



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y análisis de prestaciones de un vehículo militar  
híbrido en serie*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Jesús Cabezudo Carrascal

**DIRECTORES:** Carlos Casqueiro Placer  
Víctor Alfonsín Pérez

**CURSO ACADÉMICO:** 2017-2018

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y análisis de prestaciones de un vehículo militar  
híbrido en serie*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

En este Trabajo de Fin de Grado se estudiarán las prestaciones de un vehículo militar híbrido en serie a través de simulaciones para posteriormente poder analizarlas y compararlas con las prestaciones del mismo vehículo original. Para ello se realizará un modelo matemático sobre el software de modelado y simulación Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> que será válido para distintos tipos de configuración permitiendo hacer comparaciones entre ellos.

Antes de realizar el modelo, se han definido los conceptos teóricos y las ecuaciones que posteriormente se han modelado sobre diagramas de bloques tales como las fuerzas que actúan sobre la dinámica del vehículo, el motor eléctrico, las baterías o el motor de combustión. Finalmente, se han puesto en común todos estos bloques en uno único capaz de realizar simulaciones para cualquiera de las posibles configuraciones del vehículo.

Por último y tras realizar diferentes simulaciones para cada una de estas configuraciones y con diferentes ciclos de conducción, entre los cuales se ha empleado un ciclo real, se han analizado los datos obtenidos y se han comparado con los datos del vehículo original de partida.

## **PALABRAS CLAVE**

Vehículo híbrido, vehículo militar, simulación, prestaciones



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi madre Alegría, que siempre ha estado ahí cuando lo he necesitado, por todo el apoyo mostrado y especialmente al recibido durante los últimos años.

A mi hermana Lydia porque me ha apoyado en todo momento durante estos años.

A mis tutores Víctor y Carlos porque sin ellos este trabajo no habría sido posible.

A mis tíos José y Luis, que me han ayudado siempre que han podido y a mi abuelo Félix por todo lo que me ha enseñado.

A mis primos Diego, Daniel y Félix y a mis primas Elena, Cristina, Diana, Sofía y Nieves por los buenos momentos pasados en familia.

A mi cuñado Servando por acogerme en su familia como uno más y ayudarme siempre que ha podido.

A todas las amistades ganadas en la ENM, con los que se han compartido momentos tan inolvidables.

A la camareta L2 y al piso de Jaime Janer, por el apoyo mostrado.



## CONTENIDO

Contenido .....	5
Índice de Figuras .....	8
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción y Objetivos .....	13
1.1 Panorama energético .....	13
1.2 Creciente preocupación por la contaminación .....	14
1.3 Vehículos híbridos .....	15
1.3.1 Híbridos en serie .....	16
1.3.2 Híbridos en paralelo.....	16
1.3.3 Vehículo híbrido mixto.....	17
1.4 Aplicación de vehículos militares híbridos.....	17
1.5 Objetivos .....	17
2 Estado del arte .....	19
2.1 Tendencia actual del mercado automovilístico .....	19
2.1.1 Vehículos eléctricos de autonomía extendida o híbridos en serie .....	19
2.1.2 Vehículos militares híbridos .....	20
2.2 URO VAMTAC.....	21
3 Planteamiento y Selección de Componentes.....	23
3.1 Dinámica .....	23
3.1.1 Fuerza de tracción.....	23
3.1.2 Fuerza de resistencia a la rodadura .....	24
3.1.3 Fuerza de resistencia aerodinámica .....	25
3.1.4 Fuerza para superar una pendiente .....	25
3.1.5 Fuerza de aceleración lineal.....	26
3.1.6 Potencia eléctrica necesaria .....	26
3.1.7 Selección del vehículo .....	27
3.2 Motor eléctrico .....	27
3.2.1 Tipos de motores eléctricos más usados en automoción .....	27
3.2.1.1 Motor de inducción .....	27
3.2.1.2 Motor síncrono .....	27
3.2.1.3 Motor de corriente continua sin escobillas o “brushless” .....	28
3.2.1.4 Motor eléctrico “In-Wheel” o “hub wheel” .....	28
3.2.2 Eficiencia de un motor eléctrico .....	28

3.2.3 Selección del motor eléctrico.....	30
3.2.4 Ensamblaje de los motores eléctricos .....	31
3.3 Baterías de tracción .....	32
3.3.1 Tipos de baterías .....	32
3.3.1.1 Batería de Plomo-Ácido .....	32
3.3.1.2 Batería de Níquel-Cadmio .....	33
3.3.1.3 Batería de Níquel-Hidruro Metálico.....	33
3.3.1.4 Batería de Ion-Litio .....	33
3.3.1.5 Batería de Polímero-Litio .....	34
3.3.1.6 Batería de Aire-Zinc .....	34
3.3.2 Características de las baterías .....	34
3.3.3 Capacidad y ley de Peukert.....	35
3.3.4 Selección de la batería de tracción.....	36
3.4 Motor de combustión .....	38
3.4.1 Generalidades de los motores de combustión.....	38
3.4.2 Selección del motor de combustión .....	39
3.5 Selección del generador eléctrico .....	40
4 Modelado del Vehículo .....	41
4.1 Software utilizado .....	41
4.2 Modelado de la dinámica .....	42
4.2.1 Bloque de la fuerza de tracción.....	42
4.2.2 Bloque de fuerza la de resistencia a la rodadura.....	43
4.2.3 Bloque de la fuerza de resistencia aerodinámica .....	43
4.2.4 Bloque de la fuerza para superar una pendiente .....	43
4.2.5 Bloque de la fuerza de aceleración lineal .....	44
4.2.6 Bloque de la potencia eléctrica necesaria .....	44
4.2.7 Bloque de configuración del vehículo .....	45
4.3 Modelado del motor eléctrico .....	46
4.3.1 Eficiencia de un motor de inducción .....	46
4.3.2 Validez del modelo del motor eléctrico.....	47
4.4 Modelado de la batería de tracción .....	47
4.4.1 Bloque de tensión de circuito abierto .....	48
4.4.2 Bloque de resistencia interna .....	49
4.4.3 Bloque de capacidad de Peukert .....	49
4.4.4 Bloque de intensidad.....	49
4.4.5 Bloque de carga y descarga .....	50

4.4.6 Bloque de estado de carga (SoC).....	51
4.5 Modelado del motor de combustión.....	51
4.6 Modelado del generador eléctrico.....	53
4.7 Modelado de la unidad de control de potencia .....	54
4.8 Modelado general del vehículo .....	56
5 Simulación y Prestaciones.....	57
5.1 Simulación .....	57
5.1.1 Ciclos de conducción.....	57
5.1.1.1 Ciclo NEDC .....	57
5.1.1.2 Ciclo WLTP .....	58
5.1.1.2.1 Ciclo WLTP clase 3 .....	58
5.1.1.2.2 Ciclo WLTP clase 2 .....	59
5.1.1.2.3 Ciclo WLTP clase 1 .....	59
5.1.1.3 Ciclo real de conducción .....	59
5.1.2 Simulaciones.....	60
5.1.3 Análisis de resultados .....	64
5.2 Prestaciones.....	67
6 Conclusiones y Líneas futuras.....	69
6.1 Conclusiones .....	69
6.2 Líneas futuras.....	69
7 Bibliografía.....	71
Anexo I: motor siemens® 1PV5135-4WS18.....	75
Anexo II: Baterías thunder sky winston® .....	76
Anexo III: Prestaciones de los motores .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Tasa de dependencia energética de la UE 2005-2015 [4].....	14
Figura 1-2 Emisiones de la UE-28 entre 1990 y 2015 [6].....	14
Figura 1-3 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido en serie [15].....	16
Figura 1-4 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido en paralelo [15] .....	16
Figura 1-5 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido mixto [15].....	17
Figura 2-1 Imagen de un Chevrolet Volt [16].....	19
Figura 2-2 BMW i3 [18] .....	20
Figura 2-3 Chasis y elementos propulsores del Workhorse W15 [19].....	20
Figura 2-4 HMMWV del ejército de EE. UU [21].....	21
Figura 2-5 Prototipo de CERV del ejército de EE.UU. [22].....	21
Figura 2-6 Imagen de un URO VAMTAC S3 [24].....	22
Figura 3-1 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento [25] .....	23
Figura 3-2 Distribución de presiones y fuerza resultante de resistencia a la rodadura .....	24
Figura 3-3 Configuración de un motor de rotor exterior intra-rueda .....	28
Figura 3-4 Aproximación polinómica de la eficiencia del motor 1PV5135-4WS18 de Siemens....	31
Figura 3-5 Motores sobre el modelo CAD del VAMTAC S3 .....	32
Figura 3-6 Imagen 3D del espacio disponible para baterías en el vientre del VAMTAC.....	36
Figura 3-7 Funcionamiento de un motor de combustión de 4 tiempos [37] .....	38
Figura 3-8 Funcionamiento de un motor de combustión de dos tiempos [37].....	38
Figura 3-9 Diagramas potencia-volumen y temperatura-entropía en un ciclo Otto [37] .....	39
Figura 3-10 Diagramas potencia-volumen y temperatura-entropía en un ciclo Diésel [37] .....	39
Figura 3-11 Gráfica del consumo específico (g/kWh) del motor de gasolina del Honda Insight ....	40
Figura 4-1 Capturas de pantalla de Matlab® [38] (izquierda) y Simulink® [39] (derecha).....	41
Figura 4-2 Modelado de la potencia mecánica.....	42
Figura 4-3 Diagrama de la fuerza de resistencia a la rodadura .....	43
Figura 4-4 Diagrama de la fuerza de resistencia aerodinámica.....	43
Figura 4-5 Bloque de la Fuerza necesaria para superar la pendiente .....	43
Figura 4-6 Diagrama de la fuerza de aceleración lineal .....	44
Figura 4-7 Diagrama de potencia mecánica .....	44
Figura 4-8 Bloque de configuración del vehículo .....	45
Figura 4-9 Bloque de eficiencia de un motor eléctrico .....	46
Figura 4-10 Bloque de potencia eléctrica .....	46
Figura 4-11 Bloque de configuración del motor eléctrico .....	47
Figura 4-12 Gráfica de eficiencia del motor obtenida en Simulink .....	47
Figura 4-13 Bloque general de la batería de tracción.....	48

Figura 4-14 Bloque de configuración del vehículo .....	48
Figura 4-15 Bloque de tensión de circuito abierto .....	48
Figura 4-16 Gráfica típica OCV de una batería de Li-Ion [33].....	48
Figura 4-17 Bloque de resistencia interna .....	49
Figura 4-18 Bloque de capacidad de Peukert.....	49
Figura 4-19 Bloque de intensidad eléctrica .....	50
Figura 4-20 Bloque de carga y descarga .....	51
Figura 4-21 Bloque del estado de carga .....	51
Figura 4-22 Aproximación polinómica de la curva de consumo frente a par y rpm del motor .....	51
Figura 4-23 Modelo general del motor de combustión interna .....	52
Figura 4-24 Bloque y función de configuración del motor .....	52
Figura 4-25 Bloque de consumos del MCI .....	53
Figura 4-26 Modelado del generador eléctrico .....	54
Figura 4-27 Diagrama de flujo de la unidad de control de potencia .....	54
Figura 4-28 Bloque y código de la unidad de control de potencia.....	55
Figura 4-29 Modelo general del vehículo .....	56
Figura 5-1 Ciclo NEDC.....	58
Figura 5-2 Ciclo WLTP clase 3.....	58
Figura 5-3 Ciclo WLTP clase 2.....	59
Figura 5-4 Ciclo WLTP clase 1 .....	59
Figura 5-5 Gráfica de velocidad respecto a tiempo del ciclo de conducción real.....	59
Figura 5-6 Gráfica de altitud frente a tiempo del ciclo de conducción real .....	60
Figura 5-7 Gráfico de barras de autonomía para 160 Ah .....	64
Figura 5-8 Gráfico de barras de autonomía para 200 Ah .....	64
Figura 5-9 Gráfico de barras de autonomía para 300 Ah .....	65
Figura 5-10 Estado de carga de las baterías de 300 Ah durante el ciclo NEDC .....	66
Figura 5-11 Potencia generada en el ciclo NEDC.....	66
Figura 5-12 Potencia proporcionada y regenerada por los motores eléctricos en el ciclo NEDC ...	68
Figura A1-1 Hoja de características del motor Siemens 1PV5135-4WS18.....	75
Figura A2-1 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 160 Ah [33].....	76
Figura A2-2 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 200 Ah [33].....	77
Figura A2-3 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 300 Ah [44].....	78
Figura A3-1 Hoja de cálculo de prestaciones del motor del vehículo híbrido (160 Ah).....	79
Figura A3-2 Prestaciones del motor del vehículo híbrido (200 Ah) .....	80
Figura A3-3 Prestaciones del motor del vehículo híbrido (300 Ah) .....	81

Figura A3-4 Prestaciones del motor del vehículo híbrido con MMA .....82  
Figura A3-5 Prestaciones del motor del vehículo original en tara .....83  
Figura A3-6 Prestaciones del motor del vehículo original con MMA .....84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Coeficientes de resistencia a la rodadura [26] .....	25
Tabla 3-2 Características de los principales tipos de baterías [35] .....	34
Tabla 5-1 Datos de configuración del vehículo.....	60
Tabla 5-2 Resultados de las simulaciones para la batería de 160 Ah.....	61
Tabla 5-3 Resultados de las simulaciones para la batería de 200 Ah.....	62
Tabla 5-4 Resultados de las simulaciones para la batería de 300 Ah.....	63
Tabla 5-5 Cálculo de prestaciones con MMA para VAMTAC original e híbrido.....	67
Tabla 5-6 Cálculo de prestaciones en tara para VAMTAC original e híbrido.....	67
Tabla 5-7 Resumen de prestaciones de las configuraciones del vehículo estudiadas .....	68



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Panorama energético

Las “fuentes de energía primarias” son aquellas cuyos productos energéticos son extraídos u obtenidos a partir de recursos naturales, mientras que se denominan “productos derivados” a los productos energéticos producidos a partir de fuentes de energía primaria en plantas de transformación. La producción de energía primaria tiene lugar cuando se explotan recursos naturales como pueden ser las minas de carbón, los yacimientos petrolíferos o las centrales hidroeléctricas, o cuando se fabrican biocombustibles. Y es entonces cuando si el consumo supera a la producción primaria, se genera un déficit que debe cubrirse con importaciones de productos primarios o derivados.

Uno de los factores más influyentes en la economía a nivel mundial es el mercado energético. Debido al agotamiento de los recursos fósiles y a su carácter limitado, se ha generado una importante preocupación global y un interés por la reducción del consumo de estos recursos [1].

Es ya un hecho que la economía de la Unión Europea (UE) tiene una gran dependencia energética. Ya se pudo comprobar con la escalada de precios del petróleo a inicios de los años 70, donde se observó que los factores como el desarrollo y la estabilidad económica en países desarrollados, como son EE.UU. y Europa Occidental, estaban muy condicionados por el contexto energético [2].

El descenso en la producción primaria de hulla y antracita, lignito, petróleo, gas natural y, recientemente, energía nuclear, ha llevado a la Unión Europea a una situación en la que depende aún más de las importaciones de energía para satisfacer su demanda, pese a que esto se ha estabilizado en los últimos años como consecuencia de la crisis económica y financiera mundial. Así fue que, en 2015, las importaciones de energía primaria de la UE superaron a las exportaciones en 902 millones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP).

De esta forma la dependencia de las importaciones de energía de la Unión Europea pasó de poco más del 40% del consumo bruto de energía en 1990 al 54.0% en 2015 (Figura 1-1). Desde 2004, han sido superiores las importaciones netas de energía de la UE a su producción primaria; es decir, más de la mitad del consumo interior bruto de energía de la UE se cubrió con importaciones netas, superándose el 50% de la tasa de dependencia [3].

Más de la mitad de la energía importada en la UE procede de países no pertenecientes a ella, una proporción que en general ha ido en aumento a lo largo de las últimas décadas. Gran parte de la energía primaria importada procede de Rusia, cuyas disputas con los países de tránsito han amenazado en los últimos años con perturbar el suministro de las mismas.

Por este motivo, la UE intenta reducir su dependencia y, por tanto, reforzar su seguridad energética, diversificando las fuentes de energía y los suministradores, reduciendo el consumo energético, mejorando la producción de energía y la cooperación entre los países miembros e invirtiendo en fuentes de energía renovables [4].

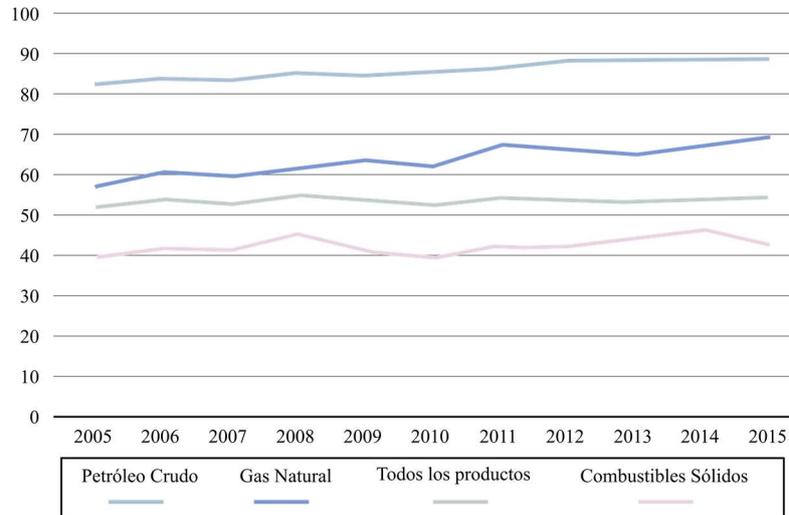


Figura 1-1 Tasa de dependencia energética de la UE 2005-2015 [4]

## 1.2 Creciente preocupación por la contaminación

La quema de combustibles fósiles desencadena la emisión de grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (GEI) que son en gran medida responsables del calentamiento global, representando a la vez un riesgo para la salud de las personas, siendo responsable de algunas enfermedades respiratorias en ciudades donde los niveles de contaminación son más elevados.

En Europa, se han reducido notablemente las emisiones de muchos contaminantes en las últimas décadas. Sin embargo, las concentraciones de contaminantes atmosféricos siguen siendo muy elevadas y todavía persisten problemas en la calidad del aire. Una gran cantidad de la población europea vive en zonas urbanas, donde los niveles de calidad del aire son rebasados por la contaminación causada por los antes mencionados GEI comportando grandes riesgos para la salud. En 2010, varios países superaron uno o varios de sus límites de emisión relativos a cuatro importantes contaminantes atmosféricos [5].

La evolución de los niveles de CO<sub>2</sub> asociados al consumo energético en la UE, teniendo como referencia el nivel de emisiones desde 1990 (Figura 1-2), resulta en un descenso de forma progresiva desde el año 2005, esta reducción ha sido aún más significativa desde finales del año 2007.

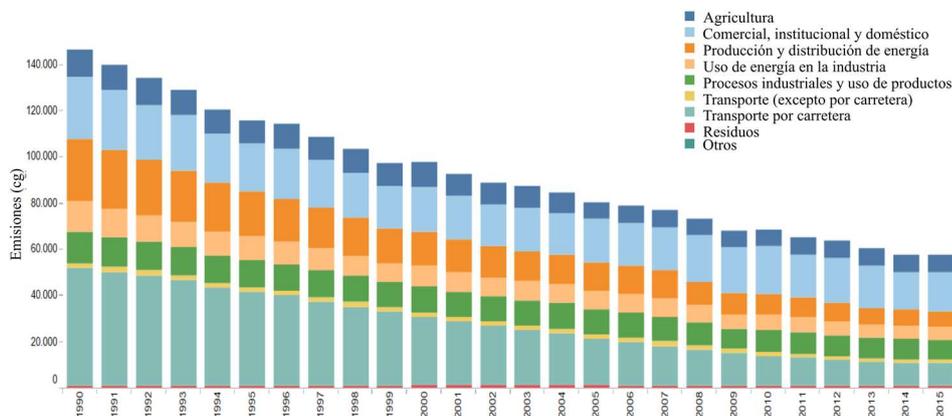


Figura 1-2 Emisiones de la UE-28 entre 1990 y 2015 [6]

Se puede entender parte de esa reducción como resultado de las medidas adoptadas por la UE desde el año 2002 para la reducción de emisiones, influyendo también la reducción de la actividad empresarial provocada por la crisis económica surgida en el año 2007 [7].

Pero todo esto se muestra insuficiente, ya que, según cifras de la Comisión Europea, solamente en Europa mueren cada año de forma prematura unas 400.000 personas a causa de la contaminación atmosférica, agravado adicionalmente por las enfermedades relacionadas con la mala calidad del aire. También se calcula que este fenómeno causa pérdidas por unos 20.000 millones de euros en toda la UE [8].

Las iniciativas para reducir los niveles de emisiones pasan por cumplir el protocolo de Kyoto y luchar contra la inestabilidad de los precios del petróleo por lo que se compite por implementar nuevas y alternativas tecnologías que sustituyan los medios de transporte tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Pese a las nuevas soluciones tecnológicas de los últimos años, los medios de transporte tradicionales todavía dominan el mercado automovilístico y la introducción de estas alternativas tecnológicas es todavía ínfima [9].

Alguna de las posibles soluciones al uso de estos medios de transporte tradicionales, ya puestas en funcionamiento en algunas de las grandes capitales europeas, es el gravamen en forma de impuestos de los vehículos más contaminantes, tal y como ocurre en Londres. En esta ciudad los vehículos diésel y gasolina matriculados antes del año 2006 pagan 10 libras diarias por poder circular por el centro de la ciudad [10]. De forma similar ocurre en Madrid, donde en determinadas ocasiones no se permite la circulación de determinados vehículos por el centro de la ciudad.

En el caso de Holanda se fomenta el uso de la bicicleta por encima de cualquier otro vehículo para reducir los niveles de contaminación, añadiendo grandes impuestos tanto a la gasolina como a la venta de nuevos vehículos.

Países como Francia y Reino Unido se están mostrando contrarios a la proliferación de vehículos diésel [11], ayudados por polémicas de la conocida marca alemana Volkswagen® que se ha visto envuelta en un escándalo de fraude en sus vehículos diésel en el pasado 2015, el denominado ya “*dieselgate*” [12].

Según un informe elaborado por Anfac (Asociación Española de fabricantes de Automóviles y Camiones), las matriculaciones de vehículos híbridos y eléctricos sumaron 6.182 unidades en febrero del presente año (2018), suponiendo un crecimiento del 42,7% respecto al mismo mes del año 2017, de los cuales 5.348 unidades fueron híbridas. En los dos primeros meses del año se matricularon 13.097 unidades eléctricas e híbridas suponiendo un incremento del 47,5% en comparación con el mismo periodo de 2017 [13].

Estas tecnologías, representan un 5,1% del mercado automovilístico actual. Pero si se tiene en cuenta su crecimiento al alza sostenido, parece evidente pensar que dentro de poco tiempo podrían alcanzar altas cuotas de mercado.

### **1.3 Vehículos híbridos**

Un vehículo híbrido es aquel que es movido por un motor eléctrico a través de la energía proveniente de baterías y por un motor de combustión interna.

En general, un vehículo híbrido funciona como uno convencional al que se le ha añadido un motor eléctrico con la misión de ayudar al motor de combustión.

Los vehículos híbridos se clasifican en tres tipos según la configuración que siguen ambos motores: híbridos en serie, híbridos en paralelo e híbridos mixtos.

### 1.3.1 Híbridos en serie

En este tipo de vehículo híbrido, es el motor eléctrico el que impulsa enteramente gracias a la electricidad suministrada por el motor de combustión, que a su vez arrastra un generador eléctrico y almacena la energía en la batería (Figura 1-3). De esta forma la batería actúa como acumulador de la energía sobrante y, cuando está cargada, permite la desconexión temporal del motor de combustión, quedando el vehículo impulsado únicamente de manera eléctrica [14].

Por lo tanto, los flujos de energía característicos en esta configuración son los siguientes:

- El motor de combustión, a través del generador, alimenta al motor eléctrico, pudiendo también cargar las baterías.
- Es la batería la que alimenta al motor eléctrico, pudiendo también gracias a su capacidad de actuar como freno regenerativo, recargar la batería. El freno regenerativo consiste en decelerar el vehículo de un modo no convencional, es decir, invirtiendo el funcionamiento del motor eléctrico haciéndolo funcionar como un generador de electricidad en lugar del tradicional freno basado en el rozamiento de las pastillas contra los discos de freno.

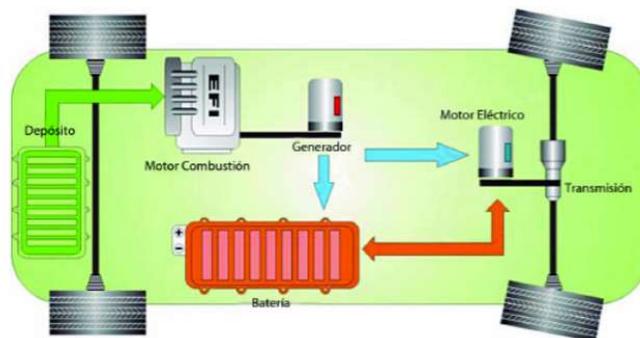


Figura 1-3 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido en serie [15]

### 1.3.2 Híbridos en paralelo

En los vehículos híbridos en paralelo, tanto el motor de combustión como el motor eléctrico trabajan simultáneamente para impulsar las ruedas del vehículo (Figura 1-4). No es necesario el uso de un complejo sistema mecánico de tracción, ya que el motor eléctrico funciona en paralelo con el motor de combustión [14].

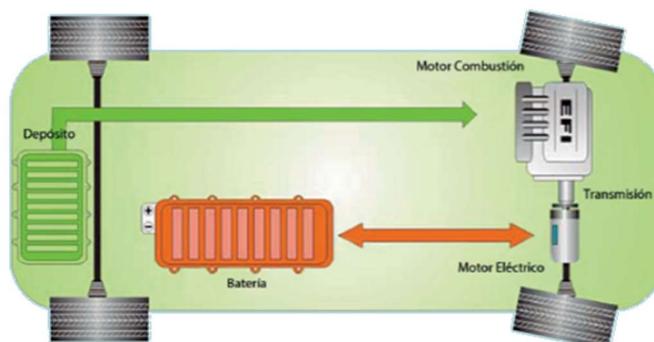


Figura 1-4 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido en paralelo [15]

Se siguen los siguientes flujos energéticos en este tipo de configuraciones:

- El motor de combustión, a través del motor eléctrico, puede también impulsar al vehículo y, a la vez, cargar la batería funcionando éste como un alternador.
- La batería puede alimentarse al motor eléctrico, y con la capacidad de éste como freno regenerativo, recargar la batería.

### 1.3.3 Vehículo híbrido mixto

Esta configuración permite al vehículo la posibilidad de ser propulsado enteramente mediante el motor de combustión, enteramente mediante el motor eléctrico o mediante una combinación de ambos motores (Figura 1-5).

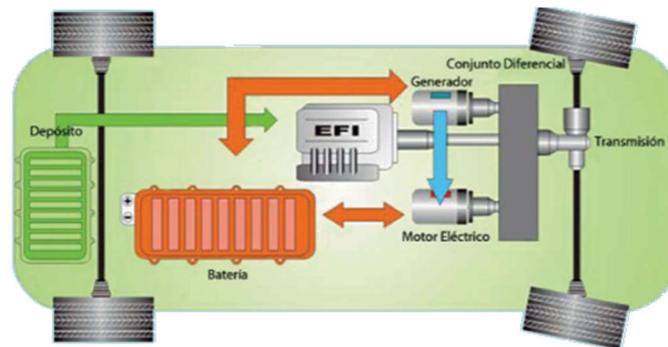


Figura 1-5 Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido mixto [15]

Este concepto es el mismo que el de un vehículo híbrido en serie al que se le ha conectado el motor de combustión directamente a las ruedas motrices. De esta forma tanto el motor de combustión como el generador y el motor eléctrico, están todos conectados a través de un sistema de engranajes diferencial el cual, a su vez, está conectado a la transmisión del vehículo.

El flujo que sigue la energía en este tipo de vehículos es el siguiente:

- El motor de combustión es el que impulsa al vehículo a través del conjunto diferencial.
- El generador, conectado también a este conjunto diferencial, es impulsado por el motor de combustión produciendo de esta forma electricidad. Esta electricidad es usada algunas veces para recargar las baterías y otras para alimentar el motor eléctrico según las necesidades.
- El motor eléctrico es alimentado por las baterías y éste a su vez, es capaz de recargar las baterías en los momentos que funcione a modo de freno regenerativo.
- El motor eléctrico impulsa las ruedas a través del conjunto diferencial [15].

## 1.4 Aplicación de vehículos militares híbridos

Desde la aparición de los primeros vehículos híbridos del mercado, se ha podido ver las numerosas cualidades con las que cuentan, muchas de ellas de aplicación al mundo militar. Así lo ha creído el ejército de EE.UU. que desde hace años ha visto su aplicación a los vehículos militares dentro de sus fuerzas armadas, pues algunas de las características que los hacen de utilidad son el ligero peso de los motores eléctricos, el reducido ruido que generan, el gran poder de tracción con el cuentan y la ventaja logística y económica que proporcionan al contar con un reducido consumo.

## 1.5 Objetivos

En este Trabajo de Fin de Grado se plantearán como objetivos la simulación y el análisis de las prestaciones de un vehículo militar híbrido en serie. Para ello, inicialmente se estudiarán los componentes necesarios para la adaptación de un vehículo militar real a un sistema híbrido en serie. A partir de estos componentes, se elaborará un modelo general del vehículo que permita dar a conocer los parámetros más característicos del vehículo: autonomía, potencia, consumo, estado de carga de las baterías todo según el ciclo de conducción que realiza.

Este modelo será válido para distintas configuraciones posibles de las que se elegirá la más óptima para obtener las prestaciones más próximas a las del vehículo original.

Por último, con los datos obtenidos de la simulación y los calculados en base al motor implementado en el vehículo híbrido, se analizarán de forma conjunta obteniendo las prestaciones que permitirán comparar el vehículo híbrido con su original.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Tendencia actual del mercado automovilístico

En este apartado se presentarán las tecnologías híbridas en serie que están en uso en la actualidad, así como la aplicación de este tipo de tecnologías en vehículos militares.

#### 2.1.1 Vehículos eléctricos de autonomía extendida o híbridos en serie

Este tipo de vehículos surgieron para solventar el inconveniente de la baja autonomía en los actuales vehículos eléctricos. Esta configuración cuenta con dos motores, uno eléctrico y otro de combustión, de forma que únicamente es el motor eléctrico el que propulsa el vehículo, mientras que el motor de combustión (también conocido como “*range extender*”) se usa exclusivamente para generar energía para recargar la batería o alimentar al motor eléctrico y ampliar así su autonomía.

Al usarse únicamente el motor de combustión como fuente energética, éste funciona a régimen constante alcanzando un rendimiento mayor que los motores utilizados para la propulsión de vehículos. Una ventaja de estos vehículos frente a los vehículos híbridos enchufables (en paralelo) es que la potencia total del coche está siempre disponible y no únicamente cuando se pone en funcionamiento el motor de combustión.

Uno de los referentes en cuanto a vehículos híbridos en serie o vehículos eléctricos de autonomía extendida, llamados indiferentemente para referirse al mismo tipo de vehículo, es el Chevrolet Volt (Figura 2-1) o Opel Ampera, siendo técnicamente el mismo automóvil. Se trata de un vehículo que consigue una autonomía de hasta 61 km únicamente en modo eléctrico y de hasta 610 km con carga completa y tanque de combustible lleno. Para ello, cuenta con un motor de combustión de gasolina de 1,4 L y 53 kW de potencia, que sólo funciona como generador y no mueve el vehículo de forma directa, y un motor eléctrico de tracción de 111 kW de potencia [16].



Figura 2-1 Imagen de un Chevrolet Volt [16]

Otro modelo innovador de vehículo híbrido en serie que ha destacado en los últimos años es el BMW i3 REX dado su reducido tamaño y buenas prestaciones. Este vehículo cuenta con un motor eléctrico de 125 ó 135 kW (según la versión) que consigue autonomías eléctricas de 235 y 225 km, respectivamente. Esta versión con apellido “*REX*” (“*Range Extender*”), se caracteriza por montar un motor de gasolina de dos cilindros y 647 cm<sup>3</sup> que puede aumentar la autonomía del vehículo hasta los 340 km [17].



Figura 2-2 BMW i3 [18]

Otro vehículo de interés, es el Workhorse W15 (Figura 2-2). Es un “*pick up*” eléctrico de autonomía extendida aún en desarrollo por la marca de automóviles Workhorse. Cuenta con dos motores eléctricos independientes que proporcionan un total de 460 CV acoplados a cada uno de los ejes del vehículo, usa baterías Panasonic 18650 de 40 kWh (las mismas usadas en el Tesla Modelo S), que le proporciona una autonomía en modo eléctrico de 128 km y una autonomía total de 500 km.

Su salida a mercado está programada para finales de este año (2018) siendo pionero dentro de los “*pick up*” eléctricos de autonomía extendida [19].



Figura 2-3 Chasis y elementos propulsores del Workhorse W15 [19]

### 2.1.2 Vehículos militares híbridos

El ejército de EE.UU. ha sido pionero en el desarrollo de este tipo de vehículos. Un ejemplo de este tipo de vehículo es el HMMWV (“*High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle*”) modelo XM1124 (Figura 2-4) híbrido-eléctrico, que es fundamentalmente un vehículo híbrido en serie que cuenta con un motor diésel combinado con un generador eléctrico y dos motores eléctricos que dan tracción al eje delantero y al eje trasero respectivamente.

Este vehículo cuenta con baterías de Litio-Ion de 18,6 kWh a 288 V nominales. Además, este vehículo podría proporcionar hasta 30 kW de potencia a fuentes externas [20].



Figura 2-4 HMMWV del ejército de EE. UU [21].

Otro ejemplo es el prototipo de vehículo militar híbrido CERV (*“Clandestine Extended Range Vehicle”*). Se trata de un vehículo ligero, híbrido diesel-eléctrico que alcanza los 130 km/h y sube pendientes de hasta el 60%. Está diseñado para realizar misiones de reconocimiento, inteligencia, rescate y operar con fuerzas de operaciones especiales gracias a su gran discreción [22].



Figura 2-5 Prototipo de CERV del ejército de EE.UU. [22].

## 2.2 URO VAMTAC

El VAMTAC (Vehículo de Alta Movilidad Táctico) es un vehículo militar todoterreno de tracción a las cuatro ruedas con una gran capacidad de carga (1,5 toneladas) y con posibilidad de montar diferentes equipos y sistemas de armas. Fabricado por la empresa UROVESA de Santiago de Compostela, y con un diseño similar al HMMWV *“Hummer”* norteamericano. El VAMTAC posee unas excepcionales características de movilidad, versatilidad, fiabilidad, capacidad de carga y seguridad.

Está propulsado por un motor turbodiésel Steyr de 6 cilindros en línea con 188 CV de potencia con una transmisión automática Allison de 4 velocidades y una marcha atrás.

Existen tres versiones básicas según su configuración exterior:

- Con cabina: capacidad para dos o cuatro personas y zona de carga de uso general para entre 1500 kg y 2000 kg; también válida para transporte de personal aumentando su capacidad hasta los diez pasajeros incluyendo el conductor. También cabe la posibilidad de montaje de

numerosos equipos (grúa, pala quitanieves, hoja empujadora, etc.) o diversos sistemas de armas (lanzadores de misiles Tow o Mistral, morteros de hasta 81 mm, etc.).

- “*Pick-up*”: versión similar a la anterior, con techo y, de forma opcional, puertas de lona.
- Cerrada: cabina con cuatro plazas y portón o caja cerrada trasera; se puede utilizar como ambulancia, para transporte de personal o para alojar diversas cargas como munición. Aparte, esta configuración puede ser dotada de diferentes tipos de armas (ametralladoras de todos los calibres, cañones de 20, 25 ó 30 mm, lanzagranadas automático de 40 mm, etc.)

A parte se diseñó un modelo blindado del VAMTAC S3 (Figura 2-6) para poder corresponder las necesidades de los vehículos empleados en las denominadas operaciones de paz o de mantenimiento de la paz (Irak, Afganistán, Líbano, etc.), ya que se han producido y se siguen produciendo ataques con minas y cargas explosivas improvisadas. Este blindaje supuso un aumento de peso lo que conllevó un aumento de la potencia motriz. [23]



Figura 2-6 Imagen de un URO VAMTAC S3 [24]

### 3 PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En este apartado se explicará la dinámica del vehículo, es decir, las fuerzas actuantes sobre este (tracción, resistencia rodadura, aerodinámica, etc.), así como los diferentes componentes necesarios para el diseño de un vehículo híbrido en serie, tales como el motor eléctrico, las baterías, el motor de combustión o el generador. Seleccionando las mejores opciones para el posterior modelado del vehículo militar híbrido elegido.

#### 3.1 Dinámica

El comportamiento dinámico de un vehículo es una parte común para todas las clases de automóviles e importante para entender que fuerzas hay que vencer para así poder general el movimiento deseado. A continuación, se desarrollarán las fuerzas que intervienen en el movimiento de un vehículo.

##### 3.1.1 Fuerza de tracción

Como se muestra en la Figura 3-1, son numerosas las fuerzas que han de vencerse para conseguir el movimiento del vehículo. Principalmente son la fuerza de resistencia a la rodadura ( $F_{rr}$ ), la fuerza de resistencia aerodinámica ( $F_{ad}$ ), la componente horizontal del peso del vehículo cuando el terreno tiene una determinada inclinación ( $F_{hc}$ ) y la fuerza necesaria para que el vehículo acelere o decelere según sea necesario ( $F_{ta}$ ). La fuerza de tracción ( $F_{te}$ ) supone la suma de todas las anteriores y es la necesaria para impulsar el vehículo en función de varios parámetros como son la masa del vehículo ( $m$ ), la velocidad ( $v$ ) y el ángulo de la pendiente ( $\psi$ ) sobre la que se mueve el vehículo en cuestión, entre otros parámetros. Esta ecuación es la que define la dinámica de cualquier vehículo, por lo que será un punto de partida para el modelado del vehículo híbrido.

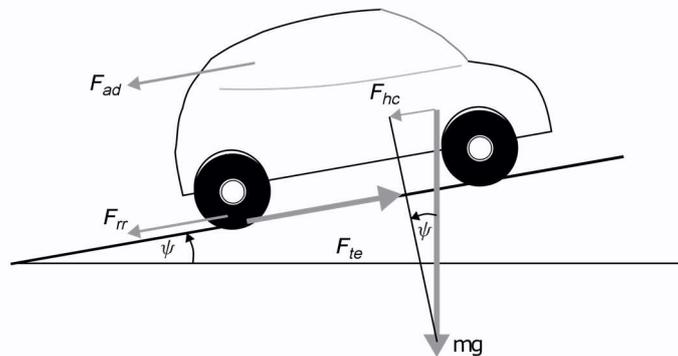


Figura 3-1 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento [25]

Por lo tanto, la fuerza de tracción que se debe de modelar debe de ser capaz de vencer todas estas fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo. Siendo su ecuación:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Como lo que interesa evaluar es la potencia requerida por las baterías y por lo tanto por el motor eléctrico, se ha de modelar el bloque de dinámica sobre la potencia requerida en cada instante de tiempo por el vehículo. Para ello, se debe expresar la ecuación que relaciona la potencia con la fuerza de tracción:

$$P_{te} = F_{te} \cdot v \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde  $v$  es la velocidad del vehículo en m/s y que expresado en función del resto de fuerzas involucradas se puede representar de la siguiente manera:

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

Tras analizar las ecuaciones que rigen el movimiento del vehículo, se analizarán las ecuaciones que modelan cada una de las componentes de la ecuación general de la dinámica (Ecuación 3-3).

### 3.1.2 Fuerza de resistencia a la rodadura

Esta fuerza es la producida por el neumático y la superficie sobre la que se desliza. Es causada por la fuerza vertical a la que está sometido el neumático en su movimiento, que produce una deformación radial sobre el mismo.

La distribución de presiones no es simétrica respecto del eje Y (Figura 3-2), de forma que, queda el centro de presiones y la fuerza resultante desplazados en el eje X en la dirección del avance del vehículo, produciendo un momento que se opone al giro de la rueda. Este momento se conoce como el momento de resistencia a la rodadura que origina esta fuerza anteriormente descrita [26].

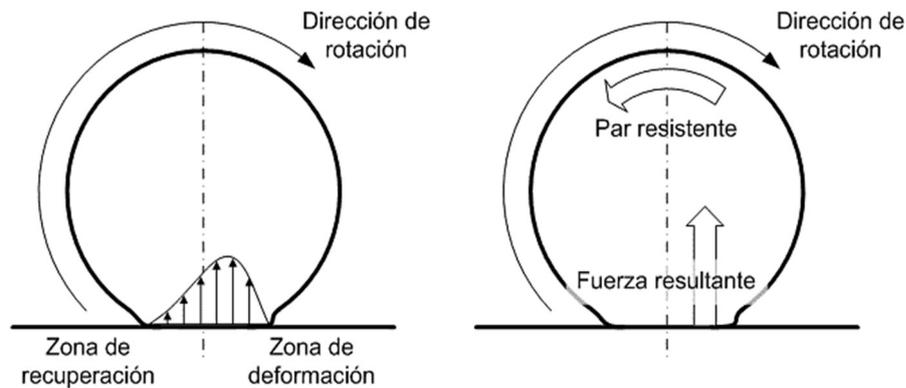


Figura 3-2 Distribución de presiones y fuerza resultante de resistencia a la rodadura

Es común aproximar esta fuerza,  $F_{rr}$ , como constante y directamente proporcional a la componente del peso del vehículo de la siguiente forma:

$$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Siendo  $\mu_{rr}$  el coeficiente de resistencia a la rodadura, que está afectado por el efecto del tipo de suelo en el que se mueve el vehículo y por la presión de inflado del neumático.

En la siguiente tabla (Tabla 3-1) se muestran los valores más típicos para este coeficiente según el tipo de suelo:

COEFICIENTES TÍPICOS 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 3-1 Coeficientes de resistencia a la rodadura [26]

### 3.1.3 Fuerza de resistencia aerodinámica

Es la producida por el rozamiento del aire frente a la superficie en movimiento del vehículo, por lo tanto, es directamente proporcional a la superficie frontal del mismo, teniendo gran importancia también la forma aerodinámica de su carrocería que definirá el coeficiente aerodinámico del mismo [26].

La ecuación que aproxima la resistencia generada por el flujo de aire sobre el vehículo es la siguiente:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 \quad \text{Ecuación 3-5}$$

De forma que:

- $\rho$  la densidad del aire que varía con la temperatura, la humedad y la altitud. Sin embargo, su valor en condiciones estándar es de 1,23 kg/m<sup>3</sup> y será el que se considere en las simulaciones.
- $A_f$  es el área de contacto frontal con el flujo de aire del vehículo, suele tomar valores entre 0,5 m<sup>2</sup> y 2,8 m<sup>2</sup> según el tamaño y forma del vehículo.
- $C_d$  es una constante adimensional que define el perfil del vehículo. Caracteriza la resistencia aerodinámica que representa el vehículo en movimiento frente al flujo de aire. Puede variar desde 1,2 para una persona erguida en una bicicleta hasta 0,2 para un automóvil moderno con una buena aerodinámica.
- $v$  es la velocidad instantánea del vehículo.

Como simplificación en el cálculo de esta resistencia no se considerará la acción del viento dado la complejidad de obtención de esta información para cada instante de tiempo.

### 3.1.4 Fuerza para superar una pendiente

Para superar una pendiente, el vehículo tendrá que vencer la componente horizontal del peso del mismo ( $F_{hc}$ ) causada por la inclinación del terreno ( $\varphi$ ). Por trigonometría la ecuación quedaría [27]:

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\varphi) \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Cuando el vehículo ascienda por una pendiente, esta fuerza siempre se opondrá al movimiento, mientras que si el vehículo desciende estará a favor del movimiento.

### 3.1.5 Fuerza de aceleración lineal

Cada vez que el vehículo cambie su velocidad, es decir, acelere, esto será debido a la acción de una fuerza, la fuerza de aceleración lineal, tal como dice la segunda ley de Newton:

$$F_{la} = m \cdot a \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Además, es necesario considerar el momento de inercia de los elementos rotacionales que componen el conjunto; se ha decidido despreciar la fuerza de inercia de estos elementos en las ecuaciones. Para aproximarla, se considerará aumentar la masa del vehículo un 5% aplicada a la segunda ley de Newton, quedando la ecuación [25]:

$$F_{la} = 1,05 \cdot m \cdot a \quad \text{Ecuación 3-8}$$

### 3.1.6 Potencia eléctrica necesaria

Para el cálculo de la potencia que necesita el vehículo hay que tener en cuenta el sumatorio final de las fuerzas que actúan sobre él y la velocidad que tiene en cada momento. De forma que su cálculo quedaría expresado con la siguiente ecuación:

$$P_{te} = (\mu_{rr} \cdot m \cdot a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin(\varphi) + 1,05 \cdot m \cdot a) \cdot v \quad \text{Ecuación 3-9}$$

Como entre el motor eléctrico y el eje hay diferentes velocidades de giro, es necesario tener en cuenta la eficiencia de la caja de cambios o reductora, puesto que cuando se trata de motores eléctricos lo habitual es trabajar con una única relación de transmisión y, por lo tanto, se puede considerar constante esta eficiencia ( $Gear_{effic}$ ).

Al tratarse de un sistema de engranajes sencillo, se podrá considerar la eficiencia del mismo del 95%, siendo posible modificarlo para cualquier otro valor.

Puesto que hay que considerar las situaciones en las que el vehículo esté acelerando, y por lo tanto necesite potencia, y que el vehículo frene suponiendo otra potencia que aprovechará el freno regenerativo, también hay que considerar la eficiencia de la reductora en ambos casos, ya que trabajará de una forma diferente.

Cuando está actuando el freno regenerativo ( $P_{te} < 0$ ), será necesario usar una corrección definida como coeficiente de regeneración ( $Reg_{ratio}$ ) que reduce la potencia obtenida de la frenada en ese porcentaje, recuperando solo una parte de la energía disipada durante el frenado [25].

Siempre y cuando haya movimiento, es decir, la velocidad angular sea mayor que cero, la potencia se calculará de la siguiente manera:

- a) Si la potencia mecánica de tracción es mayor que cero, la potencia de salida del motor será ésta dividida de la eficiencia de la reducción:

$$P_{mot_{out}} = P_{te} / Gear_{effic} \quad \text{Ecuación 3-10}$$

- b) Si la potencia mecánica de tracción es igual o menor que cero, la potencia de salida del motor será la potencia regenerada por la eficiencia de la reductora:

$$P_{te} = P_{te} \cdot Reg_{ratio} \quad \text{Ecuación 3-11}$$

$$P_{mot_{out}} = P_{te} \cdot Gear_{effic} \quad \text{Ecuación 3-12}$$

- c) El par generado por el conjunto de los dos motores eléctricos será la potencia de salida ellos entre la velocidad angular de giro del motor:

$$Par = P_{mot_{out}} / \Omega$$

**Ecuación 3-13**

### 3.1.7 Selección del vehículo

Dentro del abanico de posibilidades de los vehículos militares que usan las FF.AA. españolas, se ha elegido implantar el modelo de vehículo híbrido en serie en un URO VAMTAC dado su amplia versatilidad de operación que incluye desde su uso en distintos Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado como la Policía Nacional, servicios sanitarios, el Ejército de Tierra, la UME (Unidad Militar de Emergencias) o Infantería de Marina.

Para el modelado, se ha optado por elegir el modelo VAMTAC S3 que emplea tanto el Ejército de Tierra como el Ejército del aire. [23].

## 3.2 Motor eléctrico

Uno de los componentes más importantes en el diseño de un vehículo híbrido es el motor eléctrico. Este componente va a ser el encargado de dar tracción al vehículo en todo momento, por lo que su elección y diseño tiene un gran peso para la movilidad y las prestaciones del vehículo final.

### 3.2.1 Tipos de motores eléctricos más usados en automoción

En este apartado se definirán los motores eléctricos más utilizados en vehículos eléctricos e híbridos antes de proceder a la selección del más óptimo para el vehículo.

#### 3.2.1.1 Motor de inducción

En este tipo de motores de corriente alterna, la corriente eléctrica del rotor es inducida por el campo electromagnético de la bobina del estator que se compone de un devanado trifásico. El campo magnético creado por un bobinado trifásico alimentado por corriente alterna es de valor constante pero giratorio y a la velocidad de sincronismo.

Este motor también recibe el nombre de motor asíncrono ya que la velocidad de giro del rotor es inferior a la velocidad de giro del campo magnético (velocidad de sincronismo) del estator debido al rozamiento producido en los cojinetes, el rozamiento con el aire y la carga producida en el eje del rotor. Esta reducción de velocidad se mide en porcentaje y recibe el nombre de deslizamiento.

Estos motores giran a una velocidad fija algo menor a la de sincronismo es por esto que estos motores necesitan arrancadores estáticos que puedan regular la velocidad actuando sobre la frecuencia de alimentación del motor, por este motivo reciben el nombre de convertidores de frecuencia que pueden regular la velocidad, amortiguar el arranque e incluso frenarlo [28].

Este tipo de motores se puede clasificar en motores de jaula de ardilla o motores de rotor devanado según la configuración del rotor.

#### 3.2.1.2 Motor síncrono

Estos motores de corriente alterna tienen como característica principal que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que los alimentan.

Estos motores también necesitan de un campo magnético giratorio producido en el estator, pero en este caso el rotor se compone de electroimanes o imanes permanentes que giran síncronamente con el campo del estator.

Existen por lo tanto dos tipos de motores síncronos atendiendo a la configuración de su rotor, los motores síncronos de imanes permanentes o sin escobillas y los motores síncronos de rotor bobinado.

La velocidad de giro de estos motores es fija y dependerá de la frecuencia de la red y del número de pares de polos que componen el rotor [28].

### 3.2.1.3 Motor de corriente continua sin escobillas o “brushless”

En estos motores de corriente continua la corriente pasa por el estator generando un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes del rotor, apareciendo una fuerza magnética que hace girar al rotor y, por lo tanto, al eje del motor.

En estos motores al no haber ni escobillas, ni colector, ni delgas, será necesario un variador electrónico que controlará el giro del motor. El variador se encarga de ver en qué posición se encuentra el rotor y de suministrar la corriente adecuada para provocar su movimiento de rotación. Por este motivo los variadores electrónicos empleados son más complicados que los empleados en los motores con escobillas (“brushed”) [29].

### 3.2.1.4 Motor eléctrico “In-Wheel” o “hub wheel”

Este tipo de motores va montado sobre la propia llanta del vehículo (mínima de 16”) integrando a la vez la suspensión y los frenos, en este caso eléctricos. Pueden ser montados tanto motores con escobillas como sin escobillas, sin embargo, los motores sin escobillas han demostrado ser más eficientes y duraderos pese tener un mayor coste.

Estos motores pueden tener tres configuraciones distintas: la considerada menos práctica es la de motor de flujo axial donde los devanados del estator están situados normalmente entre los imanes. Las otras dos configuraciones son ambas radiales con los imanes montados sobre el propio rotor; en uno, el motor de rotor exterior, el rotor está alrededor del estator y gira en torno a él (Figura 3-3). En el otro, el motor de rotor interior, el rotor se sitúa dentro del estator, como en un motor convencional. Su aplicación en vehículos eléctricos o híbridos todavía están en desarrollo y tienen un elevado coste, su uso se reserva, a día de hoy, a bicicletas eléctricas o ciclomotores, siendo más comunes en Asia [30].



Figura 3-3 Configuración de un motor de rotor exterior intra-rueda

Estos motores tienen una gran ventaja espacial ahorrando el espacio frente tanto a motores eléctricos tradicionales como a motores de combustión. Sin embargo, aumentan el peso de las ruedas aumentando la masa no suspendida del vehículo afectando negativamente al comportamiento dinámico del mismo.

### 3.2.2 Eficiencia de un motor eléctrico

Para poder modelar el motor eléctrico es necesario poder calcular las pérdidas de potencia que supone su funcionamiento. Para los motores eléctricos, las pérdidas de potencia se distribuyen de la siguiente forma [25]:

- Pérdidas debidas a los conductores de cobre  
Se Debe a la resistencia interna de los elementos de cobre, es decir, cables y escobillas del motor. Esta resistencia interna es la culpable de que se disipe energía eléctrica en forma de calor.

Estas pérdidas siguen la siguiente expresión:

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{Ecuación 3-14}$$

La corriente es proporcional al par (T) que el motor proporciona:

$$Pérdidas_{cobre} = k_c \cdot T \quad \text{Ecuación 3-15}$$

Siendo  $k_c$  una constante que depende de la resistencia interna de las escobillas y del bobinado, así como del flujo magnético.

- Pérdidas en el entrehierro

Son debidas a las pérdidas por histéresis, que dependen de la facilidad de magnetización que posea el hierro, y las debidas a la corriente eléctrica inducida por los cambios del campo electromagnético (corrientes de Foucault).

Todas estas pérdidas dependen de forma proporcional de la frecuencia con la que el campo magnético cambia, de forma que a una mayor frecuencia aumentan las pérdidas por histéresis y las pérdidas por las corrientes inducidas de Foucault. De manera que la ecuación de pérdidas en el entrehierro depende de la velocidad de giro del rotor:

$$Pérdidas_{entrehierro} = k_i \cdot \omega \quad \text{Ecuación 3-16}$$

Siendo  $k_i$  un valor que se tomará como constante (puede variar por la fuerza del campo magnético y otros factores) para las simulaciones.

- Pérdidas por fricción y ventilación

Producidas por los rozamientos de las escobillas y rodamientos internos del motor, se pueden considerar prácticamente constantes. Además, hay que tener en cuenta la resistencia que genera el aire al rotor (pérdidas por ventilación), aumentan si el motor está refrigerado con un ventilador. Esta resistencia, depende del cuadrado de la velocidad de giro del rotor.

$$Pérdidas_{fricción} = T_f \cdot \omega \quad \text{Ecuación 3-17}$$

$$Pérdidas_{ventilación} = k_\omega \cdot \omega^3 \quad \text{Ecuación 3-18}$$

Siendo  $T_f$  el par de fricción y  $k_\omega$  una constante que depende del tamaño y forma del rotor y de si el motor posee un ventilador.

- Pérdidas constantes

Se producen incluso cuando el motor está completamente en estacionario. Son debidas a los circuitos electrónicos de la unidad de control. Se representan con la letra “C”.

Por lo tanto, las pérdidas totales serán la suma de todas las pérdidas descritas anteriormente [31]:

$$Pérdidas_{totales} = k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + k_\omega \cdot \omega^3 + C \quad \text{Ecuación 3-19}$$

La eficiencia de cualquier máquina eléctrica es el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada, por lo tanto, la eficiencia sería:

$$\eta_m = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{P_{motout}}{P_{motout} + \text{pérdidas}} \quad \text{Ecuación 3-20}$$

$$\eta_m = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + k_c \cdot T^2 + k_i \cdot \omega + k_\omega \cdot \omega^3 + C} \quad \text{Ecuación 3-21}$$

Dependiendo de si se considera la potencia mecánica positiva (demandada) o si la potencia mecánica es negativa (regenerada) se calculará la potencia eléctrica de la siguiente manera [25]:

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{mecánica}}{\eta_m} \text{ si } P_{mecánica} \geq 0 \quad \text{Ecuación 3-22}$$

$$P_{eléctrica} = P_{mecánica} \cdot \eta_m \text{ si } P_{mecánica} < 0 \quad \text{Ecuación 3-23}$$

### 3.2.3 Selección del motor eléctrico

El vehículo original, cuenta con un motor turbo-diésel Steyr M16 TCA de 6 cilindros y 3200 cm<sup>3</sup> de cilindrada que consigue una potencia máxima de 188 CV a 3800 rpm y un par máximo de 410 Nm a 1800 rpm con lo que consigue una velocidad máxima de 135 km/h.

Una de las ventajas que aporta trabajar con motores eléctricos el reducido volumen que necesitan, por ello se ha optado por conseguir la tracción total en las cuatro ruedas mediante el empleo de dos motores eléctricos de idénticas características, evitando así montar dos largos árboles de transmisión a cada eje, pudiendo aprovechar así el espacio que estos ocupan para el montaje de las baterías.

Para elegir el motor que necesita el vehículo es necesario ver la potencia máxima que necesita para cumplir con sus requisitos de velocidad máxima.

Para realizar este cálculo se ha considerado el vehículo a plena carga, 6300 kg, en llano y con un coeficiente de rodadura propio de una calzada en buen estado. Como se pudo observar en la Ecuación 3-9, se puede obtener la potencia que el motor necesita en dicha situación.

$$P_{te} = \left( 0,5 \cdot 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,1 m^2 \cdot 0,57 \cdot (37,5 m/s)^2 + 6300 kg \cdot 9,81 m/s^2 \cdot 0,015 \right) \cdot 37,5 m/s$$

$$P_{te} = 93002,44 W$$

Teniendo en cuenta la eficiencia de la reductora según la Ecuación 3-10:

$$P_{mot_{out}} = 93002,44 / 0,95 = 97897,30 W$$

Por lo tanto, se ha optado por implementar dos motores de 50 kW, uno por eje, con lo que se consigue la potencia necesaria para alcanzar la velocidad máxima.

El motor elegido es el motor 1PV5135-4WS18 de Siemens<sup>®</sup>, es un motor de inducción de corriente alterna que trabaja a 300 V, sus características se relacionan en el Anexo I: motor siemens<sup>®</sup> 1PV5135-4WS18.

Es necesario comprobar que este motor de inducción sigue el modelo general calculado en el punto 4.3.1. Para ello hay que definir las constantes propias de un motor de inducción de alta velocidad con las características del elegido [25]:

- $k_c$ : 0,3
- $k_i$ : 0,01
- $C$ : 600 W

Como  $k_\omega$  depende de la forma, tamaño y ventilación del motor en cuestión, no es valor fácilmente estimable para una amplia gama de motores de inducción, por lo tanto, se ha calculado la eficiencia del motor en régimen de carga nominal mediante una hoja de cálculo, aproximando la curva a un polinomio.

En la siguiente figura (Figura 3-4) se muestra dicha aproximación y el ajuste realizado:

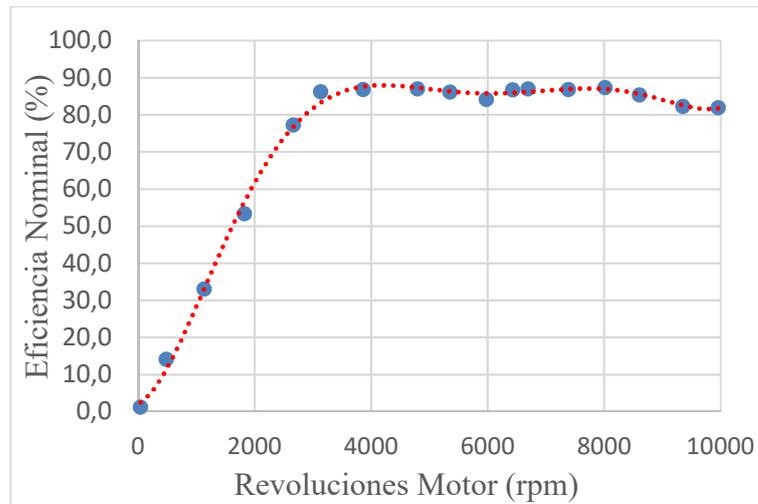


Figura 3-4 Aproximación polinómica de la eficiencia del motor 1PV5135-4WS18 de Siemens

Para calcular  $k_{\omega}$ , basta con sacar un régimen de giro de la gráfica y su correspondiente par nominal (Anexo I: motor siemens® 1PV5135-4WS18). También hay que calcular la potencia eléctrica que consume el motor en estas circunstancias nominales.

$$P_{elec\ nom} = 300\ V \cdot 193\ A = 57,9\ kW$$

Con los datos obtenidos de las gráficas se puede calcular la potencia nominal que proporciona el motor y con la diferencia entre las dos se obtiene las pérdidas para ese régimen de giro y par:

$$P_{mec\ nom} = 4792,99\ rpm \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 100,32\ Nm = 50,35\ kW$$

$$Pérdidas_{totales} = 57,9\ kW - 50,35\ kW = 7,55\ kW$$

Con la Ecuación 3-19 se puede despejar el valor del coeficiente  $k_{\omega}$ :

$$7550\ W = (100,32\ Nm)^2 \cdot 0,3 + 4792,99 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot 0,01 + 600\ W + k_{\omega} \cdot \left(4792,99 \cdot \frac{\pi}{30}\right)^3$$

$$k_{\omega} = 2,72 \cdot 10^{-5}$$

### 3.2.4 Ensamblaje de los motores eléctricos

Por último, queda elegir la posición de ambos motores dentro de la estructura del vehículo. Para ello se va a modelar el motor en el programa de CAD Siemens® NX y acoplar sobre el diseño 3D del vehículo (obtenido de una librería CAD de uso libre).

El motor tiene unas dimensiones de  $425\ mm \times 245\ mm \times 245\ mm$  y un peso de 90 kg. Se ha optado por instalar los motores de forma transversal en cada eje facilitando la reducción del motor tal y como se puede observar en la Figura 3-5:

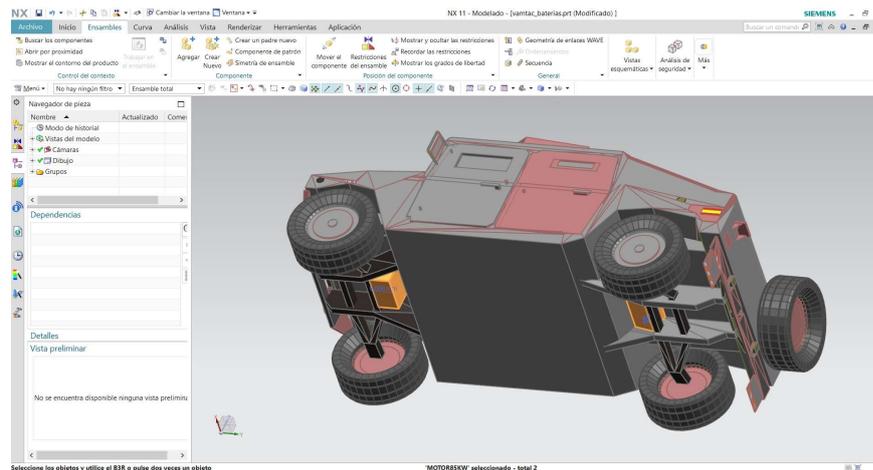


Figura 3-5 Motores sobre el modelo CAD del VAMTAC S3

### 3.3 Baterías de tracción

Al igual que para un vehículo eléctrico las baterías son un componente importante en el diseño de un vehículo híbrido. Sirven para almacenar energía eléctrica gracias a las reacciones electroquímicas de oxidación y reducción que se producen en su interior.

Una batería no es más que un dispositivo que almacena energía de forma electroquímica, siendo el medio más ampliamente utilizado como fuente de almacenaje de energía en una gran variedad de aplicaciones.

Existen dos tipos básicos de baterías:

- **Baterías primarias:** la reacción electroquímica que tiene lugar es irreversible, es decir, una vez la batería se ha descargado por completo no puede volver a cargarse, como ocurre en las pilas tradicionales.
- **Baterías secundarias:** La reacción electroquímica que tiene lugar es reversible, es decir, una vez que se ha descargado por completo la batería puede volver a ser cargada si se le inyecta corriente continua desde una fuente externa.

Como para la gran mayoría de aplicaciones en las cuales se usa una batería integrada no intercambiable o baterías de gran tamaño y capacidad, es preferible optar por el uso de baterías secundarias para la propulsión de vehículos eléctricos o híbridos, por ello el vehículo usará celdas de baterías secundarias como medio de almacenaje energético [32].

#### 3.3.1 Tipos de baterías

Existen diversos tipos de baterías según los materiales que usen para realizar la reacción electroquímica que tiene lugar en su interior, las más utilizadas son las que se expresan a continuación.

##### 3.3.1.1 Batería de Plomo-Ácido

Pese a ser la batería que tiene la menor densidad de energía con respecto a su peso y volumen, es el tipo de batería más común por su buena relación de desempeño y coste. Emplean óxido de plomo como electrodo positivo y plomo metálico como electrodo negativo, siendo el ácido sulfúrico el electrolito utilizado [33].

Tienen una resistencia interna muy pequeña, en torno a  $0,022 \Omega$ , por celda y capacidades próximas a 1 Ah.

Existen varias versiones para este tipo de batería:

- La versión “*shallow-cycle*” o de ciclo corto ampliamente utilizada en automóviles, ya que necesitan un rápida y fuerte suministro de energía para el arranque del motor.
- La versión “*deep-cycle*” o de ciclo profundo, es más utilizada ya que está diseñada para ciclos de carga y descarga de forma repetida.
- La versión sellada “*gel-cell*”, que utilizan un gel anti-derrames para envolver el electrolito, está pensada para aplicaciones en las que la batería pueda ser montada sobre un lado o cambiar de posición como ocurre en la aviación militar.

### 3.3.1.2 Batería de Níquel-Cadmio

Se trata de una batería alcalina pues utiliza un electrolito de solución acuosa de hidróxido potásico. La resistencia interna de este modelo es mayor que en las de Plomo-Ácido estando en torno a los  $0,06\Omega$  por celda con capacidades de 1 Ah.

Se caracterizan por tener sus celdas selladas, la mitad del peso y ser más tolerantes a altas temperaturas que las baterías de Plomo-Ácido convencionales. Tienen muy bajas tasas de autodescarga, pero cuentan con “efecto memoria” que acelera su proceso de descarga.

Debido a regulaciones ambientales, han sido reemplazadas por baterías de Níquel-Hidruro de metal e Ion-Litio en ordenadores portátiles y otros tipos de tecnología electrónica de elevado precio [33].

### 3.3.1.3 Batería de Níquel-Hidruro Metálico

Su principal característica es que usan una aleación en su electrodo negativo encargada de almacenar el hidrógeno en estado gaseoso. Este hidrógeno es posteriormente absorbido como hidruro quedando almacenado a bajas presiones. Estas aleaciones suelen contener titanio y son empleadas en vehículos que usan hidrógeno como combustible, ya que también cuentan con una capacidad de almacenaje de energía elevada.

Al usar un ánodo de hidruro metálico evita los problemas medioambientales de las baterías de Níquel-Cadmio. Sin embargo, no es capaz de entregar altos picos de potencia y tiene un elevado grado de autodescarga al mismo modo que es peligrosa si se sobrecarga. Pese a ello el “efecto memoria” en este tipo de baterías es casi despreciable [34].

Su uso incluye algunos vehículos eléctricos o híbridos como el Honda EV Plus o el Toyota Prius e incluso medios de transporte públicos como el tranvía de piso bajo Alstom Citadis de la ciudad de Niza (Francia).

### 3.3.1.4 Batería de Ion-Litio

El litio es un gran oxidante ya que, al tener un elevado potencial estándar, 3,045 V, se reduce fácilmente esto añadido a su menor peso molecular hace que sea uno de los metales alcalinos más utilizados como electrodos en baterías.

Estas baterías tienen una elevada tensión (3,6V) en comparación con las de otras clases implicando por ejemplo que una batería de Ion-Litio puede sustituir a tres baterías en serie de Níquel-Cadmio o Níquel-Hidruro metálico.

Pese a tener una baja tasa de autodescarga, sufren una gran degradación y sensibilidad a elevadas temperaturas pudiendo incluso causar su explosión.

Son de gran uso en aparatos electrónicos como teléfonos móviles, ordenadores portátiles y cámaras de vídeo dado a su elevado rendimiento y bajo peso [33].

### 3.3.1.5 Batería de Polímero-Litio

Se trata de una batería de litio caracterizada por usar como electrolito un polímero sólido. Estas baterías tienen densidades de energía entre 5 y 12 veces superiores a las de Níquel-Cadmio o Níquel-Hidruro metálico para un mismo peso. Para mismas capacidades, sin embargo, las baterías de Litio-Fósforo son en torno a cuatro veces más ligeras que las de Níquel-Cadmio [34].

Las baterías de Litio-Plomo tienen un voltaje nominal de 3,7V (cargadas). Su gran desventaja es su elevado riesgo de deterioro e, incluso, ignición o explosión si llevan un mal uso.

Estas baterías son usadas en algunos automóviles y dispositivos electrónicos de última generación como ordenadores portátiles y “*smatphones*”.

### 3.3.1.6 Batería de Aire-Zinc

La batería de Aire-Zinc funciona debido a la oxidación del zinc, que supone el ánodo de la reacción. El oxígeno del aire reacciona en el cátodo formando iones hidroxilo que migran a la pasta de Zinc donde se liberan electrones. Su voltaje está en torno a 1,4 V por celda.

Estas baterías tienen altas densidades de energía y son relativamente baratas de producir. La mayor ventaja con la que cuentan estas baterías es su posibilidad de ser recicladas sin límite, sin que pierdan ni sus cualidades físicas ni químicas.

Esta tecnología aún en desarrollo tiene aplicación en diversos tipos de productos, es usada para prótesis de oído y aparatos electrónicos portátiles. Y se espera su implementación en el sector automotriz [35].

En la Tabla 3-2 Características de los principales tipos de baterías Tabla 3-2, se resumen las principales características de las baterías presentas con anterioridad:

Tipo	Energía/Peso (Wh/kg)	Tensión por celda (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga (h)	Auto-descarga por mes (% del total)
Plomo-Ácido	30-50	2	1000	8-16	5
Ni-Cd	48-80	1,25	500	10-14	30
Ni-Mh	60-120	1,25	1000	2-4	20
Li-Ion	110-160	3,16	4000	2-4	25
Li-Po	100-130	3,7	5000	1-1,5	10

Tabla 3-2 Características de los principales tipos de baterías [35]

### 3.3.2 Características de las baterías

Para poder entender el modelo de simulación, es necesario explicar las características más importantes que van a definir a los distintos tipos de baterías descritos con anterioridad. Las principales características de las baterías son las siguientes [36]:

- Energía específica: define la cantidad de energía que la batería puede almacenar por unidad de masa. Se expresa en Watios hora por kilogramo (Wh/kg).
- Potencia específica: es aquella potencia que es capaz de suministrar una batería por unidad de masa. A mayor potencia, mayor será la intensidad de corriente que la batería pueda aportar teniendo una menor caída de tensión en bornes. Se expresa en Watios por kilogramo (W/kg).
- Densidad de energía: es la cantidad de energía almacenada en una celda por unidad de volumen. Se expresa en Watios hora por litro (Wh/l).

- Ciclos de vida: es el número de veces que se puede cargar y descargar una batería, sin que su capacidad caiga por debajo del 80% de la capacidad nominal.
- Autodescarga: es la pérdida de carga en condición de operación en vacío, es decir, sin extraerle corriente a la batería. Se expresa normalmente en porcentaje (%) de descarga en un mes.
- Capacidad de corriente: se refiere a la cantidad de energía almacenada dentro de cada celda. La capacidad de una batería se expresa en Amperios hora (Ah). Este valor dependerá de la composición química, así como de otros factores como las dimensiones o el ritmo de descarga.

Del mismo modo, es necesario definir otros parámetros utilizados para la realización del modelo general de batería que se explican a continuación:

- Tensión nominal: diferencia de potencial entre el polo positivo y el polo negativo proporcionado por el fabricante.
- Tensión en circuito abierto: tensión en bornes de la batería cuando su corriente es cero.
- Resistencia interna: es la resistencia que oponen los componentes internos de la batería (electrodos, electrolito y terminales), varía en función del estado de carga, el buen estado de la misma, la corriente y la temperatura.
- Estado de carga (SoC): este parámetro indica la cantidad de energía disponible en la batería en un momento dado expresada en porcentaje (%).
- Profundidad de descarga (DoD): se expresa en porcentaje (%) y mide la cantidad de energía extraída de una batería en función de su capacidad nominal en cada ciclo de descarga.

$$DoD = 1 - SoC \quad \text{Ecuación 3-24}$$

### 3.3.3 Capacidad y ley de Peukert

La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que acumula. Siendo el producto de la corriente a la que se descarga y el número de horas de descarga. La electricidad que puede entregar una batería se ve afectada por la velocidad de descarga. Por este motivo, es común que las baterías no den grandes capacidades al descargarse a regímenes elevados de corriente al contrario de cuando se descargan a valores pequeños de corriente [31].

La ley de Peukert relaciona el estado de carga de una batería y su velocidad de descarga, pues cuanto mayor es la velocidad de descarga, menor capacidad tendrá la batería:

$$C_p = I^k \cdot t \quad \text{Ecuación 3-25}$$

Siendo:

- $C_p$ : la capacidad de la batería (Ah).
- $I$ : intensidad de descarga (A).
- $t$ : tiempo de descarga (h)
- $k$ : constante de Peukert

Se ha optado por implementar en el modelo baterías de  $\text{LiFePO}_4$  por sus numerosas ventajas. Se trata de las baterías de Li-Ion más seguras del mercado, ya que una batería LFP no necesita estar completamente cargada mejorando su vida útil en estados de carga parciales. Otra ventaja de estas baterías es el amplio rango de temperaturas que soporta, su excelente rendimiento cíclico y su baja resistencia.

Para las baterías de litio es comúnmente utilizado  $k=1,056$  como valor de la constante de Peukert, valor que se usará en futuras simulaciones [33].

La tensión nominal de este tipo de batería suele estar en torno a 3,2 V por celda frente a los 2 V/celda que proporciona una batería de Plomo-Ácido. Por lo tanto, serán necesarias menos celdas para cumplir con los requisitos del motor.

Conectando celdas de baterías en serie se puede conseguir suministrar una tensión superior a la nominal:

$$V = n_c \cdot V_c \quad \text{Ecuación 3-26}$$

Mientras que realizando conexiones de celdas de baterías en paralelo se aumentaría la capacidad de la batería de forma proporcional. Esto no suele ser eficiente dado que una batería de mayor capacidad nominal suele tener un menor coste y peso que las equivalentes resultantes de realizar estas conexiones.

$$C = n_c \cdot C_c \quad \text{Ecuación 3-27}$$

### 3.3.4 Selección de la batería de tracción

Dentro las baterías de  $\text{LiFePo}_4$  se ha elegido las baterías del fabricante Thunder Sky Winston® por su facilidad y disponibilidad de datos para su modulado, teniendo como voltaje nominal 3,4 V por celda.

Para modelar la batería, se necesita conocer los requisitos de funcionamiento de los motores eléctricos. Éstos trabajan a 300 V y lo que supone que se debe de realizar una conexión de celdas en serie como mínimo de:

$$n_c = \frac{300 \text{ V}}{3,4 \text{ V}} = 88,24 \sim 89 \text{ celdas}$$

Para la colocación de baterías hay que ver los espacios disponibles intentando no reducir los espacios destinados a la carga de material o personal. Puesto que se deja libre el espacio destinado al árbol de transmisión, se dispone de toda la zona ventral del vehículo para la carga de baterías.

Este espacio tiene unas dimensiones de 15 cm x 216 cm x 238 cm lo que supone un volumen de 771,12 litros para la implantación de baterías (Figura 3-6).

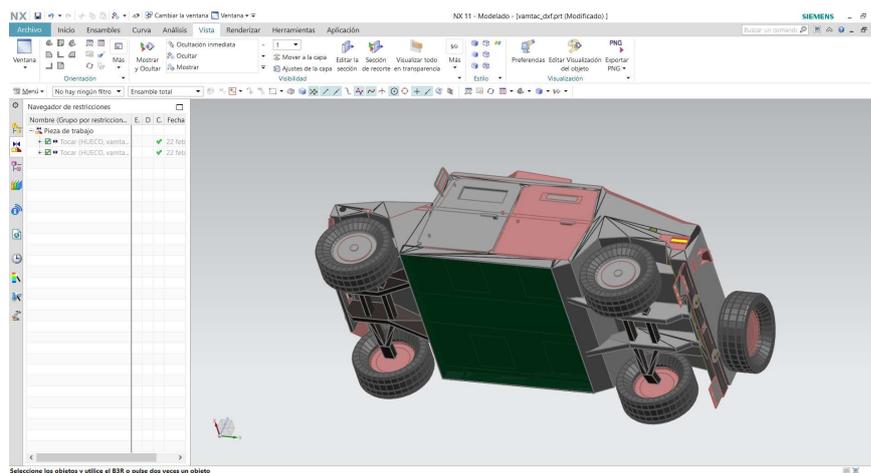


Figura 3-6 Imagen 3D del espacio disponible para baterías en el vientre del VAMTAC

Dentro de las baterías disponibles por este fabricante se han seleccionado las más adecuadas por su peso, dimensiones y capacidad.

1. Batería WB-LYP160AHA de 160 Ah

Esta batería tiene un peso de 5,7 kg por celda y supone un volumen de:

$$v_c = 20,9 \text{ cm} \cdot 6,5 \text{ cm} \cdot 27,8 \text{ cm} = 3776,63 \text{ cm}^3$$

Teniendo en cuenta que son necesarias 89 celdas para cubrir la demanda de potencial del motor, se necesitará un volumen de:

$$v = 3,77 \text{ l} \cdot 89 \text{ celdas} = 336,12 \text{ l}$$

Como se puede observar se dispone de más volumen del que ocupa este tipo de batería, por lo que dimensionalmente es válida para el modelo. Ahora hay que ver cómo se ve reducida la capacidad de carga por el peso de las propias baterías.

$$m = 5,7 \text{ kg} \cdot 89 \text{ celdas} = 507,3 \text{ kg}$$

La masa en vacío del vehículo híbrido teniendo en cuenta el peso de los dos motores y de las baterías sería:

$$M_{vacio} = 3500 \text{ kg} + 2 \cdot 90 \text{ kg} + 507,3 \text{ kg} = 4187,3 \text{ kg}$$

Por lo que la capacidad de carga se vería reducida en:

$$M_{maxcarga} = 6300 \text{ kg} - 4187,3 \text{ kg} = 2112,7 \text{ kg}$$

## 2. Batería WB-LYP200AHA de 200 Ah

De forma análoga se realizan los cálculos de volumen y peso para estas baterías:

$$v_c = 36,1 \text{ cm} \cdot 5,52 \text{ cm} \cdot 25,6 \text{ cm} = 5101,36 \text{ cm}^3$$

$$v = 5,10 \text{ l} \cdot 89 \text{ celdas} = 453,9 \text{ l}$$

$$m = 7,9 \text{ kg} \cdot 89 \text{ celdas} = 703,1 \text{ kg}$$

$$M_{vac} = 3500 \text{ kg} + 2 \cdot 90 \text{ kg} + 703,1 \text{ kg} = 4383,1 \text{ kg}$$

$$M_{maxcarga} = 6300 \text{ kg} - 4383,1 \text{ kg} = 1916,9 \text{ kg}$$

## 3. Batería WB-LYP300AHA de 300 Ah

De igual forma se hace el cálculo para esta batería:

$$v_c = 36,2 \text{ cm} \cdot 5,55 \text{ cm} \cdot 30,6 \text{ cm} = 6147,85 \text{ cm}^3$$

$$v = 6,15 \text{ l} \cdot 89 \text{ celdas} = 578,5 \text{ l}$$

$$m = 9,7 \text{ kg} \cdot 89 \text{ celdas} = 863,3 \text{ kg}$$

$$M_{vacio} = 3500 \text{ kg} + 2 \cdot 90 \text{ kg} + 863,3 \text{ kg} = 4543,3 \text{ kg}$$

$$M_{maxcarga} = 6300 \text{ kg} - 4543,3 \text{ kg} = 1756,7 \text{ kg}$$

A medida que se aumenta la capacidad de las baterías se va a mejorar la autonomía del vehículo en detrimento de la capacidad de carga del mismo. Como se ha podido observar, en ningún caso las baterías ocupan más de 771, 12 litros, por lo que el principal problema de aumentar la capacidad de las baterías es que se reduce la máxima carga admisible por el vehículo.

### 3.4 Motor de combustión

La denominación de vehículo híbrido implica que el vehículo use motores de diferentes tipos, es decir, que a la vez que funciona con un motor eléctrico, pueda funcionar con otro motor de combustión interna de forma simultánea, alcanzado así el estado de hibridación.

Para el modelado del vehículo hace falta entender primero en qué consiste el motor de combustión y por qué es tan importante para mejorar la autonomía del vehículo final.

#### 3.4.1 Generalidades de los motores de combustión

Los motores de combustión llevan en uso desde que se empezó a desarrollar el mercado automovilístico, se tratan de motores térmicos que aprovechan la energía química del combustible para producir energía térmica, que se aprovecha generando movimiento. Estos motores se dividen a su vez en Motores de Encendido Provocado (MEP) como son los motores de gasolina y en Motores de Encendido por Compresión (MEC) o motores Diésel [37].

Según el número de carreras que necesite el pistón para completar un ciclo estos, a su vez, pueden dividirse en motores de 2 ó 4 tiempos. El motor más habitual en automóviles es el motor de 4 tiempos que realiza los procesos de admisión, compresión, explosión y escape en 4 carreras alternativas del émbolo siendo un ciclo completo en 2 vueltas de cigüeñal (Figura 3-7).

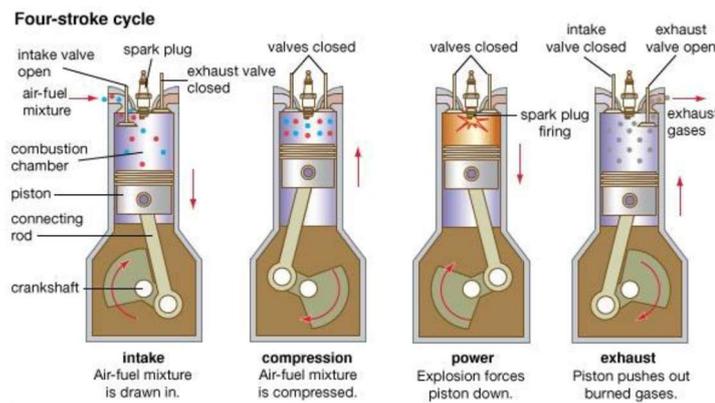


Figura 3-7 Funcionamiento de un motor de combustión de 4 tiempos [37]

En los motores de 2 tiempos (Figura 3-8), sin embargo, los ciclos de admisión, compresión, expansión y escape se realizan en 2 carreras alternativas del émbolo, lo que supone un ciclo completo de cigüeñal.

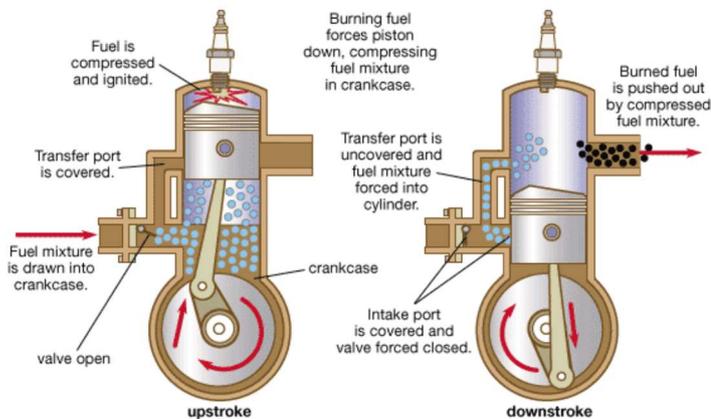


Figura 3-8 Funcionamiento de un motor de combustión de dos tiempos [37]

Los motores de encendido provocado, siguen el ciclo Otto que está compuesto por dos transformaciones adiabáticas e isentrópicas y otras dos transformaciones isocóricas como se puede ver en la Figura 3-9.

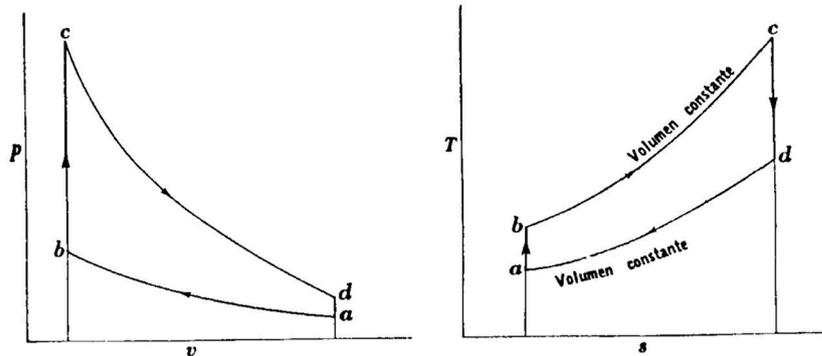


Figura 3-9 Diagramas potencia-volumen y temperatura-entropía en un ciclo Otto [37]

Por otro lado, en los motores de encendido por compresión se sigue el ciclo Diesel (Figura 3-10) que está compuesto por dos transformaciones adiabáticas e isentrópicas a la vez que una transformación isobárica y otra isocórica.

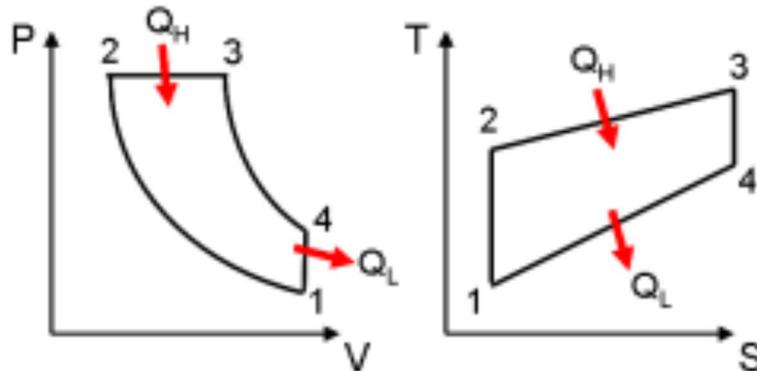


Figura 3-10 Diagramas potencia-volumen y temperatura-entropía en un ciclo Diésel [37]

### 3.4.2 Selección del motor de combustión

Dado que se trata de un vehículo híbrido, se procura dimensionar el motor de combustión de forma que su uso se limite a cuando únicamente sea imprescindible, para aumentar la autonomía proporcionada por la capacidad de las baterías.

Los motores de combustión usados en estos vehículos, conocidos como “*range extender*” en inglés, pueden ir desde los 25 kW como tiene el BMW i3 REX hasta los 63 kW del Chevrolet Volt. Para el vehículo se ha elegido un motor dentro de este margen de potencias, dando prioridad a la conducción completamente eléctrica frente a la híbrida, que se realizará de forma puntual.

Por lo tanto, se ha optado por implantar un motor de combustión de gasolina de 1000 cm<sup>3</sup> y 50 kW de potencia como es el del Honda Insight de primera generación.

Para su modelo ha sido necesario partir de la curva de consumo del motor (Figura 3-11) que va a proporcionar los datos de consumo, par, potencia y revoluciones del motor.

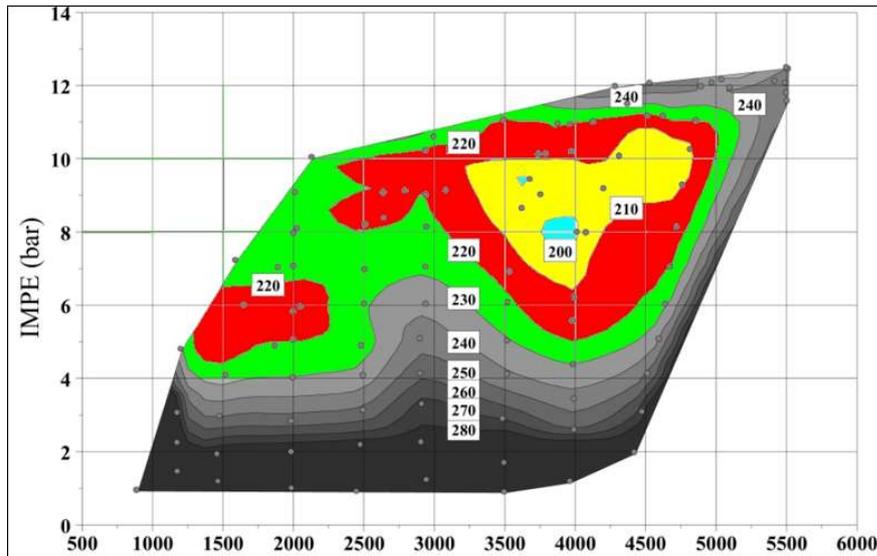


Figura 3-11 Gráfica del consumo específico (g/kWh) del motor de gasolina del Honda Insight

Por otro lado, se ha reducido el volumen del depósito de combustible, inicialmente de 110 l, a 60 l puesto que se pretenderá usar como fuente energética auxiliar y se espera que con ese volumen sea suficiente para proporcionar autonomías similares cuando ambos motores (eléctricos y de combustión) estén en funcionamiento.

Esto supone una descarga sobre el peso inicial del vehículo, cuyo combustible era el diésel.

$$m_{diesel} = 0,85 \text{ kg/l} \cdot 110 \text{ l} = 93,5 \text{ kg}$$

$$m_{gasolina} = 0,68 \text{ kg/l} \cdot 60 \text{ l} = 40,8 \text{ kg}$$

Lo que supone una reducción de masa de:

$$\Delta m = 93,5 \text{ kg} - 40,8 \text{ kg} = 52,7 \text{ kg}$$

Volviendo a las masas en vacío calculadas en el apartado 3.3.4, se aplica la reducción que se acaba de calcular.

- 1) Batería WB-LYP160AHA de 160 Ah  
 $M_{vacío} = 4187,3 \text{ kg} - 52,7 \text{ kg} = 4134,6 \text{ kg}$
- 2) Batería WB-LYP160AHA de 200 Ah  
 $M_{vacío} = 4383,1 \text{ kg} - 52,7 \text{ kg} = 4330,4 \text{ kg}$
- 3) Batería WB-LYP160AHA de 300 Ah  
 $M_{vacío} = 4543,3 \text{ kg} - 52,7 \text{ kg} = 4490,6 \text{ kg}$

### 3.5 Selección del generador eléctrico

Cualquier motor eléctrico puede usarse como generador y viceversa, por lo tanto, valdría el motor descrito en el apartado 3.1.7 ya que además, su potencia nominal es la misma que la que la potencia máxima del motor de combustión (apartado 3.4), optimizando el rendimiento del generador. Esto también facilitará su modelado más adelante ya que supone mantener el modelo de motor de inducción ya calculado.

## 4 MODELADO DEL VEHÍCULO

En este apartado se explicará el software empleado y cómo se han creado los modelos a partir de lo explicado en el punto 3 para cada uno de los componentes seleccionados, permitiendo la posterior simulación y, con ella, la obtención de resultados.

### 4.1 Software utilizado

La base de la simulación y modelado de este proyecto se ha realizado sobre el software de cálculo Matlab®/Simulink® que permite modelar de una forma visual los modelos matemáticos que emplean tanto la dinámica del vehículo como el resto de sus componentes más importantes. Se ha conseguido realizar un modelo general que, en función de unas características predefinidas, permitirá realizar distintas simulaciones en función de la carga del vehículo, de la capacidad de las baterías y el ciclo de conducción deseado.

El software MATLAB® (MATrix LABoratory abreviado) es una herramienta informática desarrollada por la empresa MathWorks® que permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (reales o complejos), cadenas de caracteres y otras estructuras de información más complejas. Además, cuenta con su propio lenguaje de programación (lenguaje M) permitiendo crear funciones y programas especiales en código Matlab, que se pueden agrupar en librerías (Figura 4-1).

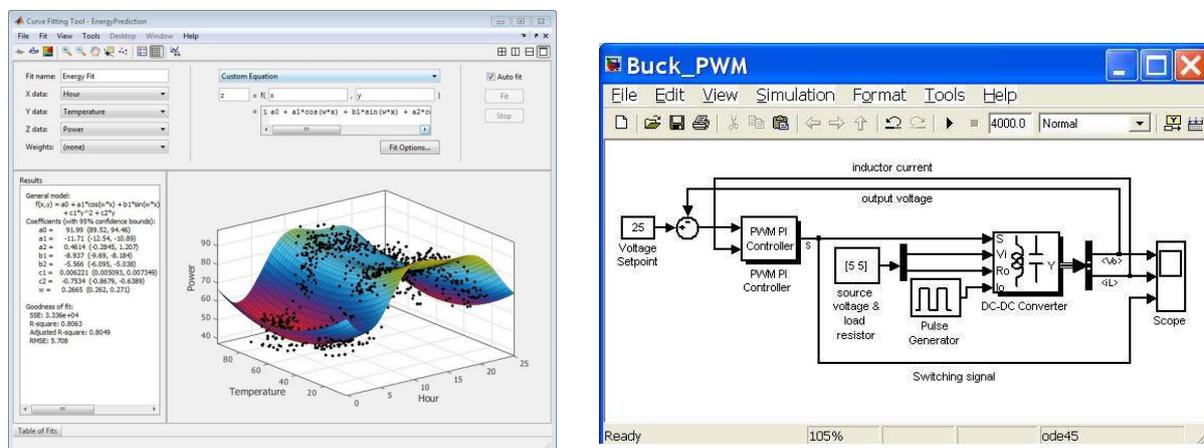


Figura 4-1 Capturas de pantalla de Matlab® [38] (izquierda) y Simulink® [39] (derecha)

Sus principales prestaciones son la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes [38]. Adicionalmente, este programa cuenta con una herramienta especial de simulación, Simulink<sup>®</sup>, que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores [39].

Simulink<sup>®</sup> es una herramienta que utiliza diagramas de bloque para realizar simulaciones multidominio de sus modelos. Para ello ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques (“*blocksets*”) preestablecidas y personalizables y diversos algoritmos de resolución matemática que permiten modelar, simular y presentar resultados.

Del mismo modo, se ha empleado el software de diseño y cálculo en 3D Siemens NX que permitirá visualizar el vehículo, ver espacios disponibles para la carga de baterías y ver posibles soluciones espaciales para la implantación de componentes en el vehículo final híbrido.

El programa informático Siemens<sup>®</sup> NX, es una herramienta que incluye funciones CAD/CAE/CAM desarrollada por la compañía Siemens PLM Software [40]. Sus principales usos son:

- CAD. Diseño y modelado paramétrico y directo de sólidos o superficies.
- CAE. Permite realizar análisis estático, dinámico, electromagnético y térmico usando métodos de cálculo como el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos para el análisis de fluidos.
- CAM. Permite definir la forma de fabricación del producto y generar instrucciones de CNC.

Todas estas simulaciones permitirán conocer la autonomía del vehículo y serán de peso para posteriormente poder comparar las prestaciones finales con las del vehículo original.

## 4.2 Modelado de la dinámica

Para modelar la respuesta dinámica del vehículo, hay que recurrir a las ecuaciones de la física que se trataron en el punto 3.1. Para ello, se van a modelar en el entorno Simulink<sup>®</sup> de Matlab<sup>®</sup> y relacionar con el resto de parámetros que definen el comportamiento del vehículo.

### 4.2.1 Bloque de la fuerza de tracción

Este mismo cálculo (apartado 3.1.1) se realiza mediante diagramas de bloques en Simulink<sup>®</sup> como se muestra en la Figura 4-2. Los siguientes bloques, que se describirán a continuación, se unirán a un bloque sumador y este a su vez será multiplicado por la velocidad del vehículo.

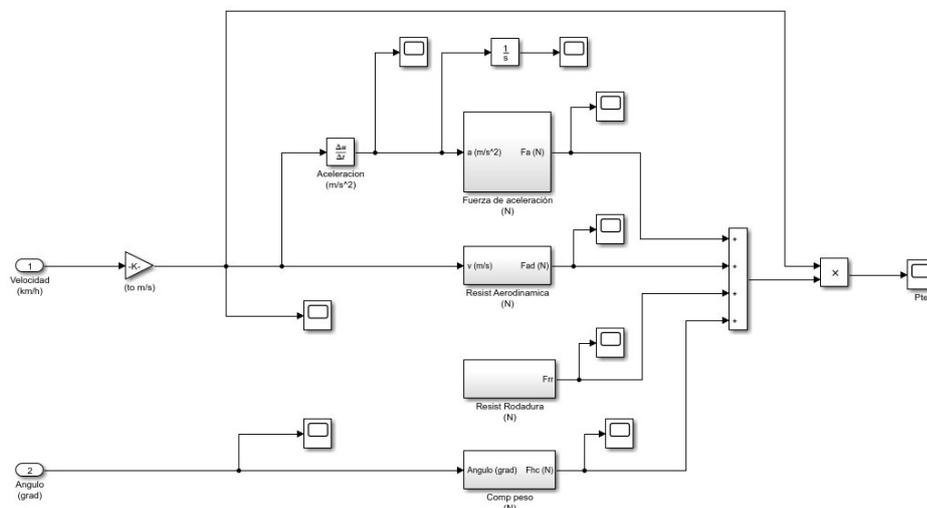


Figura 4-2 Modelado de la potencia mecánica

#### 4.2.2 Bloque de fuerza la de resistencia a la rodadura

A continuación (Figura 4-3), se muestra el desarrollo del bloque de resistencia a la rodadura definiendo en bloques las ecuaciones descritas en el punto 3.1.2

Para simplificar el modelo se tomarán valores de estos datos, siendo el valor predefinido de  $\mu_{rr}$  de 0,015 para neumáticos radiales en carreteras de buen estado y de 0,08 para suelos baldíos.

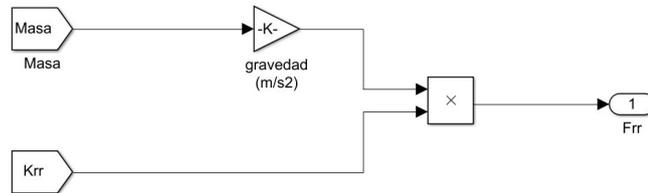


Figura 4-3 Diagrama de la fuerza de resistencia a la rodadura

Como se muestra en la imagen anterior, se realiza el mismo cálculo descrito con anterioridad partiendo de la masa del automóvil y de su coeficiente de rozamiento a la rodadura, obteniendo como salida así la fuerza de resistencia a la rodadura.

#### 4.2.3 Bloque de la fuerza de resistencia aerodinámica

Análogamente se muestra a continuación su representación en un diagrama de bloques de la fuerza de resistencia aerodinámica (Figura 4-4), teniendo como entradas la velocidad, el área frontal y el coeficiente de aerodinámico y como salida, la fuerza de resistencia aerodinámica.

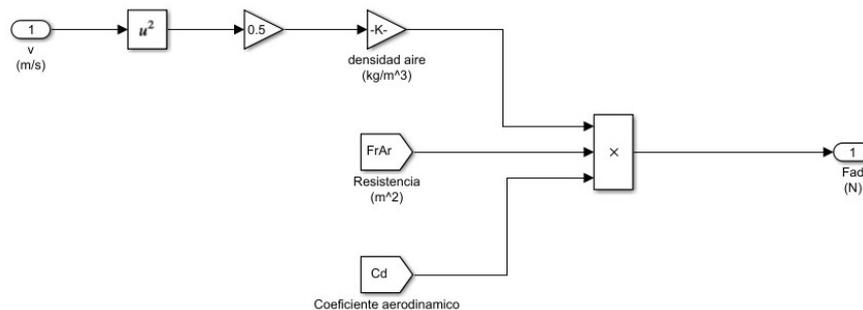


Figura 4-4 Diagrama de la fuerza de resistencia aerodinámica

#### 4.2.4 Bloque de la fuerza para superar una pendiente

De forma equivalente a la Ecuación 3-6, se ha diseñado el cálculo de la fuerza necesaria para superar una pendiente mediante bloques de Simulink® (Figura 4-5), a partir del ángulo de la pendiente y de la masa del vehículo.

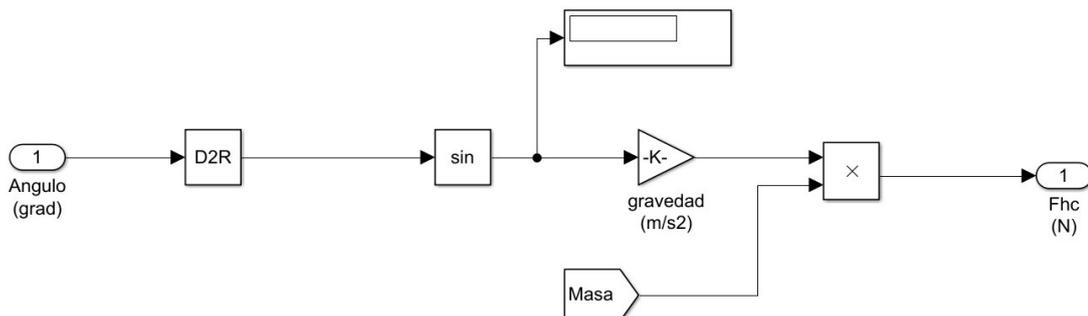


Figura 4-5 Bloque de la Fuerza necesaria para superar la pendiente

### 4.2.5 Bloque de la fuerza de aceleración lineal

Como se ha descrito anteriormente (3.1.5), aparte de tener como entradas la aceleración del vehículo y la masa, hay que incluir una compensación del momento de inercia entre los bloques (Figura 4-6), lo que se hará con un bloque de ganancia de valor 1,05 antes de realizar el producto que resulte en la fuerza de aceleración lineal.

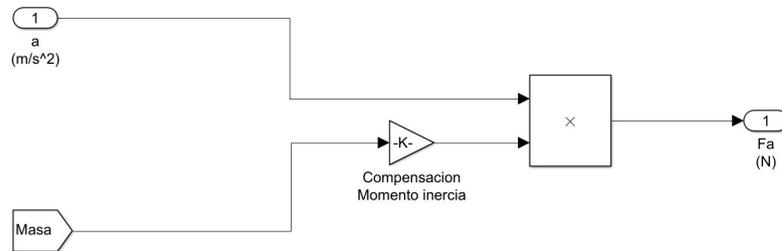


Figura 4-6 Diagrama de la fuerza de aceleración lineal

### 4.2.6 Bloque de la potencia eléctrica necesaria

Esto se puede modelar de dos formas, mediante una función y código de Matlab o mediante bloques de Simulink. Finalmente, se ha optado por el uso de bloques ya que aportan una visualización mucho más sencilla y rápida de cara a un lector universal, familiarizado o no, con el uso de este programa.

Para garantizar el cumplimiento de todos los casos que se contemplan, es necesario el uso de bloques que comparen la potencia del vehículo de entrada para los casos en que ésta sea negativa o igual a cero, y por lo tanto se pueda regenerar energía en la frenada, o positiva cuando el vehículo requiera energía del motor para su puesta en funcionamiento.

Como este bloque (Figura 4-7) también incluye la acción de la reductora, es necesario tener en cuenta su rendimiento al trabajar con potencias y su relación de transmisión, así como el radio de la rueda del vehículo para el cálculo de las revoluciones de giro en el motor.

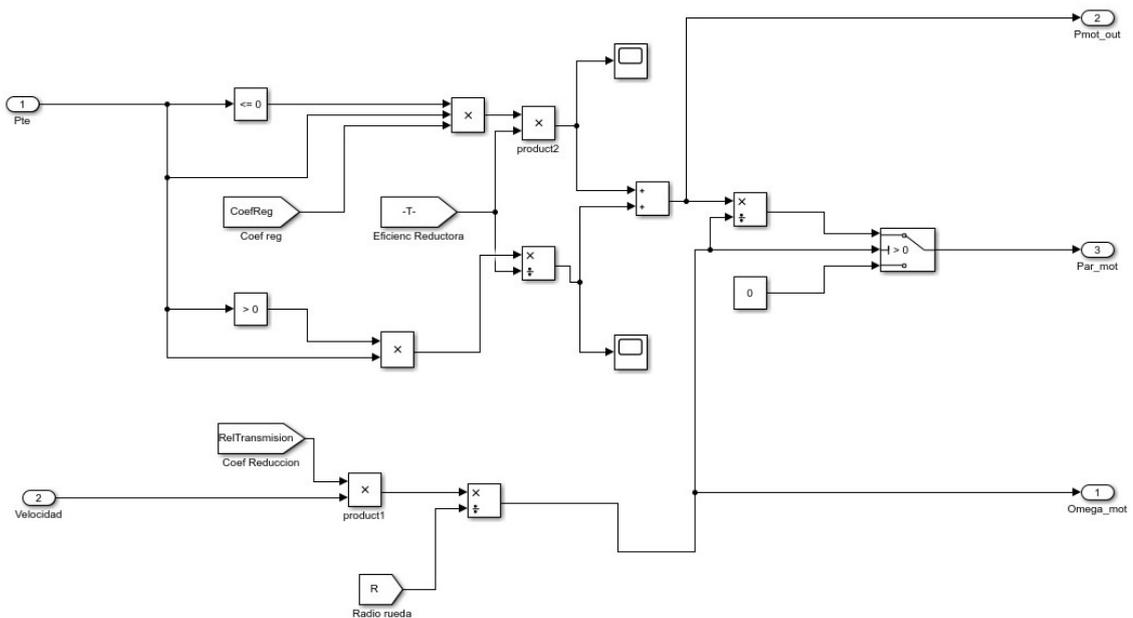


Figura 4-7 Diagrama de potencia mecánica

Una vez conocida tanto la potencia que entregan o reciben los motores y su velocidad de giro, se podrá obtener el par que generan ambos motores trabajando a la vez con el mismo régimen de carga, suponiendo ésta, la última de las tres salidas del bloque: potencia de los motores, revoluciones de giro y par obtenido de ambos motores. Como se puede observar en la Figura 4-7, la velocidad de giro del motor dependerá únicamente de la velocidad del vehículo (velocidad de giro de las ruedas), del radio de la rueda del vehículo y de la relación de transmisión del motor eléctrico, es decir, la reducción que necesita el vehículo según el rango de velocidades en las que el motor es más eficiente.

Al contrario que en motores de combustión interna, los motores eléctricos no tienen ralentí, es decir, pueden proporcionar par desde su puesta en funcionamiento hasta unas altas velocidades de giro del motor. Por este motivo muchos motores eléctricos acostumbran a no necesitar de una caja de cambios propiamente dicha como sí que hacen los motores de combustión interna, cuyo recorrido de velocidades de giro con mayor rendimiento es mucho menor.

Por ello, se ha calculado una única relación de transmisión teniendo en cuenta la eficiencia del motor eléctrico, su rango de velocidades de giro y la velocidad máxima esperada de funcionamiento del vehículo (135 km/h).

Como el vehículo está pensado para moverse en un rango de velocidades que no supere los 100 km/h y alcance la mayor parte del tiempo velocidades intermedias, conviene que el motor eléctrico funcione a mayor eficiencia en este rango de velocidades. Por lo tanto, se va a diseñar una relación de transmisión que permita alcanzar la velocidad máxima teórica pero que a la vez suponga la máxima eficiencia eléctrica a velocidades medias.

Se pretende que el vehículo alcance la velocidad máxima (135 km/h) a un régimen de giro del motor que no esté muy alejado de la máxima potencia y que a la vez sea eficiente, es decir, en torno a 6000 rpm.

$$v_{max} = 135 \text{ km/h} = 37,5 \text{ m/s}$$

$$\omega_r = \frac{37,5 \text{ m/s}}{0,47 \text{ m}} = 79,78 \text{ rad/s} \cdot \frac{30}{\pi} = 762,29 \text{ rpm}$$

$$R_t = \frac{6000 \text{ rpm}}{762,29 \text{ rpm}} = 7,87$$

#### 4.2.7 Bloque de configuración del vehículo

Para realizar todos los cálculos descritos con anterioridad, es necesario definir las variables que intervienen en ellos y que condicionarán los resultados de las simulaciones. Para ello, se ha definido un bloque (Figura 4-8) que agrupa todas estas constantes, lo que facilita su uso en otros bloques al estar muchas de ellas repetidas en distintos cálculos.

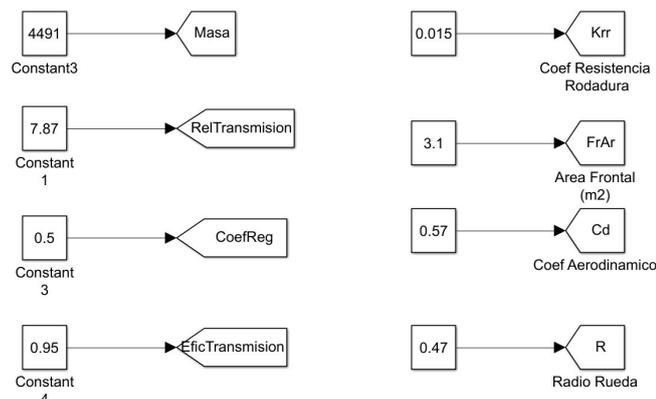


Figura 4-8 Bloque de configuración del vehículo

### 4.3 Modelado del motor eléctrico

En este apartado se describirán los bloques necesarios para modelar el motor eléctrico según las ecuaciones descritas en el punto 3.1.7 y su validación para el motor seleccionado.

#### 4.3.1 Eficiencia de un motor de inducción

Se ha desarrollado el modelo de pérdidas y eficiencia descrito en el apartado 3.2.2 en el siguiente diagrama de bloques de Simulink® (Figura 4-9). Se compone de dos partes según si el motor esté generando potencia o regenerándola para cargar las baterías:

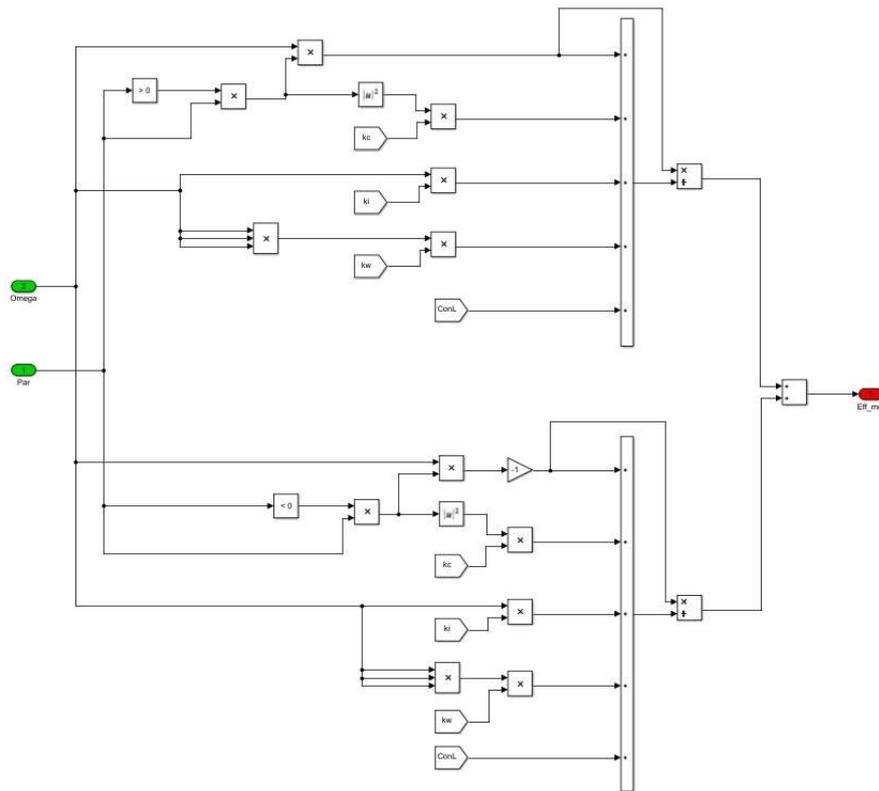


Figura 4-9 Bloque de eficiencia de un motor eléctrico

Del mismo modo, se puede representar en Simulink® (Figura 4-10) el cálculo de potencia eléctrica, según la eficiencia del motor, como se explicó en el punto 3.1.6.

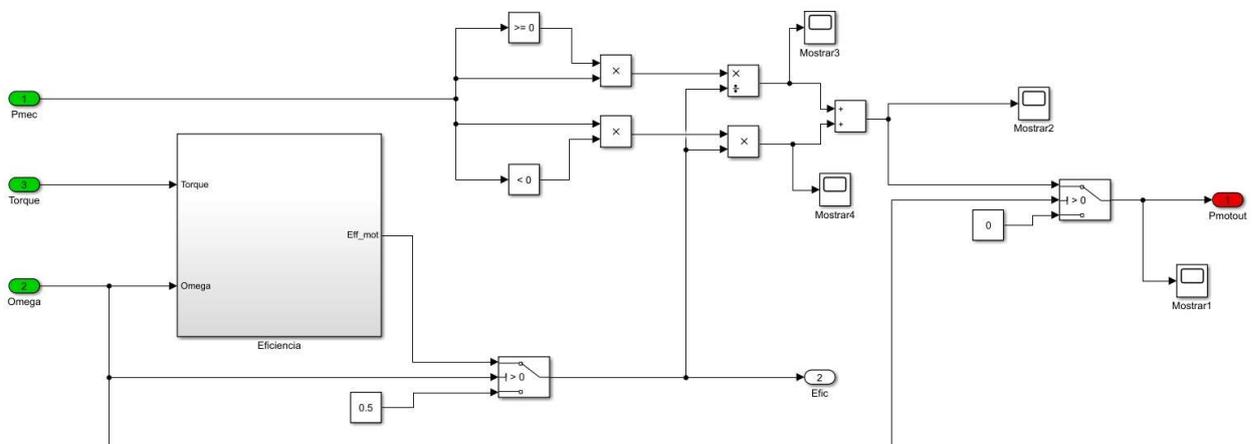


Figura 4-10 Bloque de potencia eléctrica

### 4.3.2 Validez del modelo del motor eléctrico

Para comprobar que el modelo general se aproxima al elegido, se debe comparar la gráfica de eficiencia nominal obtenida de él. Para ello primero se introducen los valores de las constantes en el bloque de configuración del motor (Figura 4-11):

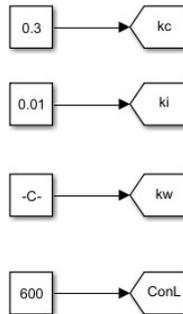


Figura 4-11 Bloque de configuración del motor eléctrico

Tras realizar una simulación al mismo régimen de carga se obtiene una gráfica (Figura 4-12) que se aproxima bastante para regímenes de giro del motor más intermedios (Figura 3-4), valiendo por lo tanto el modelo diseñado.

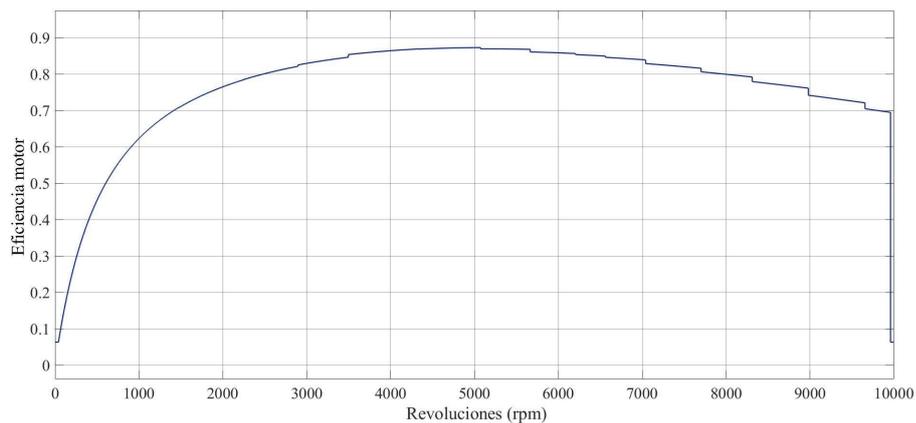
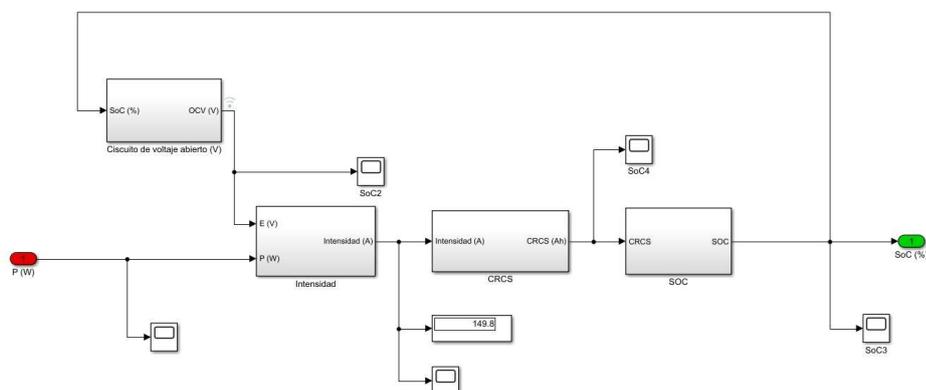


Figura 4-12 Gráfica de eficiencia del motor obtenida en Simulink

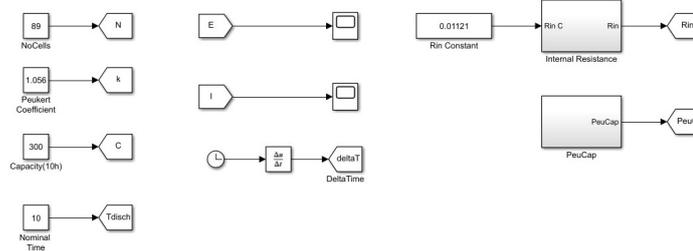
## 4.4 Modelado de la batería de tracción

El modelado de la batería es el mismo para los tres modelos (Figura 4-13) ya que únicamente cambia su capacidad; la tecnología (LiFePO<sub>4</sub>) se mantiene, al igual que el resto de características definen el modelo diseñado.



**Figura 4-13 Bloque general de la batería de tracción**

Las características que definen la batería se han dispuesto en un bloque aparte (Figura 4-14) conectando cada una de ellas a su correspondiente bloque como se muestra a continuación:

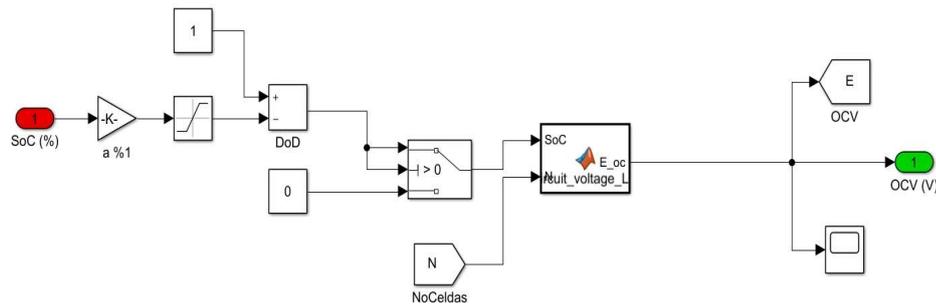


**Figura 4-14 Bloque de configuración del vehículo**

Algunas de estas características están desarrolladas mediante cálculos matemáticos expresados con bloques de Simulink® como son el bloque de tensión de circuito abierto, el bloque de resistencia interna y el bloque de capacidad de Peukert que se pueden observar en la Figura 4-14.

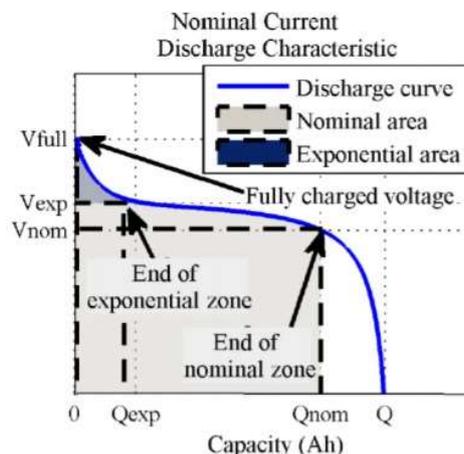
#### 4.4.1 Bloque de tensión de circuito abierto

Para entender el funcionamiento de una batería hay que saber que el potencial en circuito abierto varía según el nivel de carga de la batería, las baterías se mueven entre 4 V cuando están a plena carga y 2,8 V cuando están descargadas por completo. Por ello, hay que definir un bloque de tensión de circuito abierto (Figura 4-15) que, a partir del estado de carga de la batería, calcule el potencial de la misma.



**Figura 4-15 Bloque de tensión de circuito abierto**

En este bloque, teniendo en cuenta el número de celdas conectadas en serie y con una función matemática que aproxima un polinomio a la curva OCV (Figura 4-16) real obtenida de previas experiencias de carga y descarga, se puede obtener como valor de salida la tensión de circuito abierto en cada momento de la batería.



**Figura 4-16 Gráfica típica OCV de una batería de Li-Ion [33]**

#### 4.4.2 Bloque de resistencia interna

Toda batería cuenta con una resistencia interna ( $R_{in}$ ) que dependerá de la capacidad de la batería y del número de celdas que la componen. De esta forma a la resistencia inicial y constante habrá que multiplicarle el número de celdas y dividírle la capacidad de carga (Figura 4-17) para el tiempo de carga o descarga de la batería. Se mide en Ohmios tal como se define en el siguiente bloque:

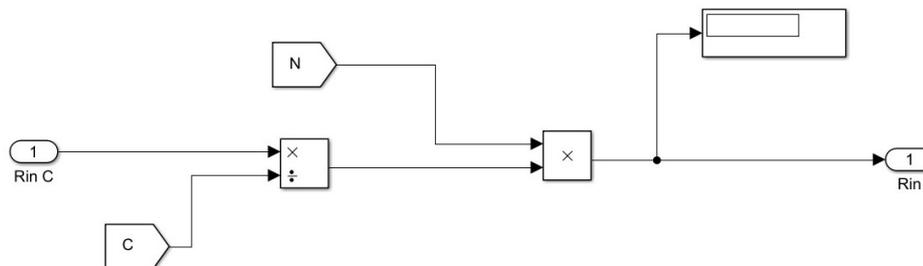


Figura 4-17 Bloque de resistencia interna

#### 4.4.3 Bloque de capacidad de Peukert

Tal como se ha descrito anteriormente, la capacidad de Peukert depende de la intensidad a la que se descarga y del tiempo empleado. Partiendo de la capacidad nominal y del tiempo nominal de descarga (10h) la ecuación quedaría:

$$C_p = \left( \left( \frac{C}{T_{disch}} \right)^k \right) \cdot T_{disch} \tag{Ecuación 4-1}$$

Que expresado en un diagrama de bloques (Figura 4-18):

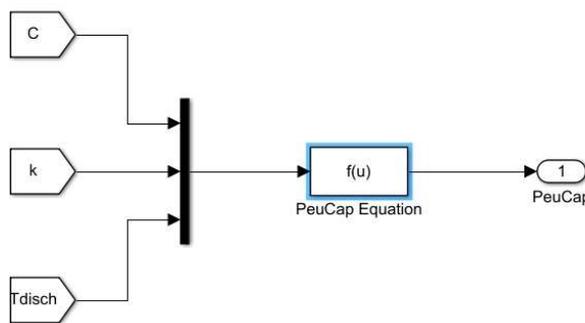


Figura 4-18 Bloque de capacidad de Peukert

#### 4.4.4 Bloque de intensidad

En este bloque se calculará, a partir de la potencia que requiere o regenera el motor durante la frenada regenerativa, la intensidad eléctrica que proporcionarán las baterías al motor o la potencia regenerada que el freno regenerativo consigue que se disipe en las baterías recargándolas.

Para saber la intensidad eléctrica asociada a la potencia eléctrica requerida o regenerada por el motor se aplicará la ley de Ohm:

$$P = V \cdot I \tag{Ecuación 4-2}$$

Sabiendo que la tensión de una batería sigue la fórmula:

$$V = E - I \cdot R \tag{Ecuación 4-3}$$

Se puede sustituir la tensión en la Ecuación 4-2:

$$P = E \cdot I - R \cdot I^2 \tag{Ecuación 4-4}$$

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot R_{in} \cdot P}}{2 \cdot R_{in}} \tag{Ecuación 4-5}$$

Para saber si la batería se carga o descarga es necesario saber si los motores requieren o regeneran potencia eléctrica, para ello bastará con ver si la potencia eléctrica es positiva (se requiere) o negativa (se regenera) cambiando de esta forma el signo dentro de la raíz de la Ecuación 4-5.

En la Figura 4-19 se han modelado las ecuaciones que definen la intensidad eléctrica de las baterías [25].

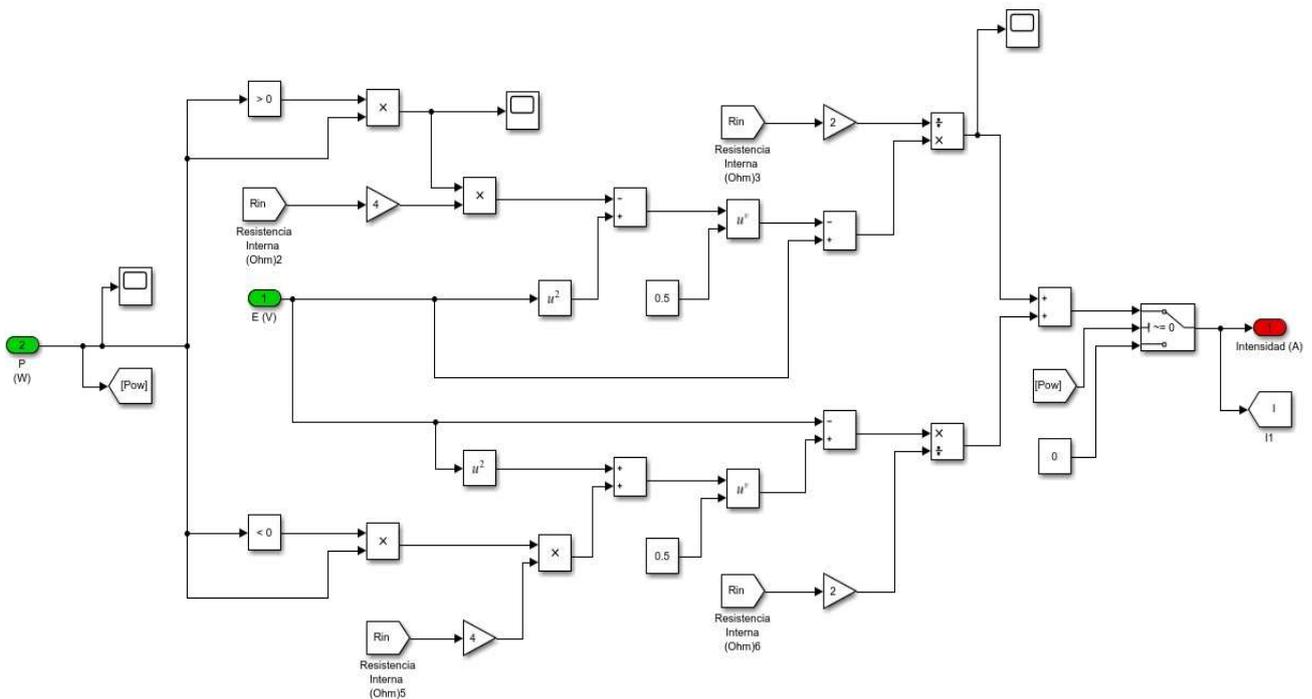


Figura 4-19 Bloque de intensidad eléctrica

#### 4.4.5 Bloque de carga y descarga

Para saber la carga (CRCS) que la batería recibe o suministra es necesario combinar la intensidad de corriente (I) obtenida del bloque anterior con el coeficiente de Peukert ( $k_p$ ) y con el tiempo en cada instante ( $\delta t$ ) [25]:

$$CRCS = I^k \cdot \delta t / 3600 \tag{Ecuación 4-6}$$

Esta magnitud se expresará en Amperios segundo, por lo que es necesaria la división de  $\delta t$  por 3600.

Según el signo de la intensidad calculada en el bloque anterior, se producirá la carga o descarga de la batería, de forma que si es positiva se descargará y si es negativa se cargará.

En ambos casos la salida del bloque (Figura 4-20) será el estado de carga en el que se encuentra la batería en cada momento.

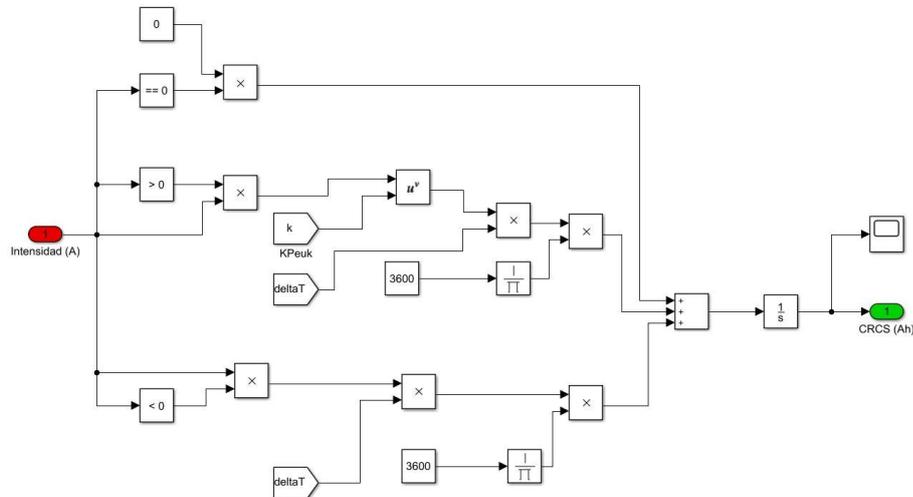


Figura 4-20 Bloque de carga y descarga

#### 4.4.6 Bloque de estado de carga (SoC)

Este bloque (Figura 4-21) calcula el porcentaje de carga que tiene la batería sobre el total (capacidad de Peukert) a partir del CRCS calculado anteriormente. Para ello inicialmente se calcula la profundidad de descarga (DoD) y con ella la proporción inversa, es decir el estado de carga (SoC) que se expresará en porcentaje.

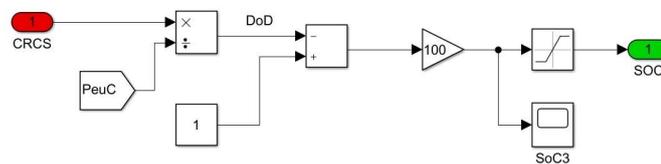


Figura 4-21 Bloque del estado de carga

### 4.5 Modelado del motor de combustión

Se han obtenido los puntos de consumo específico de combustible de la gráfica anterior (Figura 3-11) para implantarlos en un "script" de Matlab (Figura 4-22) con el fin de obtener una función polinómica que se aproxime a la curva tridimensional obtenida de la gráfica.

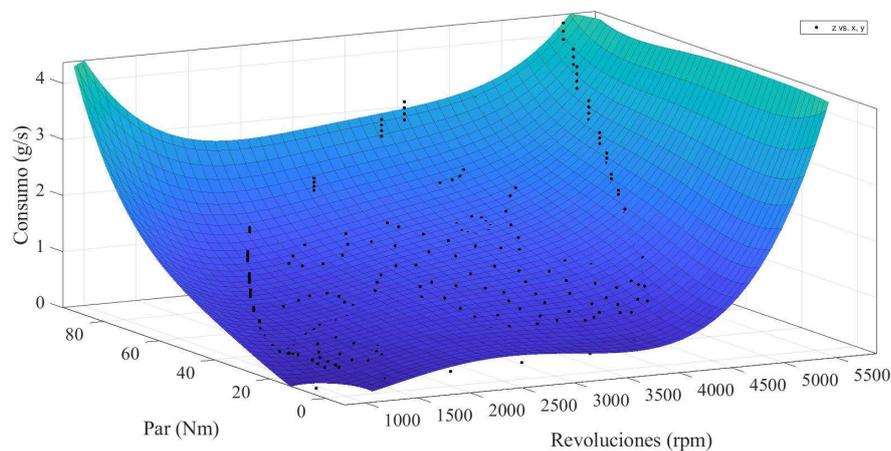


Figura 4-22 Aproximación polinómica de la curva de consumo frente a par y rpm del motor

Una vez obtenido un modelo matemático del motor de combustión se ha podido implementar en un bloque (Figura 4-23) para que a partir de la carga y régimen de giro del cigüeñal del motor se obtenga el consumo en cada momento y consumo total del motor durante la simulación.

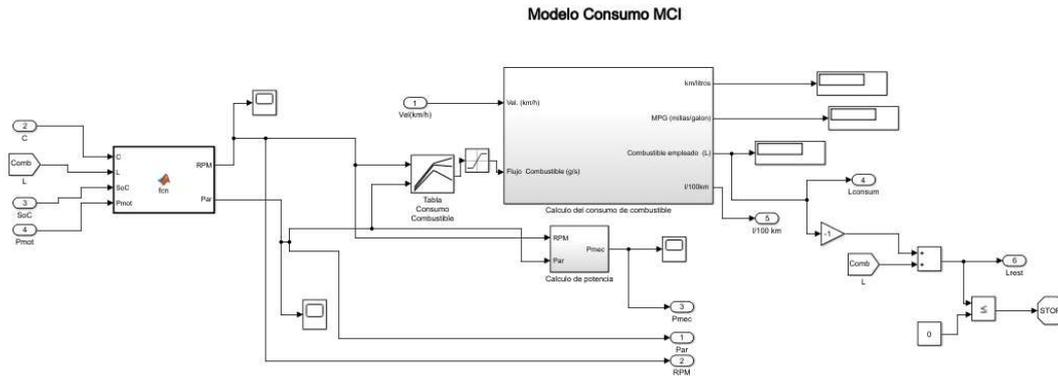


Figura 4-23 Modelo general del motor de combustión interna

Para su modelado en Matlab®/Simulink®, partiendo de esta curva y de la capacidad del tanque de combustible del vehículo, se ha establecido dos regímenes de funcionamiento para el motor. Dado que su función va a ser que trabaje como una fuente de energía eléctrica auxiliar, es conveniente que trabaje en régimen fijo y constante la mayor parte del tiempo de funcionamiento, para ello, se ha establecido este régimen en su estado de mayor eficiencia en el que trabajará de forma normal cuando haya un requerimiento de energía extra. Sin embargo, este régimen no aporta toda la energía que el motor de combustión es capaz de dar, y por ello, se ha establecido otro régimen de funcionamiento a máxima potencia para cuando las necesidades de la conducción sean superiores a las necesidades estimadas como normales.

En la siguiente figura (Figura 4-24) se muestra el bloque correspondiente a la implementación del control del motor de combustión:

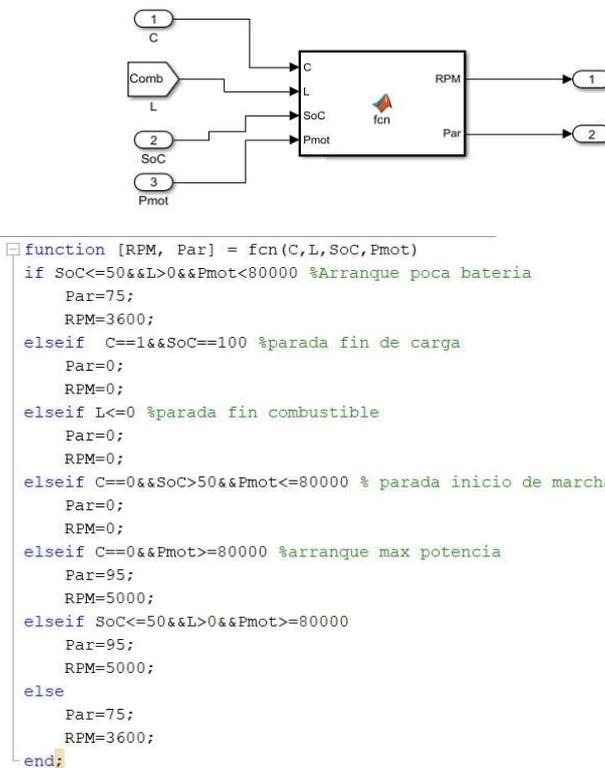


Figura 4-24 Bloque y función de configuración del motor

De esta forma, el motor trabaja siempre a máxima eficiencia reduciendo también su consumo salvo que la demanda energética del motor eléctrico sea elevada que será entonces cuando y, de forma puntual, funcione con la máxima carga.

Adicionalmente, es necesario otro bloque que, a través del polinomio obtenido al aproximar la curva de consumo, dé una estimación del consumo para el régimen de funcionamiento del motor y la distancia recorrida.

Para ello, a partir de la velocidad del vehículo y del flujo de combustible que se consume, se podrá calcular el consumo en diferentes unidades: litros consumidos por cada 100 kilómetros, millas recorridas por galón de combustible, litros consumidos o kilómetros recorridos por litro de gasolina consumido.

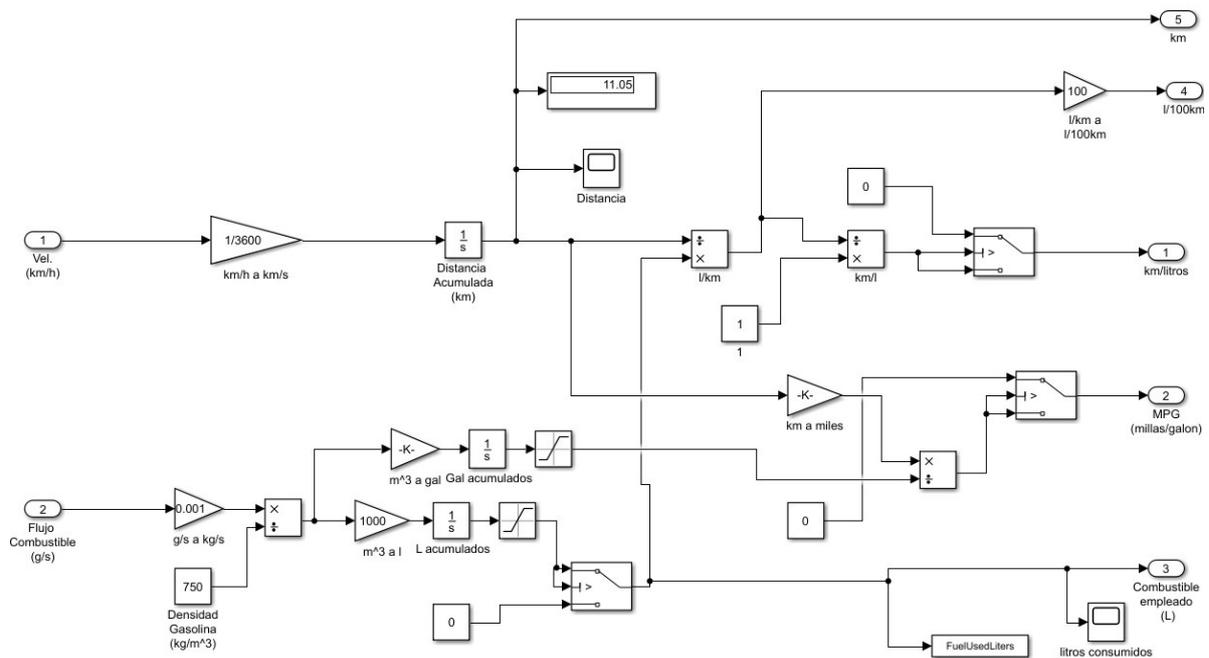


Figura 4-25 Bloque de consumos del MCI

## 4.6 Modelado del generador eléctrico

Como la eficiencia del generador es máxima para valores de giro de motor entre 4.000 y 6.000, y el motor de combustión tiene dos modos de funcionamiento, uno a 3.600 rpm y otro a 5.000 rpm, es necesario introducir una reductora entre ambos bloques. Para ello, primero hay que calcular la relación de reducción/amplificación necesaria.

El motor de combustión trabajará en condiciones normales de operación a 3.600 rpm durante la mayor parte del tiempo por lo que es conveniente que también el generador funcione en su punto de máxima eficiencia, 4.500 rpm.

$$3600 \text{ rpm} \cdot R = 4500 \text{ rpm}$$

$$R = 1,25$$

Esta relación también es óptima para cuando el motor de combustión gire a 5.000 rpm ya que supone un régimen de giro en el generador de 6.500 rpm. Por lo tanto, la relación de amplificación óptima entre motor de combustión y generador será de 1,25.

En el siguiente bloque (Figura 4-26) se muestra el modelado del bloque del generador.

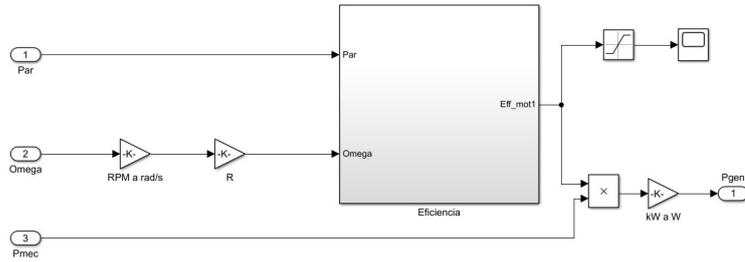


Figura 4-26 Modelado del generador eléctrico

### 4.7 Modelado de la unidad de control de potencia

La parte más característica que define un vehículo híbrido es su capacidad de entrar en hibridación, es decir, que tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico funcionen de forma simultánea, para producir un aporte extra de potencia cuando el vehículo así lo solicite. Para ello es necesario que una unidad administre la puesta en funcionamiento del motor-generador, su parada o su régimen de funcionamiento. Para definir si funciona o no el motor-generador, hay que ver en qué momentos se va a necesitar que aporte más energía. Para ello lo más fácil es verlo con un diagrama (Figura 4-27) donde se especifiquen las decisiones que ha de tomar la unidad de control para funcionar en hibridación o de forma puramente eléctrica.

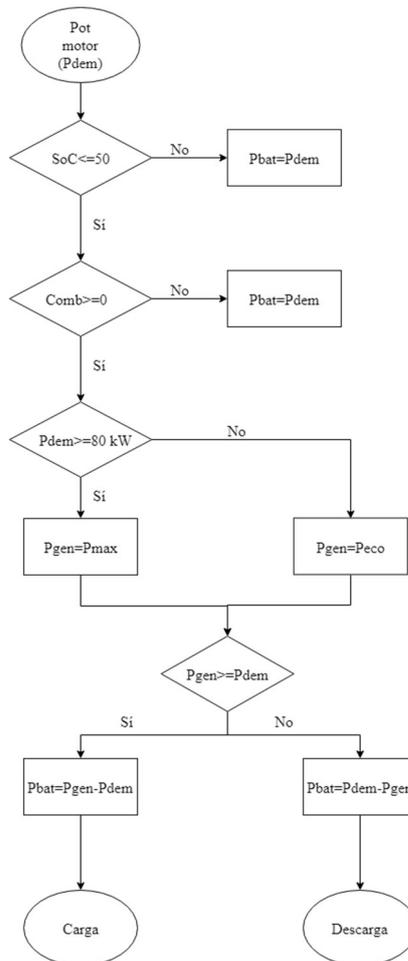


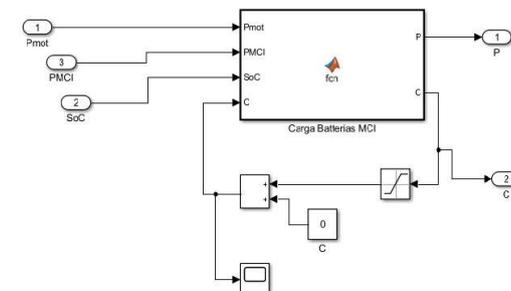
Figura 4-27 Diagrama de flujo de la unidad de control de potencia

Se ha establecido como punto de inicio de funcionamiento del motor de combustión un estado de carga de las baterías del 50%, para obtener una amplia autonomía eléctrica sin llegar a descargar demasiado las baterías. Por otro lado, si la potencia requerida por el vehículo es alta (mayor de 80 kW) el motor de combustión dejará de funcionar en el modo “eco” de máxima eficiencia para dar su potencia máxima sea cual sea el estado de carga de las baterías, aumentando así su autonomía en estas situaciones de elevada necesidad de potencia, la finalidad de este modo de funcionamiento será únicamente la de reducir el gasto energético de las baterías, no valdrá para cargarlas. A continuación, se resume el funcionamiento híbrido del vehículo en un diagrama de flujo:

Como se observa en el esquema anterior el coche sólo entra en hibridación si la potencia demandada por el ciclo de conducción es superior un valor determinado como potencia máxima, en este caso 80 kW, o si, por el contrario, con una demanda de potencia menor, el estado de carga de las baterías (SoC) alcanza un valor mínimo fijado, en este caso se ha fijado un 50 % de la carga total de las baterías.

Cuando se alcance el 100% de carga, la unidad parará el motor-generator hasta que esta carga vuelva a caer por debajo del mínimo, donde se volverá a arrancar para conseguir otro ciclo de carga. Sin embargo, esto no ocurrirá en ciclos de conducción en los que la potencia demandada sea bastante superior a la máxima que el motor-generator pueda dar, ya que cuando el estado de carga caiga por debajo del mínimo establecido, la potencia generada por el motor de combustión interna en su régimen de funcionamiento será insuficiente para suministrar energía a los motores eléctricos de tracción y, a la vez, cargar las baterías. De esta forma, se conseguirá amortiguar el consumo energético de las baterías aumentando de esta manera la autonomía.

Por otro lado, hay que tener en cuenta la necesidad de combustible. Si no se dispone de combustible, aunque se cumplan todas las condiciones para el funcionamiento en modo híbrido, no se pondrá en marcha el motor de combustión y, por lo tanto, no se podrá aumentar la autonomía del vehículo. Para modelar el funcionamiento condicionado del generador es necesario implantar una función de Matlab® (Figura 4-28) que permita incluir todas las condiciones que hay que tener en consideración a la hora de emplear el motor de combustión, las cuales se resumieron en la Figura 4-27.



```
function [P,C]=fcn(Pmot,PMCI,SoC,C)

if SoC<=50&&C==0 %inicio carga
    P=Pmot-PMCI;
    C=1;
elseif SoC==100&&C==0%comienzo al 100%
    P=Pmot;

elseif SoC==100 %final de carga y descarga
    P=Pmot;
    C=0;
elseif SoC>50&&C==1 %carga
    P=Pmot-PMCI;
elseif SoC>50&&C==0&&Pmot<80000 %descarga lenta
    P=Pmot;
elseif Pmot>=80000&&C==0 %descarga max potencia
    P=Pmot-PMCI;
else
    P=Pmot-PMCI;
end
```

Figura 4-28 Bloque y código de la unidad de control de potencia

### 4.8 Modelado general del vehículo

Finalmente, queda unir los bloques descritos en uno solo (Figura 4-29) para así poder hacer simulaciones con Simulink® que permitirán conocer la autonomía y consumos del vehículo. Para ello, se tendrá que unir el bloque de dinámica (4.2) con el de los motores eléctricos (4.3), a la vez que el bloque del motor de combustión (4.5) con el de su generador eléctrico (4.6). El bloque de la unidad de control de potencia (4.7), será el nexo de unión de los bloques del generador eléctrico y los motores eléctricos con el bloque de las baterías (4.4).

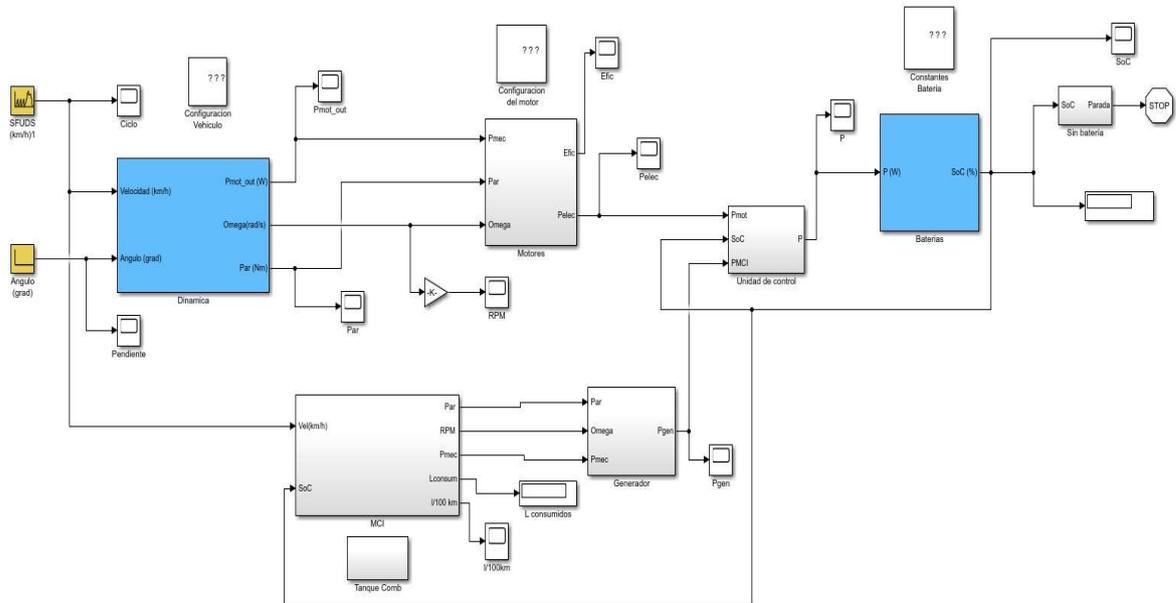


Figura 4-29 Modelo general del vehículo

## 5 SIMULACIÓN Y PRESTACIONES

### 5.1 Simulación

Para el cálculo de prestaciones del vehículo relativas a las baterías (autonomía, consumo, estado de carga, etc.), en primer lugar, se hace necesario emplear ciclos de conducción que definan el comportamiento del vehículo durante un tiempo dado. Al igual que con los vehículos del mercado actual se han seguido ciclos estandarizados y homologados que permitirán comparar los resultados obtenidos con las prestaciones originales del vehículo.

En base a estos ciclos de conducción, se analizará la autonomía del vehículo para las distintas capacidades de las baterías. Dicho análisis tendrá lugar empleando simulaciones con ciclos estandarizados, ciclos a velocidades constantes y un último ciclo de conducción real obtenido por GPS de un vehículo militar de similares características.

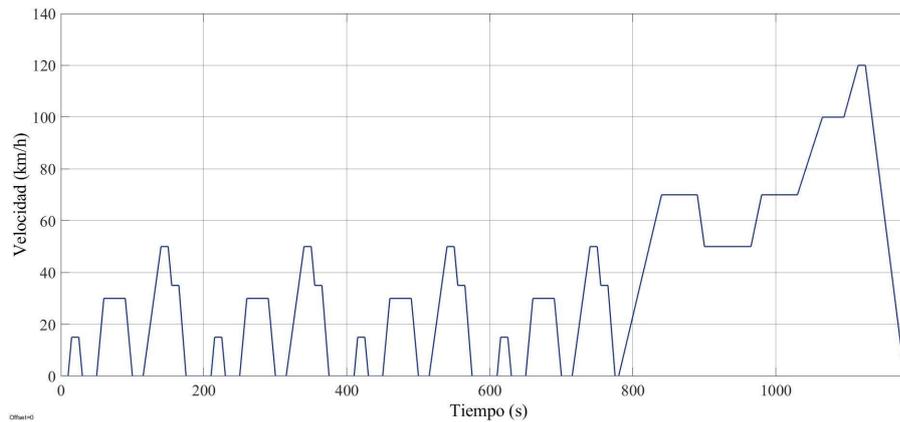
#### 5.1.1 Ciclos de conducción

Para medir la autonomía de un vehículo, se sigue un ciclo de conducción homologado que permitirá comparar las características de forma objetiva de otros vehículos en las mismas condiciones. En Europa el ciclo de conducción utilizado hasta la fecha es el ciclo NEDC (“*New European Driving Cycle*”), mientras en Japón se usa el ciclo *Japan Cycle 08* o en EEUU el ciclo *Federal Test Procedure-75* siendo imposible comparar datos de diferentes ciclos [41].

Sin embargo, desde el pasado 1 de septiembre de 2017 ha entrado en vigor un nuevo ciclo de conducción para la homologación de nuevos vehículos. El ciclo WLTP (“*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*”) afectará en primer lugar a aquellos vehículos que necesiten una nueva homologación europea, es decir, a los nuevos modelos que se pongan a la venta hasta septiembre de 2018, cuando empezará a afectar a todos los vehículos que se pongan en venta en la Unión Europea. Y no será hasta septiembre de 2019, que será de obligado cumplimiento en todos los vehículos que salgan al mercado a nivel mundial [42].

##### 5.1.1.1 Ciclo NEDC

El ciclo NEDC es un ciclo de conducción homologado en el marco europeo para el análisis de los niveles de emisiones y consumos de motores de vehículos turismos y camiones ligeros (Figura 5-1). Consiste en la repetición de cuatro ciclos de conducción urbanos ECE-15 (“*Economic Commission of Europe*”) y un ciclo de conducción extraurbano EUDC (“*Extra Urban Driving Cycle*”) [43].



**Figura 5-1 Ciclo NEDC**

El ciclo de conducción ECE-15 se introdujo por primera vez en 1970. Este ciclo, se debe testear con el vehículo en frío y a temperaturas entre 20 y 30°C, sobre un terreno sin pendiente y en ausencia de viento. Sin embargo, para permitir la repetibilidad de los test, normalmente se realizan sobre un banco de pruebas equipado con una máquina eléctrica capaz de emular la resistencia causada por la carga aerodinámica y la masa del vehículo.

### 5.1.1.2 Ciclo WLTP

El ciclo WLTP define un nuevo estándar para determinar los niveles de emisiones contaminantes y emisiones de CO<sub>2</sub>, los consumos energéticos y de combustible y la autonomía para vehículos eléctricos ligeros [43].

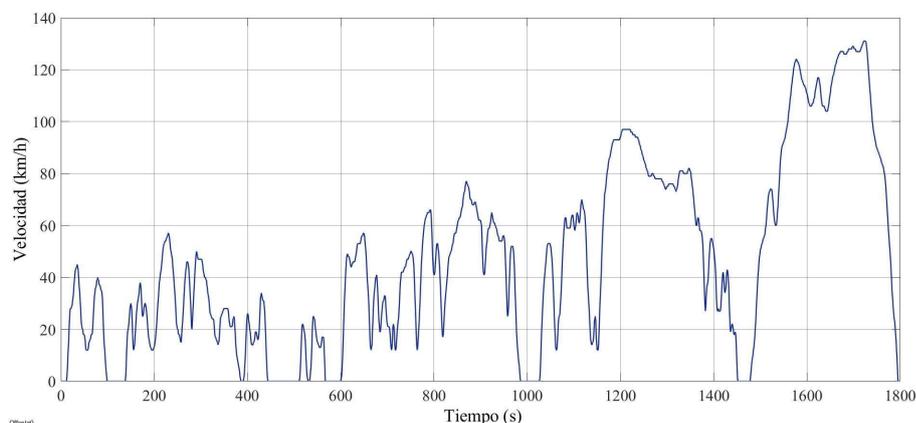
Se aplican tres tipos de pruebas diferentes de ciclos de conducción WLTP según la clase del vehículo definida por la relación potencia-peso en kW/Tn ( $P_r$ ):

- Clase 1: vehículos de baja potencia ( $P_r \leq 22$ )
- Clase 2: vehículos con potencias relativas intermedias ( $22 < P_r \leq 34$ )
- Clase 3: vehículos de gran potencia ( $P_r \geq 34$ )

La mayoría de los automóviles actuales tienen potencias relativas entre 40 y 100 kW/Tn (clase 3) mientras que furgonetas y autobuses pertenecerían al grupo 2.

#### 5.1.1.2.1 Ciclo WLTP clase 3

Este ciclo (Figura 5-2) se divide en cuatro partes según la velocidad, lenta, media, rápida y muy rápida (si el vehículo supera los 135 km/h). En caso de que la velocidad máxima no supere los 135 km/h esta parte se sustituye por una parte a baja velocidad.



**Figura 5-2 Ciclo WLTP clase 3**

### 5.1.1.2.2 Ciclo WLTP clase 2

Este ciclo (Figura 5-3) cuenta con tres partes a baja, media y alta velocidad, si la velocidad máxima del vehículo fuera menor de 90 km/h esta parte se sustituiría por otra a baja velocidad.

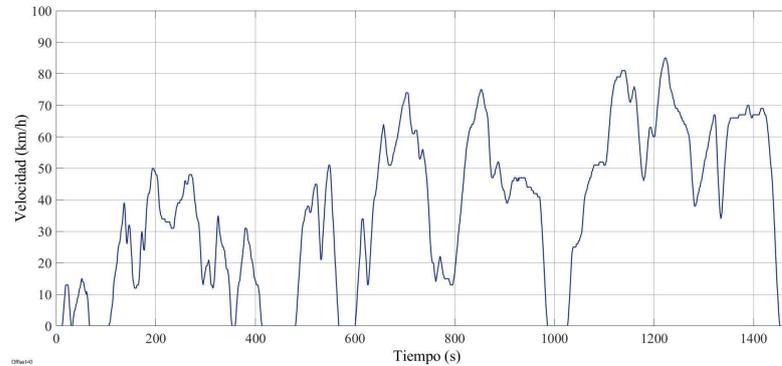


Figura 5-3 Ciclo WLTP clase 2

### 5.1.1.2.3 Ciclo WLTP clase 1

Este ciclo (Figura 5-4) tiene únicamente dos tipos de velocidades, bajas y medias velocidades, presentándose de la forma baja-media-baja, si la velocidad máxima fuera menor de 70 km/h la parte media se sustituiría por otra parte a bajas velocidades.

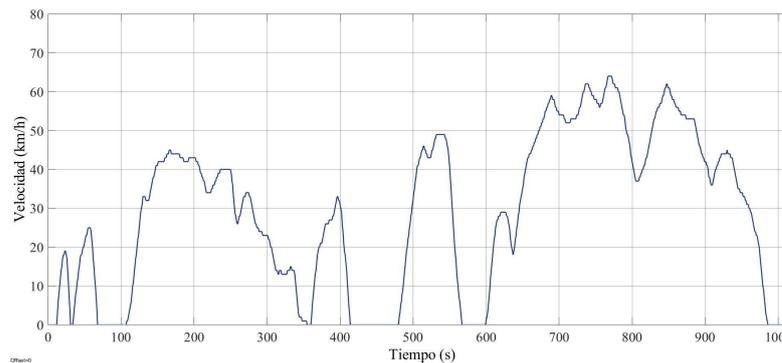


Figura 5-4 Ciclo WLTP clase 1

### 5.1.1.3 Ciclo real de conducción

Para obtener resultados que se aproximen más al comportamiento real del vehículo, se ha tenido en cuenta también el recorrido obtenido por GPS (Figura 5-5) de un vehículo militar durante el periodo de instrucción y adiestramiento de marzo del 2016 en el campo de maniobras el Teleno, situado en la provincia de León, próximo a la localidad de Quintanilla de Somoza. Teniendo en cuenta tanto velocidades como pendientes (Figura 5-6) durante un tiempo de 3400 segundos.

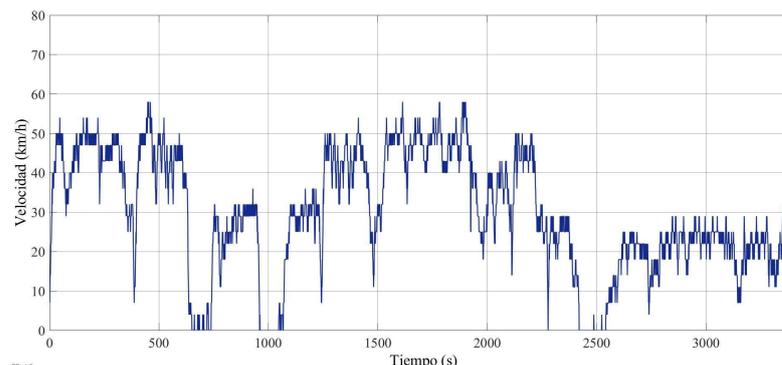
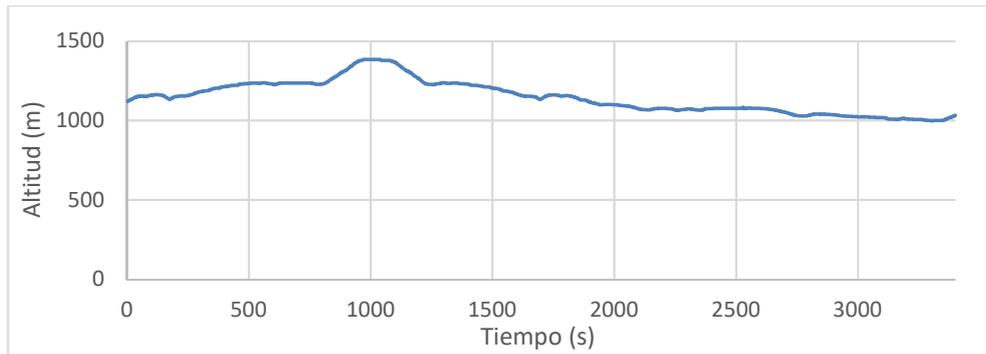


Figura 5-5 Gráfica de velocidad respecto a tiempo del ciclo de conducción real



**Figura 5-6 Gráfica de altitud frente a tiempo del ciclo de conducción real**

Como se puede observar en la Figura 5-5, este ciclo de conducción no tiene tramos a altas velocidades (no se superan los 60 km/h), sin embargo, cuenta con aceleraciones y deceleraciones importantes que serán determinantes a la hora del cálculo de la autonomía. Además, este ciclo de conducción tiene asociado una pendiente (Figura 5-6) al contrario de los anteriores, la pendiente en todo el ciclo no es muy pronunciada (no supera el 2%) pero tiene que tomarse en consideración pues afecta directamente a la autonomía del vehículo.

### 5.1.2 Simulaciones

Antes de realizar simulaciones con los distintos tipos de ciclos y configuraciones del vehículo, hay que definir las variables que caracterizarán al vehículo. Para ello, bastará con modificar los parámetros del bloque de configuración presentado en el punto 4.2.7 con los siguientes datos:

Masa mínima	4135/4330/4491 kg
Masa máxima autorizada	6300 kg
Relación de transmisión	7,87:1
Coefficiente de regeneración	0,5
Eficiencia en la transmisión	0,95
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0,015
Coefficiente aerodinámico	0,57
Radio de la rueda	0,47 m
Área frontal	3,1 m <sup>2</sup>
Depósito de gasolina	60 l

**Tabla 5-1 Datos de configuración del vehículo**

Para las simulaciones realizadas sobre todos los ciclos de conducción seleccionados se usarán coeficientes de resistencia a la rodadura típicos del asfalto en buenas condiciones, es decir, 0,015.

Tal como se ha comentado en el apartado 3.3.4 , se han seleccionado baterías de LiFePO<sub>4</sub> debido a su bajo peso, a que pueden proporcionar altas intensidades de descarga, así como cargar también a altas intensidades. Se han seleccionado tres capacidades de batería para su estudio atendiendo a sus dimensiones, peso y capacidad: las baterías de 160 Ah, las baterías de 200 Ah y las baterías de 300 Ah.

Se realizarán simulaciones para los diferentes tipos de baterías que han sido elegidas para ser instaladas en el modelo y los distintos tipos de ciclos de conducción tenidos en consideración para cuando el vehículo esté tanto cargado a plena carga como en la carga mínima del vehículo.

- BATERÍAS DE 160 AH

Son las baterías más ligeras que se instalarán en el vehículo y al mismo tiempo las que proporcionen una menor cantidad de energía. Para la simulación se tendrán en cuenta distintos tipos de simulación y la carga del vehículo.

Para el cálculo de la potencia relativa hay que tener en cuenta la potencia máxima que son capaces de proporcionar los motores (210 kW), pese a que la potencia nominal de operación sea de 50 kW en cada uno de los motores como se puede observar en el Anexo I: motor siemens® 1PV5135-4WS18. Estas baterías aumentan la masa mínima del vehículo a 4187,3 kg (apartado 3.4.2) suponiendo una potencia relativa (máxima) de:

$$P_r = 210 \text{ kW} / 4,135 \text{ Tn} = 50,78 \text{ kW} / \text{Tn}$$

Por lo tanto, el ciclo homologado adecuado para este vehículo sería la clase 3 del ciclo WLTP.

En la Tabla 5-2 se muestran los resultados de la simulación para la batería de 160 Ah según los ciclos WLTP, NEDC, los ciclos a velocidades constantes (30 km/h, 50 km/h y 80 km/h) y el ciclo real anteriormente descrito.

Masa	Autonomía (km)	Autonomía (h)	Autonomía eléctrica(km)	Consumo (l)	Consumo (l/100km)	Potencia Max. (kW)
Ciclo WLTP clase 3						
4135 kg	505,2	10 h 55 min	55,5	60	11,9	150
6300 kg	390,4	8 h 27 min	42,6	60	15,5	210
Ciclo NEDC						
4135 kg	574,6	17 h 8 min	50,6	60	10,4	106
6300 kg	439,5	13h 6 min	42,8	60	13,8	140
Velocidad constante: 30 km/h						
4135 kg	897,8	29 h 55 min	87,9	60	6,7	6
6300 kg	641,8	21h 24 min	61,7	60	9,4	8,8
Velocidad constante: 50 km/h						
4135 kg	811,8	16 h 14 min	76,3	60	7,4	12
6300 kg	617,8	12 h 21 min	52,3	60	9,7	16,7
Velocidad constante: 80 km/h						
4135 kg	372,5	4h 39 min	51,9	30,38	8,1	27
6300 kg	172,4	2h 9 min	41,7	12,45	7,2	34,4
Ciclo real						
4135 kg	598	20 h 11 min	60,0	60	10,0	93,6
6300 kg	376,6	12 h 41 min	35,5	60	16,1	145

Tabla 5-2 Resultados de las simulaciones para la batería de 160 Ah

- BATERÍAS DE 200 AH

Se tratan de las baterías intermedias en peso y autonomía dentro de las seleccionadas para el vehículo. La masa en tara del vehículo sería de 4383,1 kg algo superior a la anterior (apartado 3.4.2).

Para esta batería apenas cambiará la potencia relativa del vehículo, lo que no influirá a la hora de elegir la clase del ciclo WLTP:

$$P_r = 210 \text{ kW} / 4,330 \text{ Tn} = 48,49 \text{ kW/Tn}$$

En la Tabla 5-3 se muestran los resultados de la simulación para la batería de 200 Ah según los ciclos WLTP, NEDC, los ciclos a velocidades constantes (30 km/h, 50 km/h y 80 km/h) y el ciclo real descrito en el apartado 5.1.1.3 para los distintos estados de carga del vehículo.

Masa	Autonomía (km)	Autonomía (h)	Autonomía eléctrica(km)	Consumo (l)	Consumo (l/100km)	Potencia Máx. (kW)
<b>Ciclo WLTP clase 3</b>						
4330 kg	517,4	11 h 13 min	67,3	60	11,6	154
6300 kg	410,3	8 h 53 min	56,2	60	14,6	210
<b>Ciclo NEDC</b>						
4330 kg	589,9	17h 38 min	68,9	60	10,2	109
6300 kg	461,9	13h 45 min	56,0	60	12,9	140
<b>Velocidad constante: 30 km/h</b>						
4330 kg	913,1	30h 26 min	108,3	60	6,6	6,2
6300 kg	675,4	22 h 31 min	77,6	60	8,8	8,8
<b>Velocidad constante: 50 km/h</b>						
4330 kg	828,9	16 h 35 min	93,6	60	7,25	12,4
6300 kg	648,0	12 h 58 min	69,9	60	9,3	16,7
<b>Velocidad constante: 80 km/h</b>						
4330 kg	424,7	5 h 19 min	65,1	34,16	8,0	27,6
6300 kg	218,3	2 h 44 min	53,3	15,76	7,2	34,4
<b>Ciclo real</b>						
4330 kg	589,5	19 h 53 min	74,6	60	10,2	101
6300 kg	398	13 h 23 min	50,3	60	15,2	145

**Tabla 5-3 Resultados de las simulaciones para la batería de 200 Ah**

- BATERÍAS DE 300 AH

Estas baterías serán las que mayor autonomía proporcionen en detrimento de la capacidad máxima de carga del vehículo ya que el peso mínimo del mismo se eleva hasta los 4543,3 kg (apartado 3.4.2).

La potencia relativa sigue estando dentro de los márgenes de la clase 3 del ciclo de conducción WLTP:

$$P_r = 210 \text{ kW} / 4,491 \text{ Tn} = 46,76 \text{ kW} / \text{Tn}$$

De forma análoga a la tabla anterior, en la Tabla 5-4 se muestran los resultados de la simulación para la batería de 300 Ah según los ciclos WLTP, NEDC, los ciclos a velocidades constantes (30 km/h, 50 km/h y 80 km/h) y el ciclo real descrito en el apartado 5.1.1.3 para los distintos estado de carga del vehículo.

Masa	Autonomía (km)	Autonomía (h)	Autonomía eléctrica(km)	Consumo (l)	Consumo (l/100km)	Potencia Máx. (kW)
Ciclo WLTP clase 3						
4491 kg	569,7	12h 20 min	102,2	60	10,5	158
6300 kg	459,1	9 h 56 min	84,5	60	13,07	210
Ciclo NEDC						
4491 kg	647,9	19 h 19 min	107,3	60	9,3	112
6300 kg	518,6	15 h 27 min	88,3	60	11,57	140
Velocidad constante: 30 km/h						
4491 kg	1002	33 h 25 min	161,5	60	6	6,5
6300 kg	761,1	25 h 22 min	120,3	60	7,8	8,8
Velocidad constante: 50 km/h						
4491 kg	909,3	18 h 11 min	139,3	60	6,6	12,8
6300 kg	724,6	14 h 30 min	107,1	60	8,3	16,7
Velocidad constante: 80 km/h						
4491 kg	603	7h 32 min	97,2	47,97	7,9	28,2
6300 kg	335,2	4 h 11 min	79,7	24.2	7,2	34,4
Ciclo real						
4491 kg	652,1	21 h 59 min	114,9	60	9,2	105
6300 kg	450,8	15 h 11min	78,4	60	13,31	146

Tabla 5-4 Resultados de las simulaciones para la batería de 300 Ah

### 5.1.3 Análisis de resultados

Todas las simulaciones, exceptuando el ciclo real, han sido realizadas sin pendiente, además se ha supuesto un coeficiente de resistencia a la rodadura propio del asfalto (0,015) para facilitar las comparaciones entre ciclos de conducción y tipos de baterías.

Como era de suponer a medida que se aumenta la capacidad de las baterías, se mejora la autonomía del vehículo y se reduce su consumo. Sin embargo, no hay que olvidarse de la pérdida de capacidad de carga lo cual es un factor muy importante en el vehículo, aunque el volumen destinado a la carga no se vea afectado.

A continuación, se resumen todos los resultados de las simulaciones en gráficas representativas de la autonomía según el ciclo de conducción para cada tipo de batería. En la Figura 5-7, se muestran las autonomías resultantes de la simulación de los distintos ciclos de conducción para las diferentes cargas del vehículo para la batería de 160 Ah.

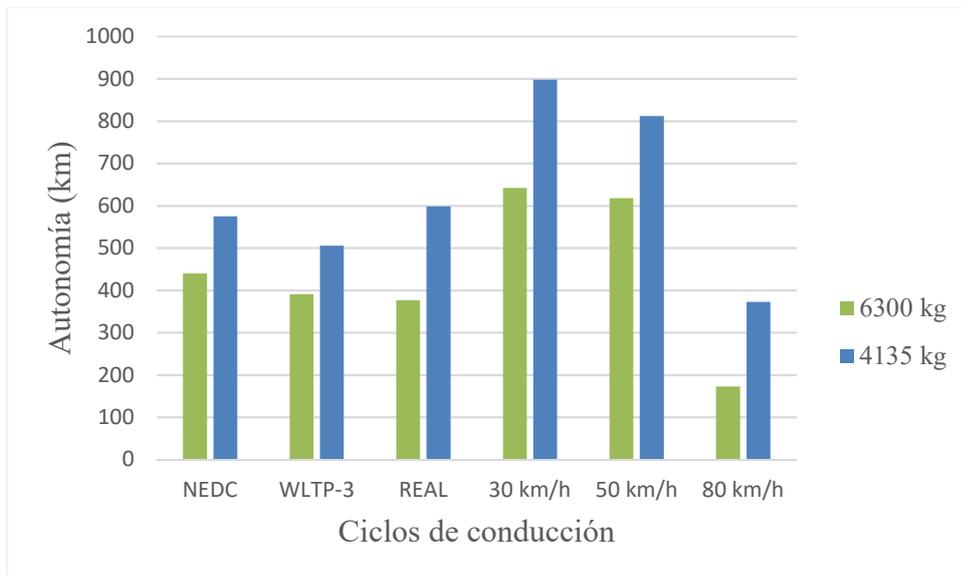


Figura 5-7 Gráfico de barras de autonomía para 160 Ah

En la Figura 5-8, se repasan los datos de autonomía obtenidos de los diferentes ciclos de conducción simulados en ambos estados de carga del vehículo para la batería de 200 Ah.

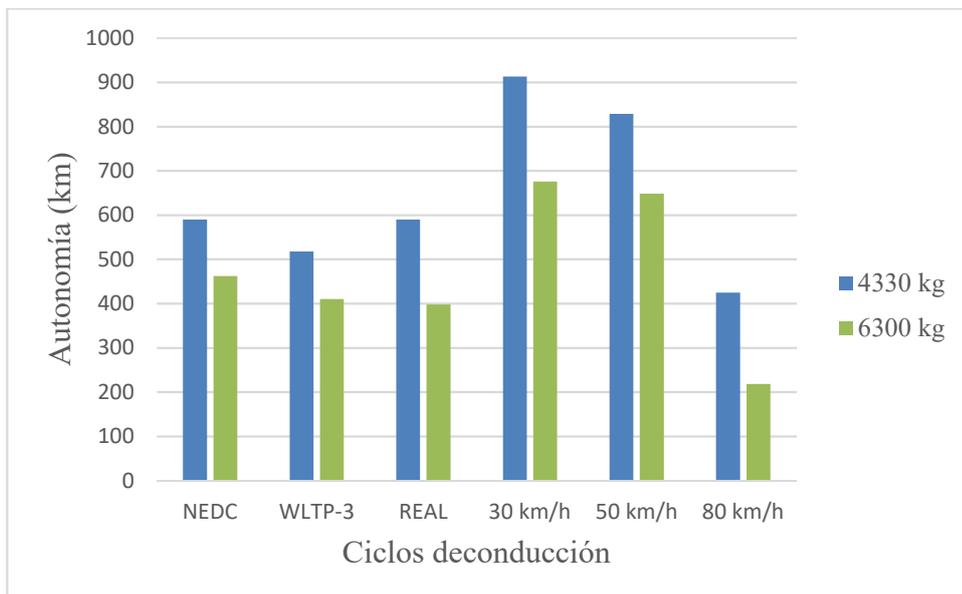


Figura 5-8 Gráfico de barras de autonomía para 200 Ah

Por último, en la Figura 5-9 se presentan los datos de autonomía de la simulación para los mismos ciclos de conducción con la batería de 300 Ah.

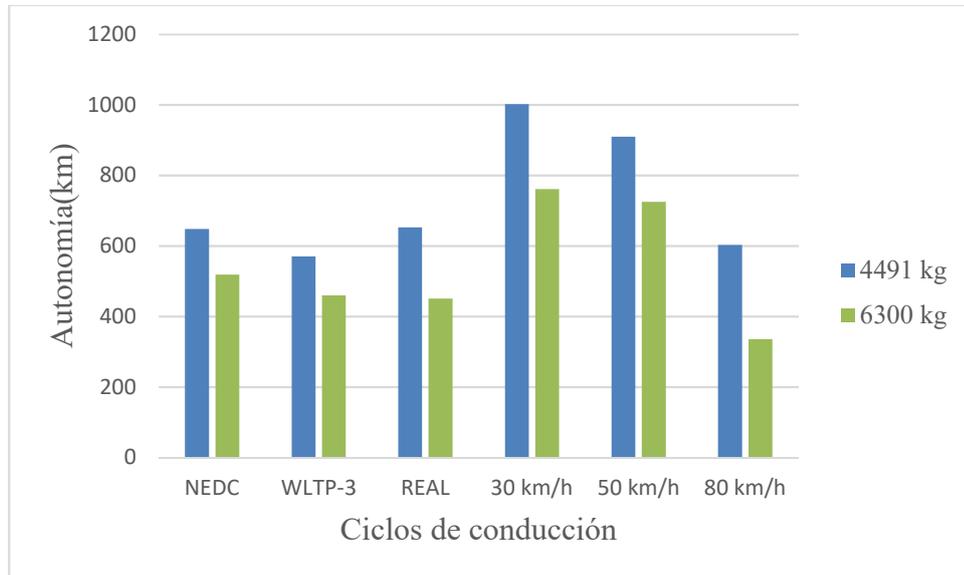


Figura 5-9 Gráfico de barras de autonomía para 300 Ah

A la hora de comparar resultados del modelo híbrido con los resultados iniciales, conviene fijarse en los ciclos homologados en la fecha y el lugar de comercialización del URO VAMTAC original, es decir, el ciclo NEDC que se lleva usando en los últimos años dentro del marco de la Unión Europea, al tratarse de un vehículo de fabricación nacional.

El modelo original tiene un consumo de 17 l/100 km, para un ciclo de homologación NEDC, y cuenta con un tanque de 110 litros [24]. Por lo que su autonomía estará en torno a:

$$d = \frac{110 \text{ l}}{17 \text{ l}/100 \text{ km}} = 6,47 \cdot 100 \text{ km} = 647 \text{ km}$$

La autonomía más próxima en las mismas condiciones de simulación sería la conseguida con una batería de 300 Ah. Sin embargo, hay que tener en cuenta el peso de las baterías que le limita al vehículo la carga máxima que puede transportar.

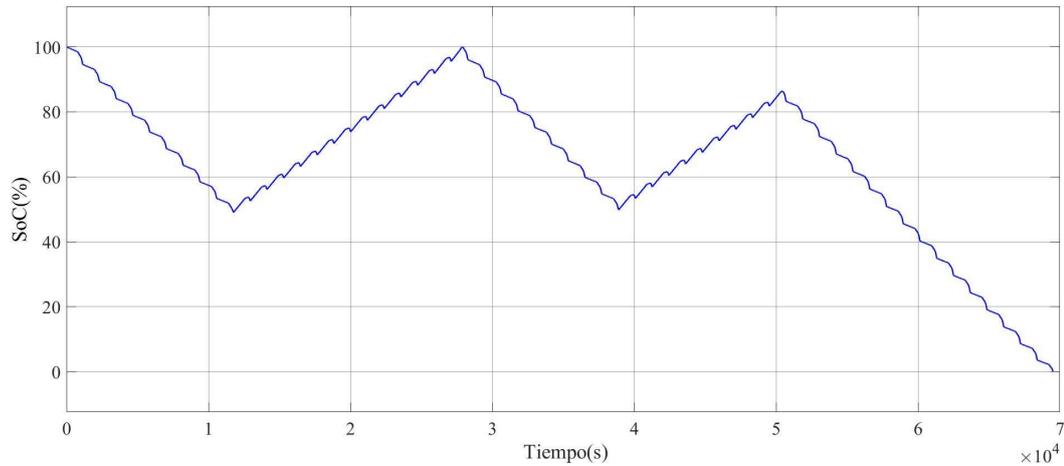
$$m_{\text{máxima}} = 6300 \text{ kg} - 4491 \text{ kg} = 1809 \text{ kg}$$

Se puede concluir en que, aunque se tenga la misma autonomía con el modelo híbrido, el modelo original tendrá una mayor capacidad de carga, aumentando así sus posibilidades de uso.

Por otro lado, un factor limitante de autonomía en los ciclos de conducción homologados es la capacidad del depósito de gasolina, ya que es habitual que estos ciclos no mantengan velocidades elevadas durante largos periodos de tiempo, siendo esta una de las causas principales del mayor gasto energético, valiendo el motor de combustión para cargar las baterías y no solo dar potencia a los motores eléctricos.

Puesto que la prioridad es el uso único de baterías como fuente de energía primaria para los motores eléctricos en ciclos de conducción cotidianos, donde no se recorren largas distancias ni se alcanzan grandes velocidades de forma sostenida, es válida la reducción del depósito de gasolina (60 litros frente a los 110 litros originales) ya que el motor de combustión se usará únicamente para los trayectos de mayor recorrido o cuando la batería no tenga suficiente carga.

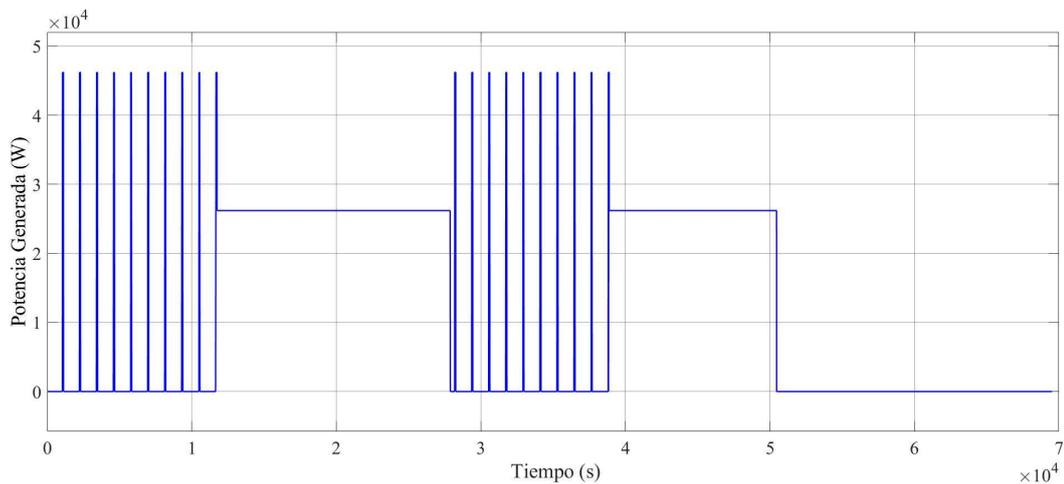
En la Figura 5-10 se muestra el estado de carga de las baterías de 300 Ah para el ciclo de conducción mencionado.



**Figura 5-10 Estado de carga de las baterías de 300 Ah durante el ciclo NEDC**

Se puede observar como al llegar la carga al punto de hibridación del vehículo (50% del “SoC”), comienza el empleo generador que permitirá aumentar la autonomía de forma considerable, recargando las baterías cuando la demanda de potencia de los motores no sea elevada o reduciendo la velocidad de descarga de las mismas cuando se necesite gran potencia. La descarga de batería no sigue un régimen constante dado que durante el ciclo de conducción se producen picos de potencia.

Del mismo modo, en la Figura 5-11 se puede observar la correspondencia de la carga de las baterías en el mismo momento en el que comienza el generador a funcionar de forma constante generando una potencia de 26,2 kW. Por otro lado, tal como se explicó en el punto 4.7, los picos de potencia generada en la gráfica se corresponden con momentos puntuales de gran demanda de potencia (potencias superiores a 80 kW) donde el generador proporciona su potencia máxima, 46,2 kW, durante la descarga de las baterías.



**Figura 5-11 Potencia generada en el ciclo NEDC**

Se puede observar también en ambas figuras como el generador deja de funcionar y, por lo tanto, se para la recarga de baterías en el momento en el que se queda sin combustible, no llegando a recargar por completo las baterías antes de comenzar de nuevo su descarga.

## 5.2 Prestaciones

A la vez que se han obtenido los datos de autonomía y consumo de los ciclos de conducción y capacidades de las baterías, es importante analizar las prestaciones que proporciona el motor eléctrico Siemens® 1PV5135-4WS18 frente al motor de combustión original. Para ello, se han obtenido de la gráfica de máxima potencia del motor eléctrico los puntos más representativos y se han introducido en una hoja de cálculo Excel permitiendo conocer las prestaciones que este motor proporciona frente a las que proporciona el motor de combustión original.

En la Tabla 5-5 están recogidos los datos de las prestaciones del vehículo original y del vehículo híbrido en serie para su masa máxima autorizada:

MMA: 6300 kg		
Prestaciones	Motores eléctricos	Motor diésel
0-100 km/h	21,23 s	34,37 s
0-60 km/h	10,10 s	11,14 s
0-1000 m	40,76 s	46,05 s
V. máxima	161 km/h	136 km/h

**Tabla 5-5 Cálculo de prestaciones con MMA para VAMTAC original e híbrido**

En la Tabla 5-6 están recogidas todas las prestaciones tanto del vehículo original como del vehículo híbrido para las cargas mínimas de las distintas configuraciones de baterías estudiadas:

Tara original MCI: 3500 kg				
Tipo motor	0-100 km/h	0-60 km/h	0-1000 m	V. máxima
MCI	18,48 s	6,83 s	38,43s	136 km/h
Tara con baterías de 160 Ah: 4135 kg				
M. eléctrico	14,05 s	7,08 s	35,66 s	167 km/h
Tara con baterías de 200 Ah: 4330 kg				
M. eléctrico	14,68 s	7,35 s	36,16 s	166 km/h
Tara con baterías de 300 Ah: 4491 kg				
M. eléctrico	15,20 s	7,57 s	36,56 s	166 km/h

**Tabla 5-6 Cálculo de prestaciones en tara para VAMTAC original e híbrido**

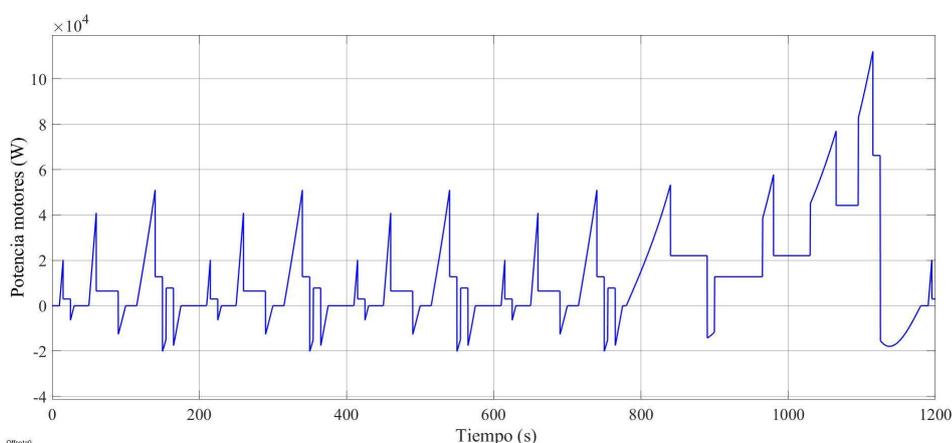
Tal como se puede observar en la Tabla 5-6, el vehículo híbrido tiene una gran ventaja sobre el vehículo original en cuanto a las aceleraciones, debido principalmente al elevado par de los motores eléctricos a bajas revoluciones (Anexo I: motor siemens® 1PV5135-4WS18), además también tiene una velocidad máxima superior ya que es capaz de desarrollar más potencia.

En dicha tabla se puede observar como el vehículo híbrido se encuentra con diferentes cargas mínimas según la batería que monta, se puede observar que en el rango de aceleraciones de 0 a 100 km/h, el vehículo híbrido es más rápido (tiene mayor aceleración), pero que debido a su peso, las

aceleraciones iniciales (0 a 7 s) del vehículo original son ligeramente superiores. En cualquier caso, sea cual sea la carga de baterías el motor eléctrico no solo consigue una mayor velocidad máxima, sino que, en general, es más rápido.

Estos motores de inducción, serán capaces de dar hasta 660 Nm de par y 210 kW cuando funcionen a un régimen máximo no sostenible durante largos periodos de tiempo debido al desgaste del motor y su consumo energético. Su régimen óptimo de operación estará en un par conjunto de 320 Nm y una potencia de 100 kW (Anexo I: motor siemens® 1PV5135-4WS18). Como se ha podido comprobar en el punto 5.1.2, la potencia máxima de los ciclos de conducción estudiados está por debajo de la potencia máxima de los motores, verificando los modelos.

Adicionalmente y obtenido de la simulación hecha en el punto 5.1.2, se puede observar en la Figura 5-12 el régimen de carga que ambos motores tendrían que proporcionar, y la potencia que son capaces de regenerar del vehículo durante un ciclo de conducción NEDC. Siendo la potencia máxima proporcionada de 112 kW de forma puntual durante un breve periodo de tiempo.



**Figura 5-12 Potencia proporcionada y regenerada por los motores eléctricos en el ciclo NEDC**

A continuación, a modo de resumen se detallan las prestaciones finales de los vehículos estudiados sirviendo de comparativa:

Vehículo	Original	Híbrido (300Ah)	Híbrido (200Ah)	Híbrido (150Ah)
Autonomía (km)	647	648	590	575
Consumo (l/100km)	17	9,3	10,2	10,4
Autonomía eléctrica(km)	No procede	107,3	68,9	50,6
V.máxima (km/h)	136	166	166	167
0-100 km/h (s)	18,48	15,20	14,68	14,05
0-60 km/h (s)	6,83	7,57	7,35	7,08
Carga máxima (kg)	2800	1809	1970	2165

**Tabla 5-7 Resumen de prestaciones de las configuraciones del vehículo estudiadas**

## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se definieron dos objetivos, la simulación y el análisis de prestaciones de un vehículo militar híbrido en serie.

Para llegar hasta el primero de los objetivos, se han empleado las ecuaciones que definen la dinámica de un vehículo, las constantes típicas para el cálculo de la eficiencia de los motores eléctricos, las constantes y ecuaciones para el tipo de batería seleccionada y la curva de consumo de un motor de combustión seleccionado, realizando un modelado de todas estas partes en el entorno de Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>. Con estos modelos se ha conseguido realizar diferentes simulaciones, para las distintas configuraciones de baterías elegidas, del URO VAMTAC S3 con los distintos ciclos de conducción definidos. Adicionalmente, se han obtenido resultados de las prestaciones del motor a través de una hoja de cálculo Excel, dando a conocer una visión más global y completa de todas las prestaciones de interés.

Con estos resultados puestos en común al final del proyecto, se ha podido hacer una comparativa de las prestaciones originales del vehículo con las prestaciones calculadas para las distintas configuraciones del modelo.

Se ha llegado a la conclusión de que, en general, se consiguen autonomías muy próximas a las del vehículo original, pero reduciendo el consumo, lo que supone una ventaja logística importante. Además, se mejora la velocidad máxima del vehículo y las aceleraciones que éste puede adquirir. Esto añadido a que, con este vehículo, se podrían obtener las ventajas tácticas que proporcionan los vehículos propulsados con baterías, tales como la discreción gracias al reducido ruido generado por los motores o el elevado par motor que proporcionan en un amplio margen de velocidades.

En definitiva, se trata de un vehículo más rápido, con mayor poder de tracción, con menor consumo y misma autonomía, teniendo como única desventaja el peso añadido de las baterías. Por lo tanto, se han cumplido todos los objetivos propuestos al inicio del presente Trabajo de Fin de Grado con resultados positivos.

### 6.2 Líneas futuras

Como líneas futuras a este proyecto se plantea el análisis de viabilidad del vehículo híbrido según su uso, es decir, qué configuraciones de peso y baterías convendrían adoptar, según los diferentes fines que se busquen con el mismo dentro de la unidad en la que esté asignado.

Pudiéndose ampliar al ámbito presupuestario y económico, con un estudio de rentabilidad ante la sustitución de la actual flota de vehículos URO VAMTAC que hay disponible en las distintas Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado.

Además, se puede realizar un análisis de alternativas al motor de combustión implantado en este trabajo (punto 3.4.2) del que hipotéticamente se partió, así como las diferentes posibilidades de implantación de baterías considerando la cantidad, el peso y la ubicación de las mismas sobre un modelo en tres dimensiones más detallado y preciso.

También podría ser interesante diseñar de forma detallada la modificación del vehículo, estudiando los elementos que han de retirarse del modelo original y diseñar la instalación y ensamblaje de los nuevos elementos.

Sería interesante, además, estudiar la posibilidad de la recarga de baterías desde fuentes de energía renovables, como puede ser la energía fotovoltaica, ya que podría ser de utilidad durante operaciones donde la adquisición de recursos pueda suponer algún riesgo.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.F. M. Sabri, , K.A. Danapalasingam, M.F. Rahmat, A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies, Johor, Malasia: Universidad tecnológica de Malasia, 2015.
- [2] European Comission, «Sustainable, secure and affordable energy for Europeans,» *The European Union explained*, p. 14, 2012.
- [3] Eurostat, «The EU was dependent on energy imports for slightly over half of its consumption in 2014,» Eurostat Press Office, 2016.
- [4] «Eurostat,» junio 2017. [En línea]. Available: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_production\\_and\\_imports/es#Importaciones](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports/es#Importaciones).
- [5] «Agencia Europea de Medioambiente,» 9 octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/es/themes/air/intro#tab-v%C3%A9ase-tambi%C3%A9n>.
- [6] «Agencia Europea de Medioambiente,» 21 agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer>.
- [7] «Universidad de Valladolid,» 10 noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?tag=union-europea>.
- [8] K. Vella, «European Commission,» 17 enero 2018. [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/commission/commissioners/2014-2019/vella/blog/europe-protects-cannot-sit-400000-europeans-die-poor-air-quality-each-year\\_en](https://ec.europa.eu/commission/commissioners/2014-2019/vella/blog/europe-protects-cannot-sit-400000-europeans-die-poor-air-quality-each-year_en).
- [9] Moataz Mahmoud, Ryan Garnett, Mark Ferguson, Pavlos Kanaroglou, Electric buses: A review of alternative powertrains, Hamilton, Canadá: Elsevier, 2015.
- [10] Mayor of London, «Mayor of London: London assembly,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/transport/mayors-new-ps10-toxicity-charge-londons-most-polluting-cars>.
- [11] Transport and Environment, «Transport and Environment,» 26 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://www.transportenvironment.org/news/uk-and-france-end-diesel-petrol-car-sales-2040>.

- [12] Phys, «phys.org,» 16 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://phys.org/news/2016-09-vw-dieseltgate-scandal.html>.
- [13] Anfac, «Las matriculaciones de vehículos eléctricos e híbridos alcanzan las 6.182 unidades en febrero,» Anfac, Madrid, 2018.
- [14] Wisdom Enang, Chris Bannister, Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review), Bath, UK: Elsevier, 2016.
- [15] FITSA (Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil), «Tecnologías de propulsión híbridas y las evidencias científicas de su eficacia,» *Evidencias científicas de la eficacia de las tecnologías*, nº 13, p. 16, 2006.
- [16] Chevrolet, «Chevrolet,» 2018. [En línea]. Available: <http://es.chevrolet.com/electric/volt-plug-in-hybrid>.
- [17] BMW, «Ficha Técnica BMW i3 REX Dynamic Eléctrico Automático,» BMW, 2016.
- [18] BMW, «BMW,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.bmw.es/es/coches-bmw/bmw-i/i3/2017/presentacion.html>.
- [19] Workhorse, «Workhorse,» 2018. [En línea]. Available: <http://workhorse.com/pickup/>.
- [20] Ashok Nedungadi, Robert Smith, Abul Masrur, Quantitative Analysis of a Hybrid Electric HMMWV for Fuel Economy Improvement, Los Angeles, 2012.
- [21] AM General, «AM General,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.amgeneral.com/hmmwv/>.
- [22] «New York Times,» 16 Febrero 2011. [En línea]. Available: <https://wheels.blogs.nytimes.com/2011/02/16/cerv-a-new-kind-of-army-green/>.
- [23] «Revista de la Academia General Militar,» *Armas y Cuerpos*, nº 125, 2012.
- [24] UROVESA, «UROVESA,» [En línea]. Available: <http://www.urovesa.com/es/vamtac.php?tipo=2>.
- [25] J. Larminie, Electric Vehicle technology explained, Oxford, UK: John Wiley and sons, Ltd, 2003.
- [26] Placer, Carlos Casqueiro, Apuntes de la asignatura "Automóviles", Marín: Centro Universitario de la Defensa, 2017.
- [27] Pablo Luque, Daniel Álvarez, Carlos Vera, Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico, Thomsom, 2008.
- [28] M. G. Ruíz, Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos, Pereira, 2015.
- [29] I. L. Kosow, MAQUINAS ELECTRICAS Y TRANSFORMADORES, Reverté, 2013.
- [30] Andy Watts, Andrew Vallance, Andrew Whitehead, Chris Hilton and Al Fraser, The technology and economics of In-Wheel motors, SAE International, 2010.
- [31] V.Alfonsin, A. Suarez, R. Maceiras, A. Sanchez, Modelling and simulation of a zero emission urban bus with battery and fuel cell energy systems under real conditions, 2016: Defense University Center,ENM, Marín.
- [32] David Linden, Thomas Reddy, Handbook of batteries, McGraw Hill, 2001.

- [33] J. M. Bertran, Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas, Barcelona: Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona, 2017.
- [34] C. Peña Ordóñez, Estudio de baterías para vehículos eléctricos, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [35] U. t. F. d. S. María, «Departamento de electrónica de la Universidad técnica Federico de Santa María,» [En línea]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>.
- [36] Francisco Díaz-González, Adreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, An introduction to modern power systems, John wiley, 2016.
- [37] Guillermo Lareo Calviño, Miguel Ángel Álvarez Feijoo, Apuntes de la asignatura "Máquinas y Motores Navales", Marín: Centro Universitario de la Defensa, 2017.
- [38] Mathworks, «Mathworks/Matlab,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [39] Mathworks, «Mathworks/Simulink,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>.
- [40] Siemens, «PLM AUTOMATION-SIEMENS,» [En línea]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/es/products/nx/>.
- [41] C. Cubito, F Millo, G. Boccardo, G. Di Pierro, B. Ciuffo, G. Fontaras, S. Serra, M. Otura and G. Trentadue, Impact of Different Driving Cycles and Operating Conditions on CO2 Emissions and Energy Management Strategies of a Euro-6 Hybrid Electric Vehicle, Torino: Politecnico di Torino, 2017.
- [42] UNECE, «United Nations Economic Commission for Europe,» UNECE, 2018. [En línea]. Available: <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=2523179>.
- [43] Sonja Schmidt, EcoTest: Testing and Assessment Protocol. Version 3.2, Munich: ADAC, 2015.
- [44] Thunder-sky Winston, «Winston battery,» Shenzhen Smart Lion Power Battery Limited, [En línea]. Available: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery>.



## ANEXO I: MOTOR SIEMENS® 1PV5135-4WS18

# SIEMENS

### Drive Motor 1PV5135-4WS18



Type	AC Induction Motor
Cooling Media	Water-Glycol
Rated Voltage DC	300 V
Rated Power	50 KW
Rated Torque	160 Nm
Max. Torque	330 Nm @ 350A
Rated Current	190 A
Max. Speed	10,000 rpm
Weight	90 kg
Dim. (LxWxH)	425 x 245 x 245 mm
Ambient Temperature	- 30 °C to 70 °C
Degree of Protection	IP 65 / 9k



©Siemens ©2011  
Industry Sector DT LD T HD, 03/2011

DS\_Comp\_AM...ppt

The information provided in this brochure contains merely general descriptions or characteristics of performance, which in actual case of use do not always apply as described or which may change as a result of further development of the products. An obligation to provide the respective characteristics shall only exist if expressly agreed in the terms of contract.

Figura A1-1 Hoja de características del motor Siemens 1PV5135-4WS18

# ANEXO II: BATERÍAS THUNDER SKY WINSTON®



**Thunder Sky Winston**

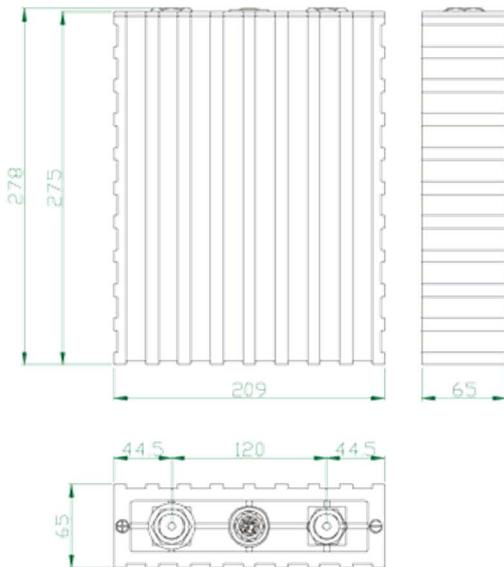
Address: Winston Industrial Park, Third Industrial Zone, Lisonglang Village,  
Gongming Town, Shenzhen, Guangdong P.R.C  
Tel: +86-755-8602 6789 Fax: +86-755-8602 6678  
Http: //www.thundersky-winston.com  
tw@winston-battery.com (貿易服務); tw@thunder-sky.com (技術服務)

## 雷天温斯頓稀土鋰動力電池性能說明 THUNDER SKY WINSTON RARE EARTH LITHIUM ION BATTERY SPECIFICATION

### 單體電池尺寸 DIMENSIONS



型号(MODEL): WB-LYP160AHA



### 技術參數 SPECIFICATIONS

型號(MODEL)	WB-LYP160AHA(B)	
標稱容量 Nominal Capacity	160AH	
規格 SPEC	長 L	209mm
	寬 W	65mm
	高 H	278mm
工作電壓 Operation Voltage	充電 Charge	4.0(V)
	放電 Discharge	2.8(V)
內阻 Internal resistance	≤0.4(mΩ)	
最大放電電流 Max Discharge Current	恒電流 Constant Current	≤3CA
	脈衝試 Impulse Current	≤10CA
最大充電電流 Max Charge Current	480A(3CA)	
標準充電電流 Standard Charge/ Discharge Current	80A(0.5CA)	
循環壽命 Cycle Life	(80%DOD)	≥5000Times
	(70%DOD)	≥7000Times
殼體耐溫性 Temperature Durability Of Case	≤200°C	
適應環境 Operating Temperature	充電 Charge	-45°C ~ 85°C
	放電 Discharge	
	存儲濕度 Storage Humidity	≤75%RH
自放電率(月) Self-discharge Rate	≤1% (月/Monthly)	
單體電池重量 Weight	5.7kg ± 150g	

Figura A2-1 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 160 Ah [44]



## 雷天温斯頓稀土鋰動力電池性能說明

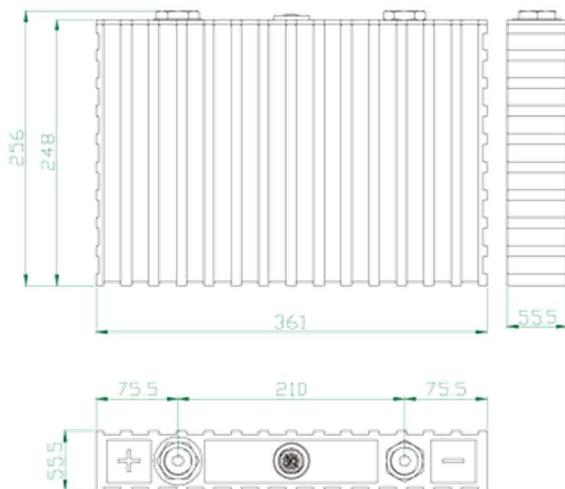
### THUNDER SKY WINSTON RARE EARTH LITHIUM ION BATTERY SPECIFICATION

#### 單體電池尺寸

#### DIMENSIONS



型號(MODEL): WB-LYP200AHA



#### 技術參數

#### SPECIFICATIONS

型號(MODEL)	WB-LYP200AHA	
標稱容量 Nominal Capacity	200AH	
規格 SPEC	長 L	361mm
	寬 W	55.2mm
	高 H	256mm
工作電壓 Operation Voltage	充電 Charge	4.0(V)
	放電 Discharge	2.8(V)
內阻 Internal resistance	≤0.35(mΩ)	
最大放電電流 Max Discharge Current	恒電流 Constant Current	≤3CA
	脈衝試 Impulse Current	≤10CA
最大充電電流 Max Charge Current	600A(3CA)	
標準充放電電流 Standard Charge/ Discharge Current	100A(0.5CA)	
循環壽命 Cycle Life	(80%DOD)	≥5000Times
	(70%DOD)	≥7000Times
殼體耐溫性 Temperature Durability Of Case	≤200°C	
適應環境 Operating Temperature	充電 Charge	-45°C ~ 85°C
	放電 Discharge	
	存儲濕度 Storage Humidity	≤75%RH
自放電率(月) Self-discharge Rate	≤1% (月/Monthly)	
單體電池重量 Weight	7.9kg ± 200g	

Figura A2-2 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 200 Ah [44]

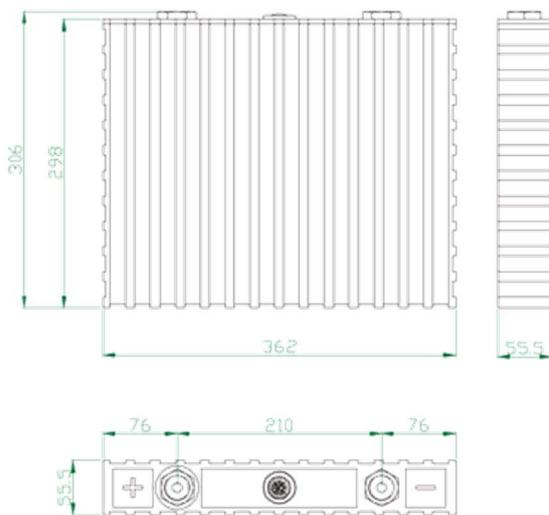


**雷天温斯頓稀土鋰動力電池性能說明**  
**THUNDER SKY WINSTON RARE EARTH LITHIUM ION BATTERY SPECIFICATION**

**單體電池尺寸**  
**DIMENSIONS**



型号(MODEL): WB-LYP300AHA



**技術參數**  
**SPECIFICATIONS**

型號(MODEL)	WB-LYP300AHA	
標稱容量 Nominal Capacity	300AH	
規格 SPEC	長 L	362mm
	寬 W	55.5mm
	高 H	306mm
工作電壓 Operation Voltage	充電 Charge	4.0(V)
	放電 Discharge	2.8(V)
內阻 Internal resistance	≤0.3(mΩ)	
最大放電電流 Max Discharge Current	恒電流 Constant Current	≤3CA
	脈衝試 Impulse Current	≤10CA
最大充電電流 Max Charge Current	900A(3CA)	
標準充放電電流 Standard Charge/ Discharge Current	150A(0.5CA)	
循環壽命 Cycle Life	(80%DOD)	≥5000Times
	(70%DOD)	≥7000Times
殼體耐溫性 Temperature Durability Of Case	≤200°C	
適應環境 Operating Temperature	充電 Charge	-45°C ~ 85°C
	放電 Discharge	
	存儲濕度 Storage Humidity	≤75%RH
自放電率(月) Self-discharge Rate	≤1% (月/Monthly)	
單體電池重量 Weight	9.7kg ± 250g	

Figura A2-3 Hoja de características de la batería Thunder Sky Winston de 300 Ah [44]

## ANEXO III: PRESTACIONES DE LOS MOTORES

<b>Primer Vehículo</b>						
Marca y Modelo		<i>URO VAMTAC Híbrido 160Ah</i>				
Dimensiones y Pesos			Condiciones Especiales			
Peso en orden de marcha	(kg)	4135	Velocidad del viento	(km/h)	0	
Superficie frontal	(m <sup>2</sup> )	3,100	Pendiente de la carretera	(%)	0	
CX		0,57	(signo positivo: condiciones favorables)			
Motor (curvas de motor)			Prestaciones			
(Max. 25 puntos, recomendado más de 10)			(Calculadas con los datos indicados)			
r.p.m.	C.V.	Nm	Aceleraciones			
1000	100	702,200	0-100Km/h (s)		14,055	
1500	136	636,661	0-200Km/h (s)		infinito	
2000	190	667,090	De	0	a	60 Km/h
2500	215	603,892	0-400m (s)		19,722	
3000	285	667,090	0-1000m (s)		35,659	
3500	275	551,729	0- x Km/h			
4000	270	473,985	x (Km/h)		t (s)	
5000	260	365,144	130		24,189	
6000	240	280,880	0- x metros			
8000	185	162,384	x (m)		t (s)	
10000	140	98,308	350		18,184	
		0,000	Velocidad máxima			
		0,000	167 Km/h en IV velocidad		a 7422 rpm	
		0,000	Adelantamientos			
		0,000	80-120 Km/h		t (s)	
		0,000	Marcha		IV	10,608
		0,000			V	infinito
		0,000			VI	no disponible
		0,000	De	80	a	120 Km/h
		0,000	en 4 <sup>a</sup> velocidad :		10,608	
		0,000	Cambio de marcha óptimo(rpm-Km/h)			
		0,000	1 <sup>o</sup> -2 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup> -3 <sup>o</sup>	3 <sup>o</sup> -4 <sup>o</sup>	4 <sup>o</sup> -5 <sup>o</sup>
		0,000	1000	1000	1000	13400
		0,000	22,5	22,5	22,5	301,5
		0,000				13400
		0,000				301,5
Transmisión						
Velocidad			I	II	III	IV
Relación de Cambio(km/h*1000rpm)			22,5	22,5	22,5	22,5
Rendimiento			0,950	0,950	0,950	0,950
Energía cinética rotación/traslación			0,070	0,070	0,070	0,060
tiempo de un cambio de marcha			0,65			rpm de arranque
						1000

Figura A3-1 Hoja de cálculo de prestaciones del motor del vehículo híbrido (160 Ah)









