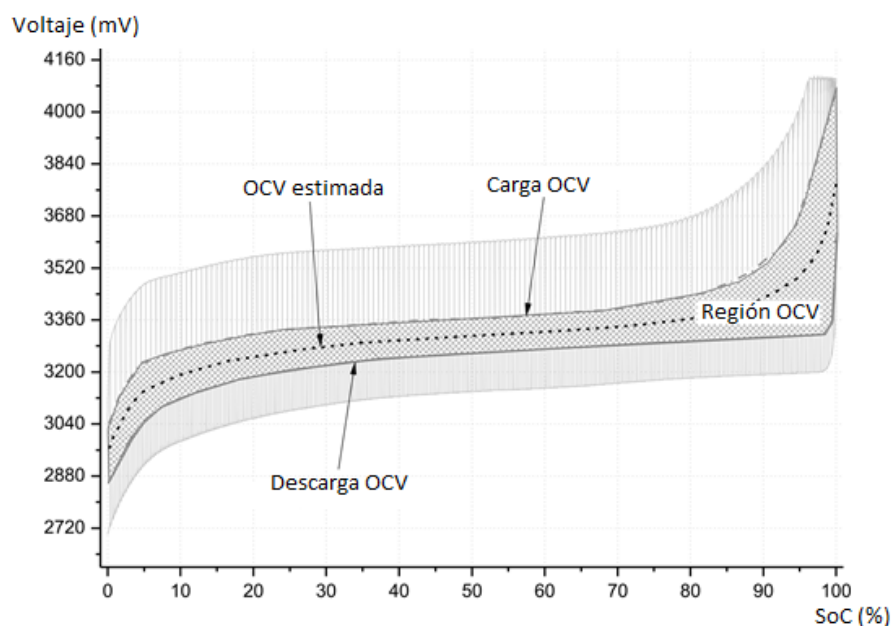
Tabla 3-5 Datos scooter eléctrico

Inicialmente las baterías del vehículo eran de plomo-ácido, las cuales fueron sustituidas posteriormente por una batería del tipo LiFePO_4 , cuyos datos exactos se describen en la Tabla 3-6:

Datos de la batería de LiFePO_4	
Número de celdas	15
Capacidad	40 Ah
Tensión nominal	48 V
Peso	22,5 kg

Tabla 3-6 Datos de la batería de LiFePO_4

Debido a que en nuestra simulación emplearemos una batería de LiFePO_4 , será este modelo el desarrollado a continuación. A partir de la gráfica mostrada en la Figura 3-8 [35], podemos obtener la ecuación de la tensión de circuito abierto en función de la profundidad de descarga gracias al software gratuito CurveExpertPro [36]:

Figura 3-8 Voltaje-SoC batería LiFePO_4

$$E_{oc} = (11.47 \cdot DoD^6 - 51.21 \cdot DoD^5 + 82.38 \cdot DoD^4 - 63.02 \cdot DoD^3 + 24.31 \cdot DoD^2 - 4.614 \cdot DoD + 3.723) \cdot N \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Siendo E_{oc} la tensión en circuito abierto y N el número de celdas de la batería.

Gracias a esta ecuación que implementaremos en MATLAB podemos llevar a cabo la simulación obteniendo resultados adecuados. El lugar de implementación en el simulador es en el bloque de la tensión de circuito abierto, explicado en el apartado 2.2.2.5

El motor eléctrico que emplea la motocicleta es el modelo “Gen II™ Hub Brushed 48V-1,5KW” y cuyos coeficientes de pérdidas se muestran en la Tabla 3-7 [37]:

Características motor eléctrico	
k_c	1,5
k_i	0,1
k_w	0,00001
C	20

Tabla 3-7 Características del motor eléctrico

3.2.1 Resultados

Un vez realizada dicha configuración en Simulink® y del recorrido llevado a cabo con el dispositivo GPS se obtiene en Simulink® la potencia mecánica de salida del motor requerida para que el Scooter realice el recorrido GPS introducido, mostrado en la Figura 3-9, y la potencia eléctrica requerida por el motor eléctrico, la cual al incluir las pérdidas del motor requiere de una potencia mayor, mostrada en la Figura 3-10:

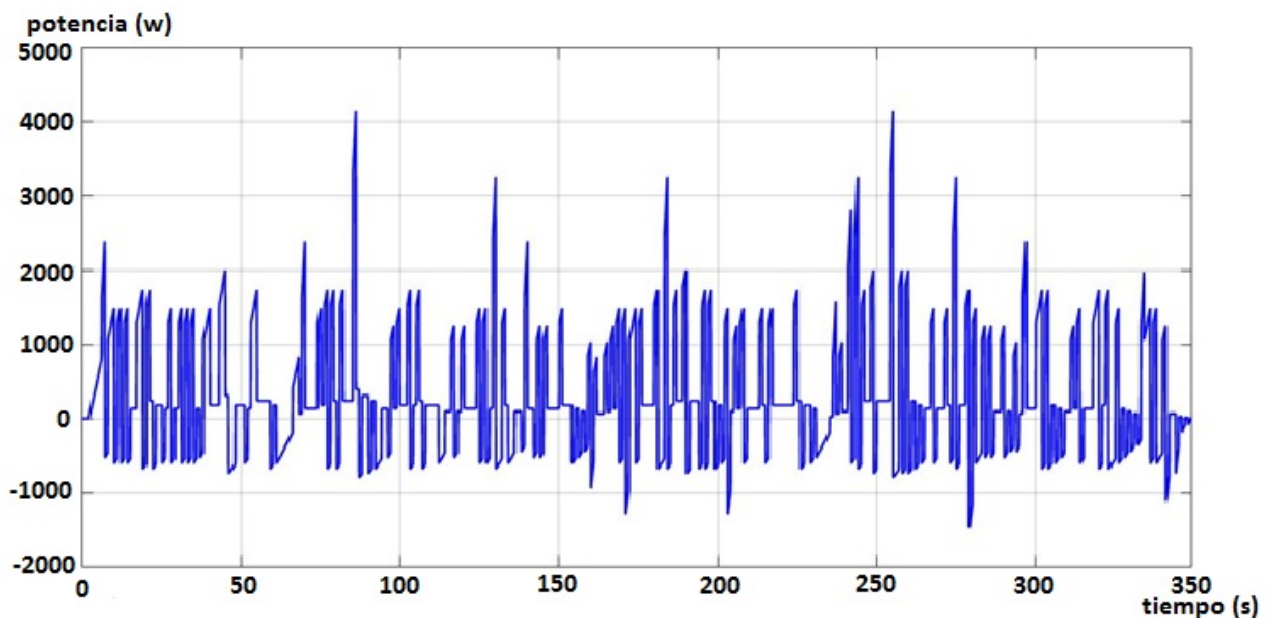


Figura 3-9 Potencia salida del motor Scooter

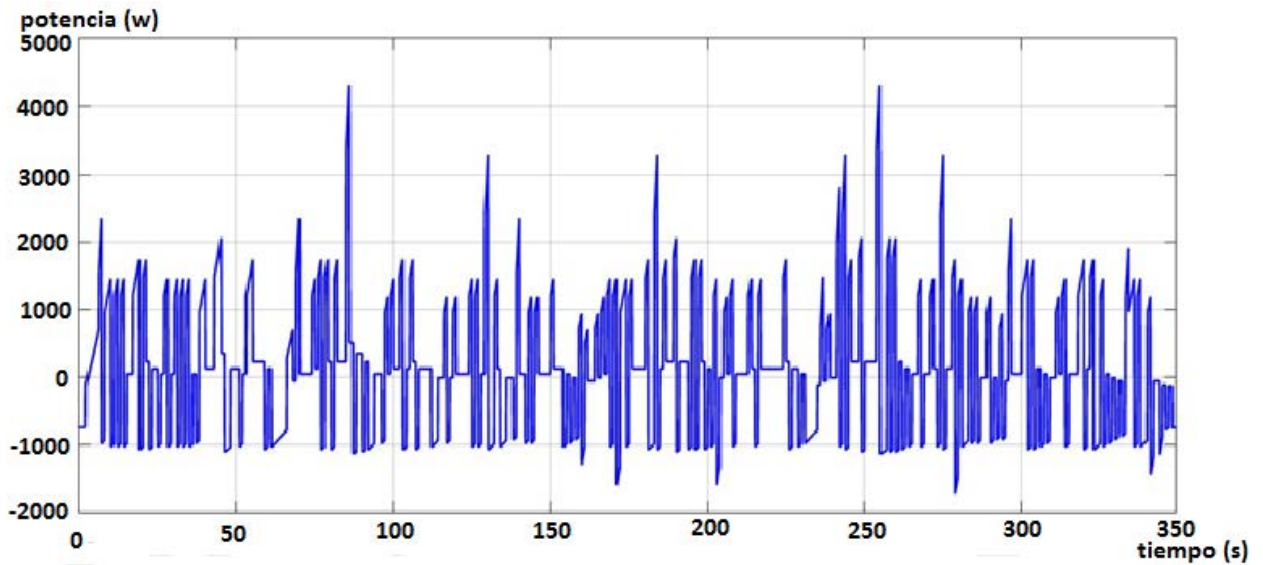


Figura 3-10 Potencia eléctrica de entrada al motor Scooter

El estado de carga de la batería SOC obtenido tras la simulación de este recorrido es del 89,2% (Figura 3-11) el cual coincide de manera razonable con el estado de carga real de la batería del vehículo después de haber realizado el recorrido (88,5%).

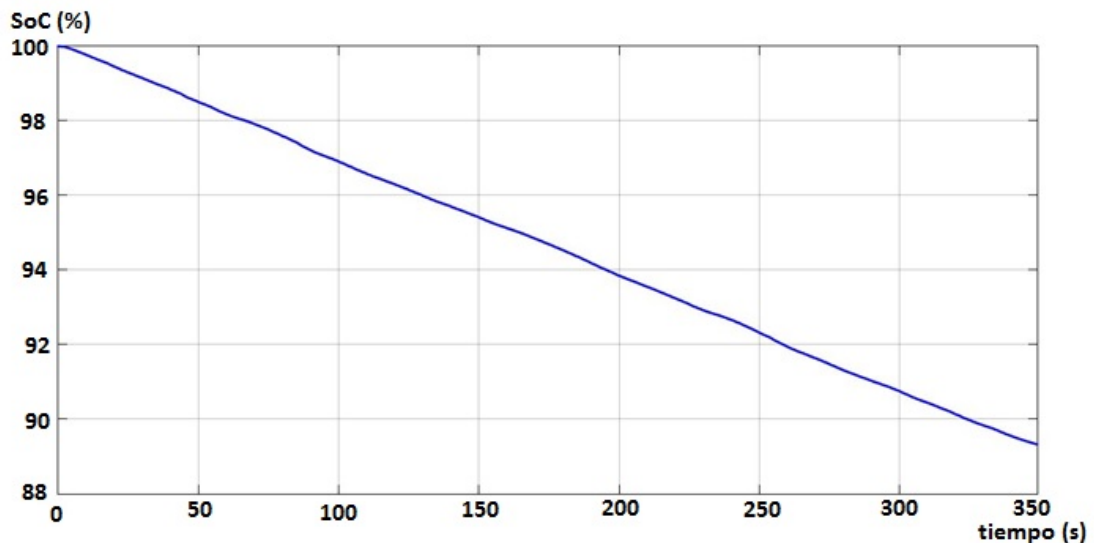


Figura 3-11 SoC Scooter eléctrico para recorrido ENM

Los resultados obtenidos en la simulación coinciden con los obtenidos en el Scooter, por lo que el programa desarrollado en el trabajo queda de esta forma validado y permite la introducción de diferentes configuraciones de vehículos así como de diferentes recorridos GPS o ciclos de conducción para realizar simulaciones veraces de forma rápida en una interfaz sencilla.

3.3 Recorrido GPS real con vehículo militar

Otro de los objetivos de este trabajo, y ya dentro del ámbito militar, es el poder simular un vehículo militar modificado para su funcionamiento de forma eléctrica con baterías. El vehículo con el cual se está dotando a gran parte de las unidades de los tres ejércitos e incluso a la Policía (Figura 3-12) es el URO VAMTAC (Vehículo de Alta Movilidad Táctico) y que originalmente monta un motor de combustión interna.

Este será el modelo elegido para simular, y así poder comprobar su posible viabilidad de una variante eléctrica en el campo de maniobras.



Figura 3-12 URO VAMTAC S3 policial

El modelo concreto de VAMTAC suministrado a las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado es el S3, mostrado en la Figura 3-13. Dicho vehículo es un todoterreno de tracción a las cuatro ruedas destinado principalmente al ámbito militar y producido por la empresa española UROVESA en Santiago de Compostela. El todoterreno presenta similitudes con el HUMMER estadounidense y con el GAZ 2975 Tigr ruso.



Figura 3-13 URO VAMTAC S3 militar

La configuración dinámica del VAMTAC S3 implementada en el modelo ha sido recopilada de diferentes fuentes. La principal ha sido la ficha técnica del vehículo disponible en la página web de la empresa UROVESA [38]. Los parámetros característicos del vehículo se muestran en la Tabla 3-8:

Datos URO VAMTAC S3	
Peso máximo admisible	5.300 <i>kg</i>
Área frontal	2,5 <i>m</i> ²
Coefficiente aerodinámico	0,57
Relación de transmisión	4,03:1
Eficiencia de transmisión	0,9
Tasa de regeneración	0,5
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0,015
Radio rueda	0,5 m

Tabla 3-8 Datos dinámicos URO VAMTAC S3

El peso seleccionado para la simulación se corresponde con el máximo admisible por el modelo S3, para de esta forma asegurar que el modelo de batería y de motor cumple con las mayores exigencias posibles que se puedan requerir por el vehículo.

Al igual que ocurre en las simulaciones anteriores, es necesario configurar un motor eléctrico y una batería para poder ejecutar la simulación de manera completa. Las baterías implementadas en el VAMTAC eléctrico son de la misma tecnología y el mismo fabricante que las utilizadas en el scooter eléctrico (LiFePO₄), concretamente 312 celdas y con una capacidad nominal de 120Ah. Por lo tanto la curva para la tensión de circuito abierto es la misma que la empleada en la simulación del scooter eléctrico.

En cuanto al ciclo de conducción seleccionado, durante el periodo de instrucción y adiestramiento recogido en el Plan de Estudios de la Escuela Naval Militar, comprendido entre el 7 y el 17 de marzo de 2016, se ha realizado un recorrido GPS real con un vehículo militar en el Campo de Tiro y Maniobras el Teleno, localizado en la zona Oeste de la provincia de León, próximo a la localidad de Quintanilla de Somoza. Este recorrido es el mostrado en la Figura 3-14.

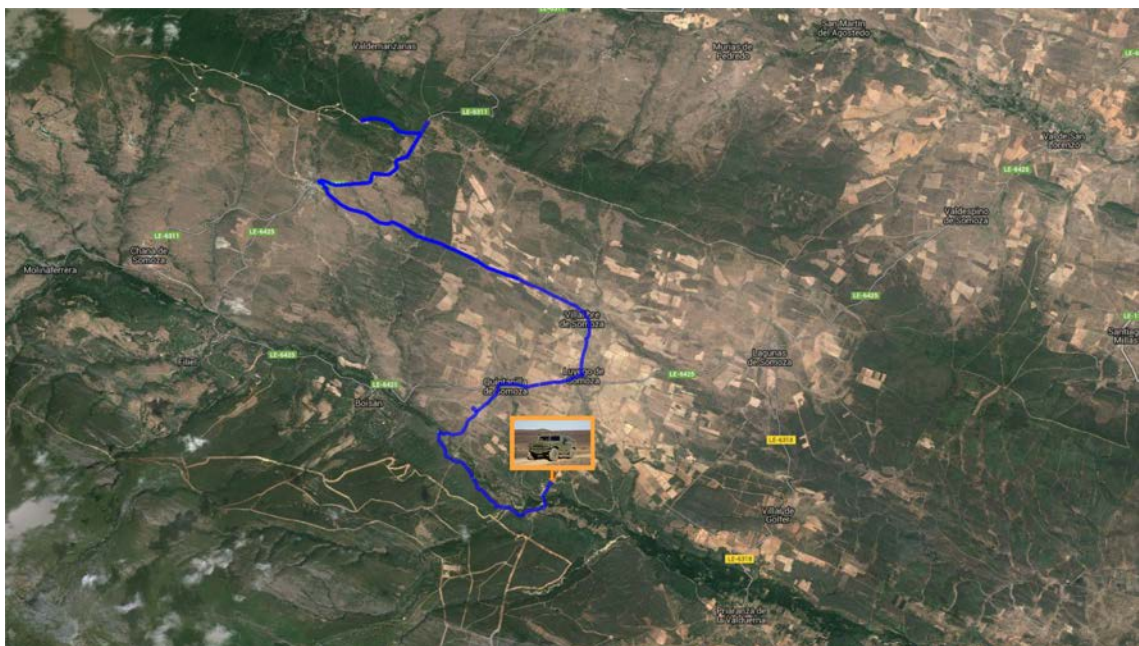


Figura 3-14 Recorrido vehículo militar semana I+A

3.3.1 Resultados

La Figura 3-15 muestra una captura de Simulink® con la configuración adaptada al vehículo militar VAMTAC para el recorrido GPS en el campo de maniobras, para baterías con tecnología de LiFePO₄ y para un motor eléctrico trifásico de inducción de 204 kW (274 CV).

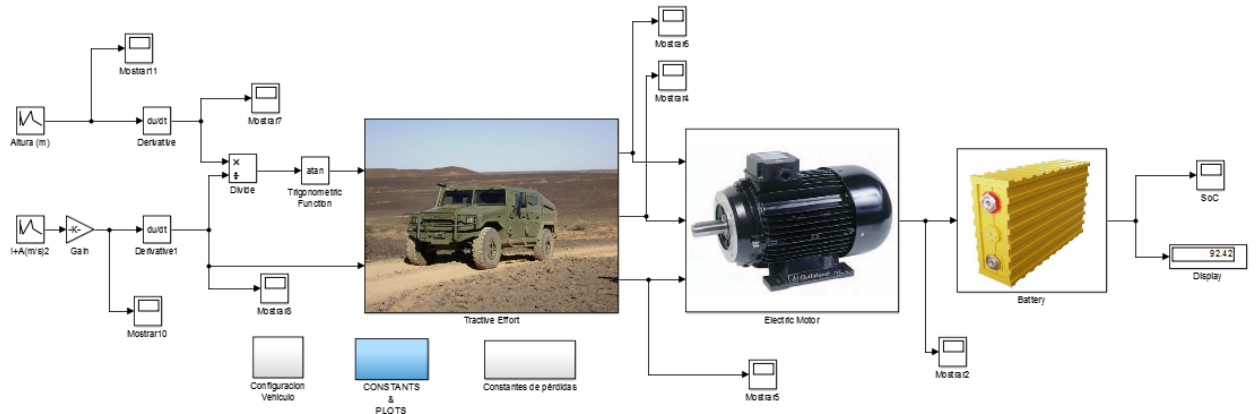


Figura 3-15 Conjunto Simulink® vehículo militar

La Figura 3-16 muestra la relación entre la velocidad y el tiempo del recorrido militar durante un tiempo total de 3.400 segundos, con periodos de paradas en los cuales la velocidad es cero y periodos de velocidad máxima con 16 metros/segundo.

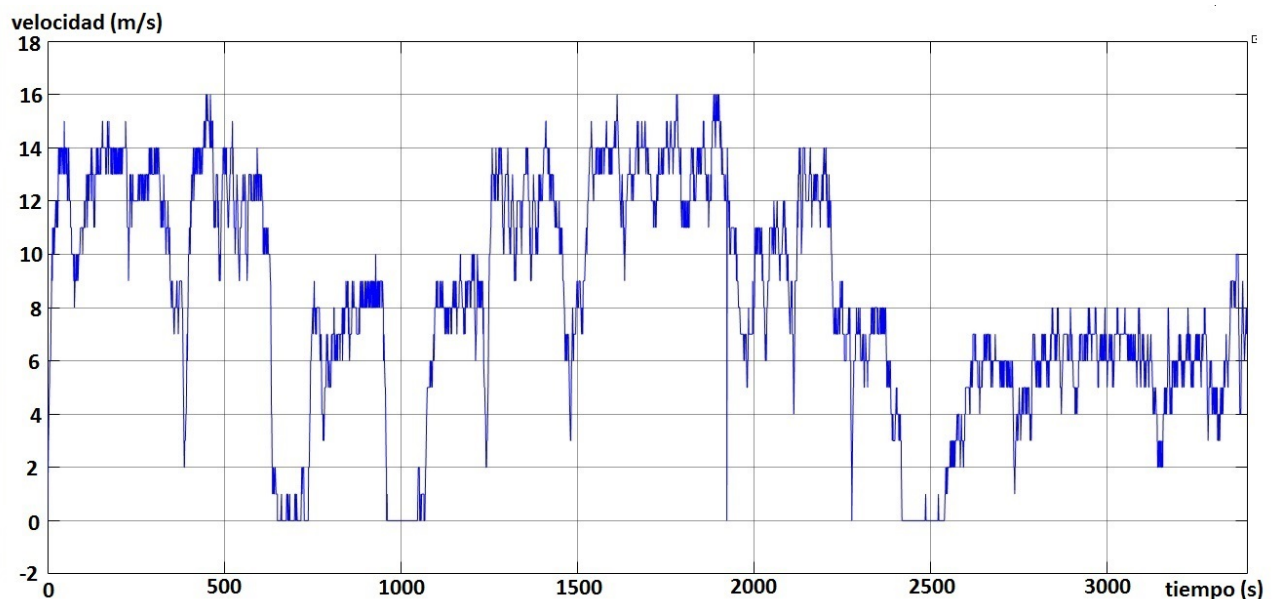


Figura 3-16 Velocidad – tiempo recorrido militar

La distancia total de la simulación es de 28 kilómetros, lo cual produce una descarga en la batería configurada de 7,58%. La autonomía total del vehículo con la configuración propuesta de batería, motor eléctrico y a máxima carga es de 260 kilómetros, por lo que si el peso del vehículo fuera menor esta autonomía aumentaría.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado propuso como objetivo principal la creación de un modelo global para la simulación de vehículos eléctricos. Todo ello ha sido elaborado y desarrollado bajo el entorno de simulación Simulink®. A lo largo del proyecto se han definido todas las partes constituyentes de este tipo de vehículos (dinámica, motor y baterías), realizando los modelos individuales de cada uno de ellos para finalmente realizar el ensamblaje de todos ellos con el fin de obtener un modelo global general para casi cualquier tipo de vehículo eléctrico.

El segundo objetivo propuesto ha sido la comprobación del correcto funcionamiento de este modelo mediante diferentes simulaciones y para distintas configuraciones de vehículos con baterías, en concreto un utilitario del fabricante General Motors ((GM EV 1) y un scooter eléctrico (EVT 168). Una vez realizadas las simulaciones pertinentes, bien para ciclos estándar como para recorridos reales, se ha conseguido validar dicho modelo global en base a los resultados obtenidos.

Además de los objetivos propuestos, se ha conseguido un tercer objetivo, y que ha sido el comprobar la posible viabilidad de un hipotético vehículo eléctrico militar basado en el ya existente VAMTAC S3 que originalmente está dotado de un motor de combustión interna. Para ello se han utilizado datos reales de un recorrido GPS en el campo de maniobras del Teleno, en León, el cual se ha introducido en el simulador y se ha llegado a unos resultados factibles de una posible implementación de baterías y motor eléctrico.

Por lo tanto todos los objetivos propuestos en el presente trabajo han sido resueltos de forma positiva, siendo además alcanzado un objetivo adicional como es la simulación del vehículo militar eléctrico.

4.2 Líneas futuras

Como líneas futuras del presente proyecto se plantea la posibilidad de realizar simulaciones reales con el modelo desarrollado empleando vehículos militares actualmente en uso por las Fuerzas Armadas. Se podría además estudiar posibles modelos concretos de baterías y motores eléctricos que cumplan las necesidades de los vehículos militares en períodos de maniobras o misiones internacionales.

Esta línea desarrollada se puede ampliar también llevando a cabo un estudio económico de rentabilidad sobre el empleo de vehículos eléctricos en las Fuerzas Armadas como sustitución de los vehículos que emplean combustibles fósiles como fuente de alimentación.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Guirong, Z. Henghai y L. Houyu, «3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology,» de *The driving control of pure electric vehicle*, Jinan, China, 2011.
- [2] D. Brown, M. Alexander, D. Brunner, S. Advani y J. Prasad, *Power sources*, 2008.
- [3] X. Wuzhou, *Pure electric vehicle drive system design and optimization of the matching*, Wuhan University of Technology, 2007.
- [4] L. Xinghu, «Introduction of electric vehicles,» Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [5] A. Same, A. Stipe, D. Grossman y J. Wan Park, «A study on optimization of hybrid drive train using Advanced Vehicle Simulator,» 2010.
- [6] I. E. Agency, «Energy Technology Perspectives 2012: the wider benefits of the 2°C Scenario,» 2011. [En línea]. Available: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012_free.pdf. [Último acceso: 25 Marzo 2016].
- [7] I. E. Agency, «Energy Technology Perspectives,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/etp2010.pdf>. [Último acceso: 24 Marzo 2016].
- [8] Z. Darabi y M. Ferdowsi, *Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile*, IEEE Trans Sustain Energy, 2011.
- [9] I. E. Agency, «Global EV Outlook: factsheet,» 2013.
- [10] S. Tie y C. Tan, *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*, 2013.
- [11] M. Catenacci, E. Verdolini, V. Bosetti y G. Fiorese, *Going electric: expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles*, 2013.
- [12] K. Tweed, «Netherlands builds nationwide EV fast-charging network,» IEEE Spectrum, 2013. [En línea]. Available: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/advanced->

- cars/netherlands-building-nationwide-ev-fastcharging-network-. [Último acceso: 10 Febrero 2016].
- [13] M. Duvall, «A rebuttal: EVs are clean at every speed,» IEEE Spectrum, 30 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/a-rebuttal-evs-are-clean-at-every-speed>. [Último acceso: 24 Marzo 2016].
- [14] O. Zehner, «Unclean at any speed,» IEEE Spectrum, 30 Junio 2013. [En línea]. Available: <http://spectrum.ieee.org/energy/renewables/unclean-at-any-speed>. [Último acceso: 25 Marzo 2016].
- [15] E. Nanaki y C. Koroneos, Comparative economic and environmental analysis of conventional, hybrid and electric vehicles- the case study of Greece, Elsevier.
- [16] «Matlab Central,» Mathworks, 21 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/matlabcentral/>.
- [17] «Simulink,» MathWorks, 21 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/simulink/index.html>.
- [18] D. J. Higham y N. J. Higham, Matlab Guide, Second Edition, Siam.
- [19] P. Luque, D. Álvarez y C. Vera, Ingeniería del Automóvil, Thomson, 2004.
- [20] J. Larminie y J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [21] C. Casqueiro Placer, Apuntes de la Asignatura "Automóviles", Marín, 2016.
- [22] S. Schmidt, «Testing and Assessment Protocol Release 2.0,» ADAC .
- [23] P. Mock, J. German, A. Bandivadekar y I. Riemersma, «Discrepancies between type-approval and "real-world" fuel consumption and CO2 values,» International Council on Clean Transportation, 2012.
- [24] C. Calahorra, Química general. Introducción a la química teórica, Universidad de Salamanca, 1995.
- [25] N. Christian Julien, Solid State Batteries: Materials Design and Optimization, Springer Science & Business Media, 2013.
- [26] T. David Linden, Handbook of Batteries, McGraw-Hill, 2002.
- [27] L. Malone, Introducción a la química, Limusa S.A., 2004.
- [28] D. Andrea, Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs, Artech House, 2010.
- [29] A. Fitzgerald, C. Kingsley y S. Umans, Electric Machinery, sexta edición, McGraw Hill, International Edition, 2003.
- [30] S. J. Chapman, MAQUINAS ELECTRICAS Segunda Edición, McGraw-Hill.
- [31] I. Kosow, Máquinas Eléctricas y Transformadores, Reverté S.A..
- [32] «wikimedia,» 21 Junio 2006. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/Electric_motor#/media/File:Motor_asincrono.jpg. [Último acceso: 7 Febrero 2016].

- [33] J. Larminie y J. Lowry, «Electric Vehicle Technology Explained,» John Wiley & Sons, Ltd, 2003, p. 284.
- [34] A. Mendoza y J. Argueta, Performance characterization of GM EV1, Southern California EDISON, 2000.
- [35] V. Alfonsín, A. Suárez, S. Urréjola, J. Miguez y A. Sánchez, «Integration of several renewable energies for internal combustion engine substitution in a commercial sailboat,» *ScienceDirect*, 2015.
- [36] D. G. Hyams, «CurveExpert and GraphExpert Software,» CurveExpert, 2013. [En línea]. Available: <http://www.curveexpert.net/products/curveexpert-professional/>. [Último acceso: 24 Enero 2016].
- [37] B. E. Vehicles, «Bravo Electric Vehicles,» BEV, 2008. [En línea]. Available: <http://bravolectricvehicles.com/Electric-Scooters/Bravo-EVT-168/>. [Último acceso: 24 Marzo 2016].
- [38] UROVESA, «UROVESA,» Enero 2007. [En línea]. Available: http://www.urovesa.com/pdf/S3_civil.pdf. [Último acceso: 24 Marzo 2016].