

DIMENSIONAMIENTO DE LA CADENA DE TRACCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA DISTINTOS ESCENARIOS EN ENTORNO URBANO

RESUMEN

El objetivo del proyecto es el diseño de la cadena de tracción de un vehículo eléctrico, diseño que se ha llevado a cabo seleccionando en un banco de datos los distintos elementos que la componen: baterías, motor eléctrico y accionamientos mecánicos para la transmisión del movimiento. Se han optimizado varios modelos según el escenario de demanda correspondiente: vehículo de uso particular, vehículo tipo taxi o vehículo de transporte de mercancías.

Las distintas configuraciones se han dimensionado y simulado con el programa Advisor. Mediante iteraciones en el diseño de los vehículos, modificando sucesivamente las baterías y motores, se han seleccionado aquellos que cumplen las exigencias de los ciclos de funcionamiento con un consumo energético mínimo.

Pese al menor consumo energético del coche eléctrico frente al coche térmico, hay que tener en cuenta que la producción y transporte de electricidad es energéticamente menos eficiente que la extracción, refino y distribución de los combustibles fósiles. Evidentemente, lo que realmente cuenta es el consumo de la energía disponible en el medio que es destinada al transporte, en nuestro caso al transporte en entorno urbano.

Para ello se hace necesario una comparación de la eficiencia y el consumo “del pozo a la rueda” para los vehículos estudiados eléctricos frente a los actuales térmicos. También se realiza una distinción entre consumo de energías renovables y limpias y el consumo de energías no renovables y contaminantes.

Complementando lo anterior, se realiza un pequeño estudio del coste de mantenimiento de dichos vehículos frente a los actuales de combustión interna, basándonos en el precio del Kwh eléctrico y de los combustibles fósiles.

Finalmente se comentará la limitación de los resultados obtenidos, las nuevas tendencias en movilidad eléctrica, las ventajas cualitativas del uso del coche eléctrico y las áreas de investigación prioritarias en este campo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO.....	13
2.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y CONDICIONES DE PARTIDA PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA.....	13
2.1.1. Vehículos particulares y vehículos tipo taxi.....	13
2.1.2. Vehículos de reparto de mercancías.....	13
2.2. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO UTILIZADOS.....	14
2.2.1. Vehículos particulares.....	14
2.2.2. Vehículos tipo taxi.....	15
2.2.3. Vehículos de reparto de mercancías.....	16
2.3. MODO DE APROXIMACIÓN ITERATIVO A LA SOLUCIÓN ÓPTIMA.....	17
3. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA ADVISOR.....	21
3.1. VEHÍCULO PARTICULAR.....	21
3.2. VEHÍCULO TIPO TAXI.....	23
3.3. VEHÍCULO DE REPARTO DE MERCANCÍAS.....	24
3.4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	26
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	28
4.1. ANÁLISIS ENERGÉTICO. CONSUMO DE ENERGÍAS PRIMARIAS.....	28
4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO. COSTE DE MANTENIMIENTO.....	39
5. CONCLUSIONES.....	44
6. BIBLIOGRAFÍA.....	47
7. ANEXOS.....	51
7.1. CITYELEC. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	51
7.2. PROGRAMA ADVISOR.....	57
7.3. TIPOS DE BATERÍAS.....	84
7.4. TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS.....	89
7.5. TABLA DE RESULTADOS OBTENIDOS CON ADVISOR.....	97
7.6. CONSUMOS DE VEHÍCULOS TÉRMICOS.....	100
7.7. MIX DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD.....	103

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se encuadra en el proyecto Cityelec¹ (Proyecto Singular Estratégico para la Electrificación de la Movilidad en Entorno Urbano), que cuenta con la participación de entidades privadas y públicas, nacionales e internacionales. El objetivo del proyecto Cityelec es buscar soluciones para la entrada de nuevos sistemas de movilidad de personas y mercancías en entorno urbano de forma eficiente y limpia[2].

Dentro de dicho contexto, el objetivo de este proyecto es el de optimizar y analizar energéticamente tres tipos de vehículos:

- vehículo particular tipo turismo
- vehículo para el transporte de pasajeros tipo taxi
- vehículo destinado al transporte de mercancías.

Para llegar a conocer las configuraciones óptimas se iterará en la selección de los componentes, primero en las baterías y luego en la elección del motor, ensayándolos en los ciclos de funcionamiento específicos de cada escenario de demanda. Estos escenarios de demanda han sido establecidos anteriormente al inicio del desarrollo de este proyecto. De esta manera se consiguen varios conjuntos óptimos de baterías y motor. Este proceso se ha llevado a cabo para encontrar un vehículo optimizado energéticamente con baterías² de níquel-metal-hidruro, plomo-ácido e Ion-litio, siempre y cuando la secuencia de iteraciones se estuviese dirigiendo hacia una solución factible. Posteriormente se escogerá entre las soluciones optimizadas aquella que presente un menor consumo de energía.

El software usado para escoger los diseños, simularlos en los diferentes ciclos de funcionamiento y conocer los resultados es el programa Advisor³. Dicho programa está basado en Simulink, el cual a su vez trabaja en entorno de Matlab. En él disponemos de un interfaz gráfico en el cual seleccionamos las configuraciones de los vehículos, y los ciclos en los cuales se van a simular, de entre un cierto número de opciones

¹ Anexo 6.1

² Anexo 6.3

³ Anexo 6.2

predefinidas en el programa, cada una con unas características propias expresadas en las relaciones matemáticas incluidas en el modelado por bloques del vehículo.

Este proyecto incluye la selección de componentes y otras características a través del interfaz gráfico de Advisor. Los elementos seleccionados y dimensionados en cada iteración han sido las baterías y los motores⁴, ya que el resto de parámetros han sido fijados como los más adecuados para el funcionamiento correcto y económico del vehículo. Con respecto a las baterías, se ha seleccionado el tipo de tecnología y el modelo específico dentro de la misma, y el número de módulos a instalar en el vehículo; en lo referente a los motores se ha escogido uno de entre los motores eléctricos que estaban incluidos en el banco de datos.

No se han construido modelos matemáticos para poder trabajar con nuevos tipos de baterías o motores eléctricos, sino que únicamente se han seleccionado y dimensionado estos últimos.

Los ciclos de funcionamiento en los cuales se ensayan los vehículos han sido elegidos en otros trabajos previos a este proyecto como los más representativos e indicados para los escenarios de demanda de movilidad en los que aquí se trabaja.

Tras las simulaciones el programa nos ofrece los resultados de consumo energético a los 100 Km., así como los datos de consumo y de rendimiento en cada uno de los elementos escogidos para el vehículo: baterías. Los resultados se han comparado con otras configuraciones cercanas a la escogida, con otro número de baterías y con otros motores, sirviendo esto como un análisis de sensibilidad de los resultados en términos de consumo del vehículo.

En el caso de los vehículos de uso particular se ha ensayado el vehículo en varios ciclos de funcionamiento consecutivamente, proponiendo 3 y 5 ciclos como las posibles alternativas de funcionamiento.

Los resultados de consumos energéticos en los vehículos finales escogidos para cada escenario se han referido a energía primaria consumida; dichos cálculos han tenido en cuenta los rendimientos de generación de la electricidad, rendimiento de transporte y distribución de la energía eléctrica y rendimiento del convertidor electrónico de potencia, al cual se conectaría la batería. Estos datos de consumo también se han

⁴ Anexo 6.4

comparado con los datos de los vehículos de combustión interna homólogos; en estos últimos también se ha calculado el consumo de energía primaria a través de los correspondientes rendimientos de extracción del petróleo, posterior refinado para obtener gasolina o diésel y del proceso de transporte y distribución de dichos combustibles hasta los puntos de recarga actuales. La energía primaria utilizada en los vehículos eléctricos puede provenir de fuentes de energía renovables o no renovables, mientras que la energía primaria usada en los vehículos térmicos es siempre de origen no renovable. De esta manera, el interés no está únicamente en el desarrollo energéticamente eficiente de la electrificación del transporte, sino en que la energía consumida en los vehículos eléctricos tenga como origen energías limpias en la mayor proporción posible.

Para realizar un análisis similar al análisis 'del pozo a la rueda' se han tenido en cuenta los datos de consumo eléctrico a los 100 Km. de los vehículos eléctricos frente al consumo de combustible a los 100 Km. de sus análogos térmicos. Las parejas de vehículos comparadas en cada caso no producen la misma energía mecánica útil, sino que cumplen la misma función de demanda de movilidad (expresada a través de los ciclos de funcionamiento); por esto el cálculo realizado para hallar la energía primaria consumida no puede considerarse un cálculo de la eficiencia 'del pozo a la rueda', sino una aproximación al mismo. Pese a esto, dicho cálculo tiene en cuenta que los vehículos se adaptan con eficiencias distintas a los ciclos de funcionamiento, por lo que no se puede considerar que los motores térmicos funcionen a su rendimiento máximo y no sería de esta manera conveniente realizar un cálculo de eficiencia 'del pozo a la rueda' con los valores de entorno al 20% de rendimiento para los motores térmicos. Este análisis se ha realizado para las soluciones de diseño escogidas, representando en cada una de éstas el consumo en términos de energía primaria consumida y de energía primaria no renovable consumida.

En el caso de los vehículos de reparto de mercancías el consumo comparado no ha sido el consumo de los vehículos a los 100 Km. de funcionamiento sino el consumo por tonelada de mercancía en 100 Km. de recorrido. Se ha escogido realizar el análisis de esta manera atendiendo al hecho de que al repartidor le interesa transportar una cierta cantidad de mercancía un cierto número de Km., y le interesa saber el coste de

realizar dicha operación. Calculando únicamente el consumo de los vehículos utilizados no mostraríamos la eficiencia en cuanto a transporte de mercancías (energía / Kg. transportado). Para tratar de optimizar, o por lo menos marcar una dirección de mejora de este ratio de eficiencia, se han diseñado dos tipos de furgonetas, una grande (3500 MMA) y otra mediana (2500 MMA); realizando en ambos vehículos los cálculos de consumo de energías primarias anteriormente explicados. Además del consumo energético por kg de carga transportado, en este caso también deberíamos fijarnos en los aspectos logísticos referentes a ambos modelos optimizados, pues no es lo mismo la circulación en ciudad de una furgoneta mediana que la de una grande, ni la facilidad de realizar la carga y descarga encontrando los espacios dispuestos a tal fin, como tampoco es irrelevante el tamaño de la flota a gestionar por el transportista. Pese a su importancia, estos aspectos no serán tratados al estar fuera del alcance del proyecto.

El consumo energético de los vehículos térmicos análogos en cuanto a función se ha aproximado de manera estadística tomando los datos de sus consumos en funcionamiento urbano; dichos consumos se pueden traducir a unidades de energía, pudiéndose comparar de esta manera con el consumo eléctrico de los vehículos diseñados.

En la primera sección del cuerpo de la memoria se comentará la metodología usada para el diseño en pos de un consumo óptimo; valiéndonos del programa Advisor. En la siguiente se expondrán los resultados alcanzados, detallando los mismos en cuanto a consumos y otras características energéticas. Posteriormente se verá cómo cambian los resultados obtenidos variando ligeramente los parámetros de diseño. En la penúltima de las secciones se estudiará el consumo de energías primarias para los vehículos diseñados y para sus análogos térmicos, realizando antes una breve explicación de los cálculos requeridos para ello. Por último se explicarán las conclusiones del estudio a la luz del interés global en las tecnologías de transporte limpias y eficientes.

2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

2.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y CONDICIONES DE PARTIDA PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA

2.1.1. Vehículos particulares y vehículos tipo taxi

El criterio de selección para estas dos tipologías es el mismo: para ambos ciclos de funcionamiento seleccionaremos los parámetros de diseño que permitan reducir al máximo el consumo de los vehículos a la vez que hagan cumplir las exigencias de autonomía y prestaciones. El chasis seleccionado ha sido uno de tamaño y características semejantes al de un vehículo térmico tipo turismo de tamaño medio. Por ello, en la simulación se permite transportar en ambos casos unas cargas similares a las de los vehículos térmicos análogos. En el caso de que los consumos energéticos coincidan, se seleccionará la configuración cuyo rendimiento sea mayor. Dicho rendimiento viene expresado como pérdidas en el apartado 'Energy Use Figure', por lo que escogeremos aquel que presente un menor valor de pérdidas.

Para el vehículo de uso particular estableceremos una carga de 136 Kg, correspondiente aproximadamente al peso de dos pasajeros, siendo un promedio entre la suma del peso de dos hombres y el peso de dos mujeres; se trata de una cifra escogida como representativa en los trayectos urbanos realizados en este tipo de vehículo.

En el caso del vehículo tipo taxi estableceremos una carga de 400 Kg, la cual representa el peso del taxista sumado al de tres pasajeros y sumado al peso de un posible equipaje o pasajero extra.

2.1.2. Vehículos de reparto de mercancías

El criterio básico a la hora de escoger un modelo de este tipo de vehículos es la eficiencia energética con la que realiza el transporte de mercancías, esto es, la energía consumida por kg transportado una distancia de 100 km (el consumo de los vehículos actuales se mide en litros de combustible consumido a los 100 km). Se optimizarán dos tamaños de vehículos: una furgoneta de tamaño medio y otra de mayor tamaño; para la primera estableceremos una masa máxima autorizada de 2500 kg mientras que para la segunda estableceremos 3500 kg de masa máxima autorizada (el máximo peso que puede conducirse poseyendo el carnet B). La masa máxima autorizada es un parámetro que se fijará en el programa Advisor como condición inicial.

A la hora de transportar una cierta cantidad de mercancías lo que importa, desde el punto de vista energético, es realizar el reparto de la totalidad de las mismas con el menor consumo global a lo largo de la ruta de reparto establecida.

Evidentemente, los modelos optimizados deben cumplir con las exigencias en cuanto a autonomía y a prestaciones dinámicas impuestas por el ciclo escogido.

2.2. CICLOS DE FUNCIONAMIENTO UTILIZADOS

Los ciclos de funcionamiento son una herramienta que permite simular las condiciones de uso de diferentes vehículos. A través de la asignación de la velocidad a la que se moverá el vehículo para cada instante de funcionamiento simularemos las condiciones normales de arranque, circulación a velocidad estable y frenada que se producen durante la conducción en entorno urbano de los vehículos analizados.

Para cada escenario de demanda estaba asignado un ciclo diferente. Dichos ciclos son siempre diurnos y se describirán a continuación para cada tipo de vehículo. La recarga se realizaría preferentemente durante las horas valle de la red eléctrica, a lo largo de la noche[5].

2.2.1. Vehículos particulares

Para el vehículo tipo turismo se ha seleccionado un ciclo que simula el uso del autocar para ir y volver del trabajo en periodos de aproximadamente cuarenta minutos, una sola vez al día. En dichos periodos de funcionamiento el coche circula la mayor parte en ciudad, circulando a velocidades de hasta 50 Km/h, pero también lo hace en vías extraurbanas a una velocidad mayor durante algunos minutos en cada trayecto. A continuación se ilustra en su correspondiente gráfica velocidad-tiempo:

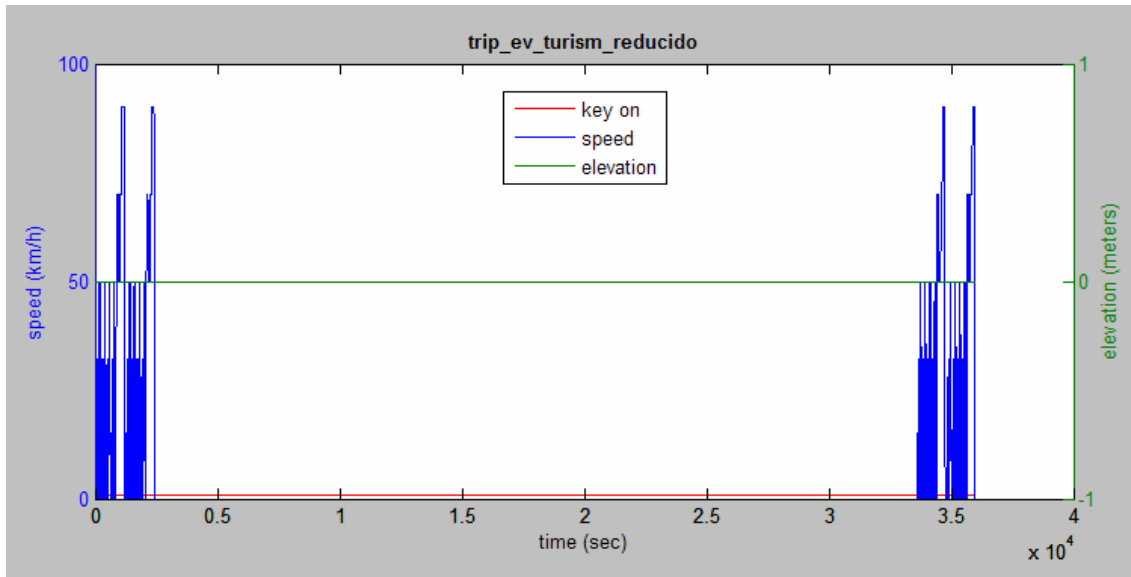


Figura 1. Ciclo de funcionamiento para vehículo particular

2.2.2. Vehículos tipo taxi

En este caso, el ciclo de funcionamiento trata de simular un uso del vehículo similar al de un turismo particular en ciudad pero sin pausas a lo largo de dos periodos de () horas. Trata de representar la jornada laboral de un taxista, 8 horas en circulación con un descanso a mitad de jornada de unas 2 horas. Seguidamente se muestra la gráfica correspondiente:

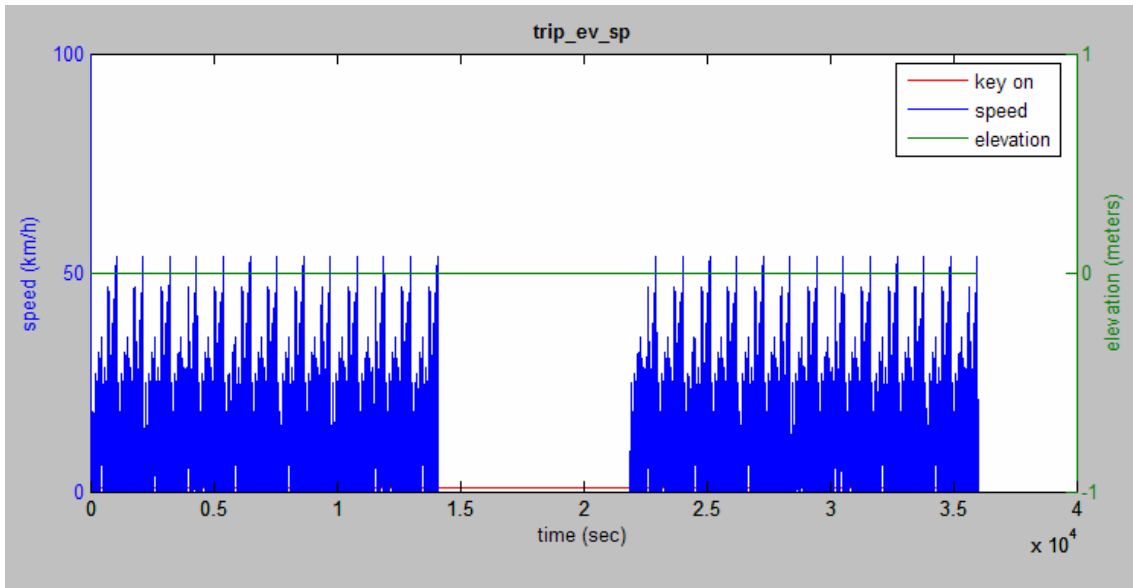


Figura 2. Ciclo de funcionamiento para vehículo tipo taxi

2.2.3. Vehículos de reparto de mercancías

De una manera similar a la del ciclo de funcionamiento del vehículo tipo taxi, este ciclo representa una jornada laboral de reparto de unas 8 horas, excluido el periodo de descanso al mediodía. La velocidad máxima no llega a los 50 Km/h, debido a la carga del vehículo y a la mayor complejidad de circulación conforme aumenta el tamaño de los mismos. A continuación se muestra la gráfica que ilustra este ciclo:

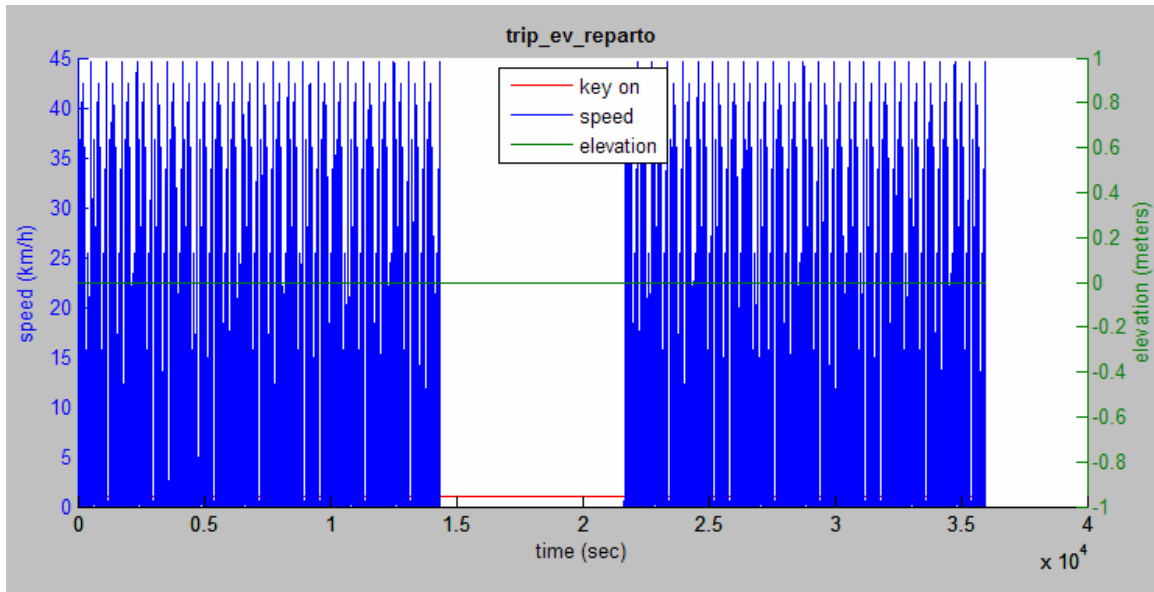


Figura 3. Ciclo de funcionamiento para vehículo de reparto de mercancías

2.3. MODO DE APROXIMACIÓN ITERATIVO A LA SOLUCIÓN ÓPTIMA

Para llegar a una solución óptima o por lo menos cercana a la óptima se ha seleccionado de partida un número de módulos de baterías considerando la autonomía exigida por el ciclo de funcionamiento y el número de repeticiones del mismo sin recargar la batería. Tras ello, se ha seleccionado el motor que llevará el vehículo, atendiendo principalmente a las velocidades y aceleraciones que se requieren en el correspondiente ciclo de funcionamiento y al peso propio del vehículo más la carga considerada. Fijando los demás parámetros de diseño y condiciones de carga se comienza la simulación y se analizan los resultados de la misma. Advisor muestra una pantalla de datos de consumo y emisiones (en el caso de vehículos eléctricos estas últimas siempre son nulas) y otra de aviso de errores en cuanto a cumplimiento del ciclo por parte del vehículo, que pueden ser a causa de no llegar a recorrer los Km establecidos en los ciclos o por no cumplir las prestaciones dinámicas también establecidas por dichos ciclos.

En caso de no haber problemas en lo referente al cumplimiento de las prestaciones establecidas podemos considerar que el motor seleccionado es lo

suficientemente potente (aunque en este caso también podría presentar una potencia excesiva para su uso con el consiguiente alejamiento del punto de rendimiento máximo y de consumo mínimo). De una manera similar, si los resultados muestran que los ciclos se han cumplido en todo su recorrido podremos concluir que la energía almacenada en las baterías es la suficiente. Una configuración que cumpla ambos requisitos de ciclo (prestaciones y autonomía) es una solución de diseño aceptable, pero no tiene por qué ser óptima.

Para aproximarnos desde una solución aceptable hasta una solución cuasi-óptima tendremos dos formas alternativas de proceder al re-diseño del vehículo. La primera sería obtener una solución aceptable en autonomía y, manteniendo sin cambiar el sistema de almacenamiento de energía, probar con diferentes motores hasta dar con el que resulta en un consumo óptimo cumpliendo con las prestaciones exigidas. Posteriormente se reduce el peso de las baterías hasta alcanzar el mínimo peso de vehículo que cumpla con la autonomía. El problema con esta metodología es que la reducción del peso de las baterías puede significar un cambio notable en el peso total del vehículo, el cual puede hacer que el motor seleccionado tenga una potencia redundante para su funcionamiento. La segunda de las alternativas para buscar la minimización del consumo es, a partir de una solución de diseño aceptable, reducir el número de módulos de baterías hasta el mínimo posible. Posteriormente se seleccionan varios motores, de menores y mayores potencias y se ve si alguno de ellos presenta un consumo más reducido que con el motor inicial, cumpliendo además los requisitos de funcionamiento. En caso de no ser así la solución hallada sería la óptima o una cercana a la óptima.

Esta segunda aproximación es mejor en cuanto a que el cambio de motores no altera tanto el peso global del vehículo como la reducción de las baterías, por lo que estaríamos analizando las posibles soluciones manteniendo casi constante el peso global del vehículo, el cual afecta tanto a las exigencias de autonomía como a las de prestaciones. Por ello, éste será el método de aproximación escogido. A continuación se resumen y ordenan los pasos de este método en forma de algoritmo:

1. Para cada tipo de tecnología de batería, encontrar el modelo que permite mayor autonomía con menor peso propio (modelo de mayor densidad energética)
2. Seleccionar dicha batería, estimando el número de módulos inicial teniendo en cuenta el peso del vehículo y la longitud del recorrido
3. Seleccionar inicialmente un motor, estimando su potencia en base a el peso del vehículo y las exigencias dinámicas del ciclo (aceleraciones y velocidades)
4. Escoger ciclo de funcionamiento adecuado
5. Iniciar simulación y analizar los resultados de la misma
 - a. Si cumple autonomía y prestaciones:
 - i. Disminuir el número de módulos de baterías hasta que deje de cumplir dichos requisitos
 - ii. Llegados al tamaño óptimo de batería, realizar la simulación con motores de potencia superior e inferior y ver los resultados:
 1. Peores que con el motor inicial: la solución alcanzada es óptima
 2. Mejores para alguno de los motores probados en 5.1.ii que para el inicial: disminuir si es posible el número de módulos, sino, ésta es la solución de diseño óptima. En caso de poder disminuir el número de módulos, la solución alcanzada también sería la óptima.
 - b. Si no cumple autonomía:
 - i. Aumentar el número de módulos hasta que la cumpla, y posteriormente proceder a partir del apartado a.
 - c. Si no cumple prestaciones
 - i. Aumentar potencia del motor poco a poco hasta que cumpla, y posteriormente proceder a partir del apartado a.
 - d. Si no cumple autonomía ni prestaciones
 - i. Aumentar número de módulos y potencia del motor conjuntamente hasta cumplir uno de los dos requisitos, tras lo cual se procederá a partir de b. o c. En caso de cumplir ambos requisitos se procederá desde a.

Este proceso se repetiría para varios tipos de baterías, escogiendo para nuestros diseños definitivos aquellas que reduzcan el consumo de energía; sin embargo en simulaciones previas al diseño de vehículos se encontraron las baterías que ofrecían una mayor autonomía para un mismo peso. Estas baterías son las que han sido utilizadas en el diseño de cada tipo de vehículo:

- Tecnología plomo-ácido:
 - 'Pb_104'; batería de pb-ácido de 12V desarrollada por GNB, 104 Ah.
- Tecnología níquel-metal-hidruro
 - 'Nimh93'; batería NiMH de 93 Ah, tecnología 'ovonic'⁵.
 - 'Nimh_90_ovonic'; batería NiMH de 90 Ah, tecnología 'ovonic'.
- Tecnología ión-litio:
 - 'Li_temp', batería ión litio ventilada de 6 Ah

Como el objetivo es dimensionar el prototipo eléctrico de menor consumo para cada tipología de vehículo, si se encontrase que con seguridad uno de ellos va a tener menor gasto energético que otros vehículos en proceso de diseño (los de diferente tipo de batería), no se continuaría con el diseño iterativo de este vehículo.

⁵ Tecnología que usa un tipo de materiales ('ovónicos'), los cuales se comportan como semiconductores cuando son sometidos a tensión eléctrica bajo ciertas condiciones.

3. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA ADVISOR

3.1. VEHÍCULO PARTICULAR

Se ha ensayado dicho vehículo inicialmente en 5 ciclos, lo cual representa un uso continuado de lunes a viernes sin realizar la recarga de las baterías. Esto implica un recorrido de 211,7 Km antes de recargar el vehículo. Así se permitiría una recarga a un nivel de potencia doméstico durante el fin de semana.

Como chasis se escogió el 'SMCAR' (small car), que representa un chasis para vehículo de tamaño medio-pequeño.

Primeramente se escogieron baterías de plomo-ácido, de 12 V de voltaje nominal, instalándose 25 módulos de las mismas. Se usó un motor 'AC30' (motor trifásico de inducción de jaula de ardilla, corriente alterna de 30 KW de potencia). La simulación arrojó como resultados una insuficiente autonomía y unas prestaciones dinámicas también insuficientes. Los Km recorridos fueron 21,1, una cifra muy inferior al objetivo marcado por los 5 ciclos de funcionamiento. A partir de aquí se intentó buscar el modelo de batería de plomo-ácido que permitiera la mayor autonomía para un mismo peso, es decir, la de mayor densidad energética. Para este caso, la batería que permitía una mayor autonomía era la 'Pb104'. Aún así, el peso de las baterías de este tipo hacían muy pesado y energéticamente poco económico al vehículo: con un peso de cerca de 1000 Kg en baterías, el vehículo sólo podía circular un 60% de la distancia requerida, consumiendo 4,4 litros equivalentes de gasolina (en adelante l.e.g.), lo cual es una cifra demasiado alta para nuestros objetivos.

Tras ello, se pasó a estudiar la viabilidad de realizar el recorrido usando otro tipo de baterías, las de níquel-metal-hidruro. Realizando pruebas para ver cuál modelo era el que presentaba una mejor densidad de energía se vio que para un mismo peso de baterías, las 'Nimh90ovonic' y 'Nimh93' permitían una mayor autonomía implicando un peso global menor del vehículo. Con el modelo 'Nimh93' se aumentó el número de módulos desde 30 módulos (Kg) llegando hasta módulos (Kg), viendo que éste era el mínimo para cumplir las exigencias de autonomía. De partida se había elegido el motor

'AC59', presentando esta configuración un consumo de 3,8 l.e.g.; a partir de aquí se cambió el motor a uno más potente obteniendo un consumo mayor, posteriormente se cambió a un motor de potencia menor, el 'PM49' (motor síncrono de imanes permanentes de 49 KW de potencia nominal) consiguiendo un consumo de 3,6 l.e.g. Con esta configuración de menor potencia se volvió a reducir el número de baterías hasta obtener con 49 módulos de baterías un mejor valor de consumo: **3,5 l.e.g.** Con esta configuración se probó otro motor de potencia inmediatamente inferior, el 'PM32evs' (motor síncrono de imanes permanentes Honda Auxilec de 32 KW), obteniendo 3,6 l.e.g. como resultado. Por esto, la configuración elegida fue la de 49 módulos de 'Nimh93' con el motor 'PM32evs'.

También se buscó la solución con las baterías de litio introducidas en Advisor. Mediante un procedimiento similar, se llegó a la conclusión que estas baterías no eran adecuadas para este escenario de demanda: aumentando hasta 700 módulos, con 794 Kg de peso de baterías, se obtenía un consumo de 3,7 l.e.g. y un recorrido de sólo 161,3 Km. De haber seguido aumentando las baterías para cubrir todo el recorrido el consumo hubiera ascendido aún más, resultando esta configuración notablemente peor que la anterior con baterías de níquel-metal-hidruro.

Con el fin de mejorar los resultados anteriores se estudió también la opción de recargar el vehículo tras 3 ciclos de funcionamiento, los cuales implican un recorrido total de 127 Km. Esto reduciría el tamaño necesario de baterías pero también implicaría tener que realizar una recarga a mitad de semana.

En primer lugar, se buscó una solución de diseño utilizando las baterías de plomo-ácido. Se escogió la tipología 'Pb104' y se propuso inicialmente 25 módulos (750 Kg) y el motor 'PM32evs', de potencia inmediatamente inferior a la del 'PM49'; con esta configuración se obtuvieron 105,9 Km recorridos, con un consumo de 3,9 l.e.g. y cumpliendo con las prestaciones dinámicas exigidas. Por esto, se fue aumentando el número de módulos hasta llegar a cumplir las exigencias de autonomía con 31 módulos (930 Kg). Manteniendo el motor inicial se obtuvo un consumo de **4 l.e.g.**, el mismo que con el motor 'PM49'; con un motor de inducción menos potente, el 'AC30' el consumo ascendía a 4,6 l.e.g. y sólo se recorrían 112,2 Km. Evidentemente, si en la simulación con 5 ciclos el motor 'PM49' tenía un comportamiento más satisfactorio que uno de

potencia mayor, en este último caso también (el peso del vehículo es aún menor, luego necesitamos menos potencia). La elección final entre los dos motores posibles se ha llevado a cabo observando otro indicador, el rendimiento del sistema global, el cual es mayor para el motor 'PM32evs' que para el 'PM49'. Respectivamente, ambos valores de rendimiento son: 0,251 y 0,254. El rendimiento realmente está expresado en pérdidas de energía por rozamiento contra el asfalto más pérdidas aerodinámicas entre energía usada. Por esto, la configuración con el motor 'PM32evs' resulta la elegida por ser más eficiente.

Tomando como punto de partida las baterías de níquel-metal-hidruro 'Nimh93' y el motor escogido anteriormente, el 'PM32evs' se procedió a optimizar de nuevo la cadena de tracción. Escogiendo 25 módulos inicialmente, se tuvo que aumentar hasta 28 módulos (501 Kg) para completar los 127 Km de recorrido; los resultados mostraron un consumo de **3,3 l.e.g.**. También aquí el motor escogido ofreció un menor consumo que otros de potencias inmediatamente inferiores y superiores: 'AC30' y 'PM49'

Usando baterías de litio se consiguió un consumo ligeramente superior al anterior, de 3,4 l.e.g., con 492 módulos de baterías (558 Kg) y el mismo motor que con los otros dos tipos de baterías.

3.2. VEHÍCULO TIPO TAXI

Esta tipología se ha diseñado para cumplir un solo ciclo de funcionamiento antes de la recarga, por lo que estaría toda la jornada funcionando de una manera continuada. La distancia a recorrer en el ciclo es de 112,3 Km. La carga es ajustada a 400 Kg, y se comienza el proceso de dimensionamiento de la cadena de tracción.

En primer lugar, se intentó el diseño con baterías de plomo-ácido. Inicialmente se seleccionaron 25 módulos de 'Pb104' (750 Kg) y el motor 'PM49', obteniendo un consumo de 3,3 l.e.g., y cumpliendo el vehículo las exigencias de autonomía y prestaciones. El número de módulos se fue rebajando hasta alcanzar el mínimo para cumplir las prestaciones y cubrir el total del recorrido con 21 módulos (630 Kg), obteniendo un consumo de 3,2 l.e.g. Llegados a esta solución se cambiaron los

motores por el 'PM32evs' y el 'PM33' y el 'AC59'. Con este último obtenemos un consumo superior y el recorrido no es cubierto: 3,6 l.e.g. y 100,4 Km. Con el motor 'PM33' obtenemos 4,7 l.e.g. y no llegamos a cumplir las exigencias de autonomía (recorre 74 Km) ni de prestaciones. Con el motor 'PM32evs' obtenemos el mismo consumo de combustible, **3,3 l.e.g.**, pero las pérdidas son menores, luego éste es el motor escogido por la mayor eficiencia del sistema.

En segundo lugar, se buscó la optimización del vehículo con baterías del tipo NiMH. Como diseño de partida, se seleccionaron 16 módulos de 'Nimh93' con el motor 'PM49', obteniéndose un consumo de 2,5 l.e.g. y recorriendo una distancia de 103,9 Km cumpliendo las prestaciones requeridas de velocidad y aceleración. Se fue aumentando el número de módulos hasta 18 (322 Kg), obteniéndose un consumo de 2,5 l.e.g.. Llegados a este punto se probó a cambiar el motor anterior por el 'PM32evs', y se obtuvo también 2,5 l.e.g. de consumo, pero el rendimiento era mayor que el de la configuración con el 'PM49'. El motor 'PM58' también implicaba un mayor consumo, y la autonomía no llegaba a lo requerido. De esta manera se escogió la configuración de 18 módulos de 'Nimh93' con el motor 'PM32evs'.

Por último, usando baterías de litio se consiguieron unos resultados muy similares en cuanto a consumo que con las baterías de níquel-metal-hidruro. Concretamente, se llegó a la mejor solución de diseño con 308 módulos (349 KG), motor 'PM49' y **2,5 l.e.g.**

3.3. VEHÍCULO DE REPARTO DE MERCANCÍAS

Este tipo de vehículo también realizará su ciclo de funcionamiento una sola vez, tras lo cual se recargarán las baterías; por su gran peso y por el número de kilómetros a realizar la gran dimensión de las baterías harían inviable la construcción del vehículo. La distancia a recorrer en un ciclo de funcionamiento es de 91,1 Km.

La mayoría de los chasis de los furgones grandes de reparto urbano están diseñados para soportar una masa máxima de vehículo y mercancías de 3500 Kg, por

lo que mientras aumenta el peso de las baterías disminuye la capacidad de carga del vehículo.

Tanto para vehículos eléctricos como para vehículos térmicos de reparto de mercancías uno de los objetivos es reducir el consumo de combustible de las flotas de reparto. Para ello has dos estrategias aumentar el número de vehículos y reducir su capacidad de carga o reducir el número de vehículos y aumentar su capacidad de carga. Para encontrar una solución real hay que tener en cuenta factores tecnológicos, económicos y logísticos. En este proyecto se han comparado dos tipos de vehículos, uno de 2500 Kg y otro de 3500 Kg de MMA, únicamente desde el punto de vista de su consumo energético por carga transportada.

Se comenzó optimizando el modelo de furgón de hasta 3500 Kg de MMA, eligiendo el chasis 'Highlander', cuyas características son las adecuadas para este tipo de camión. Siguiendo la misma dinámica que en las otras tipologías de vehículo, de partida se utilizaron baterías de plomo-ácido para el diseño, escogiendo 35 módulos de 'Pb104', y el motor 'AC124'. Hubo que aumentar hasta 38 módulos para cumplir la autonomía; en este punto se probaron otro motor: 'AC83'; obteniéndose peores consumos que con el 'AC124', y no llegando a cumplir el recorrido. El motor 'AC150' también demostró peor rendimiento en estas condiciones con otro tipo de baterías. Con la solución óptima hallada, se obtiene un consumo de 7,5 l.g.e. El peso del vehículo es de 2693 Kg, por lo que la carga útil sería de 807 Kg. Así, el combustible consumido por tonelada transportada a los 100 Km es de **9,29 l.e.g./TM**.

Usando baterías tipo NiMH y mediante un procedimiento parecido, llegamos al número óptimo de módulos con 40 del tipo 'Nimh90_Ovonic'. El motor usado es también el 'AC124'. El consumo resultante es de 6,9 l.e.g. El peso de este vehículo alcanza los 2221 Kg, por lo que la carga máxima a transportar serían 1279 Kg. De esta manera, el consumo de combustible por tonelada transportada 100 Km es **5,39 l.e.g./TM**

Con baterías de litio, el consumo hallado fue mayor al del vehículo con baterías NiMH, incluso antes de cumplir las exigencias de autonomía. El peso de las baterías también fue mayor, por lo que no se consideró esta solución.

Posteriormente se procedió a optimizar las furgonetas de 2500 Kg de MMA. Para modelar este tipo de vehículo se escogió el chasis 'Smalltruck'.

Con baterías NiMH se comenzó utilizando 25 módulos, llegando a cumplir los requisitos de prestaciones y autonomía con 31 módulos de 'Nimh90_Ovonic' y el motor 'AC75'. El consumo del vehículo fue de 5,3 l.e.g. Llegados a este punto, se probó la misma configuración de baterías con los motores 'AC83', 'AC62' y 'PM58'; en todos estos casos ni las prestaciones dinámicas fueron alcanzadas ni el recorrido establecido fue completado. También se probó a cambiar las baterías 'NiMH90_Ovonic' por las baterías 'Nimh93', siendo la solución en este caso 30 módulos de batería con el motor 'AC75', y el consumo **5,2 l.e.g.** Este último diseño presenta un menor consumo, por lo que será el elegido para realizar los posteriores análisis.

Se procedió a diseñar con baterías de plomo-ácido. Se escogió el modelo 'Pb104', seleccionando 25 módulos, llegando hasta 30 para cumplir las exigencias de autonomía. El consumo del vehículo es de 5,7 l.e.g. con el motor 'ac75'.

Por el mismo procedimiento, en el diseño con baterías de litio se obtuvo igualmente un consumo de 5,2 l.e.g. (492 módulos de baterías con el motor 'AC75') pero el rendimiento del conjunto fue menor (pérdidas de 0,17 frente a pérdidas de 0,165 para el diseño con baterías de NiMH), y por lo tanto el modelo escogido fue el de baterías NiMH.

3.4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para facilitar la exposición de los resultados finales, en la siguiente tabla se recopilan los resultados obtenidos para cada tipo de batería y vehículo:

RESULTADOS DE CONSUMO

	BATERÍAS UTILIZADAS					
	Pb-ácido		NiMH		Ion-litio	
	consumo	motor	consumo	motor	consumo	motor
vehículo particular						
5 ciclos	-		3,5	PM49	-	
3 ciclos	4	PM32evs	3,3	PM32evs	3,4	PM32evs
vehículo tipo taxi						
1ciclo	3,2	PM32evs	2,5	PM32evs	2,5	PM49
vehículo de reparto						
3500 Kg MMA	7,5	AC124	6,9	AC124	-	
2500 Kg MMA	5,7	AC75	5,2	AC75	5,2	AC75

Tabla 1. Resumen de los resultados

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS ENERGÉTICO. CONSUMO DE ENERGÍAS PRIMARIAS

Como ya se ha comentado con anterioridad, el consumo de energía en los vehículos, tanto a través del enchufe de un coche eléctrico como a través del depósito de un coche térmico, hay que referirlo a las energías primarias consumidas para realizar un análisis energético realista de la situación.

Estas energías primarias son el petróleo en el caso del coche térmico y el conjunto de energías primarias empleadas para producir electricidad en el caso del coche eléctrico. Conociendo los rendimientos de producción, transporte y distribución de las energías usadas en estos vehículos (electricidad, gasolina y diésel) podemos considerar en nuestros análisis la cantidad de energía que se ha extraído del medio para llevar a cabo el movimiento de los mismos [3].

Para llevar a cabo el cálculo de las energías primarias se trabajará con los siguientes valores de rendimiento:

Vehículo eléctrico:

- Rendimiento del SIA y del convertidor electrónico de potencia: 97 %
- Rendimiento de transporte y distribución electricidad: 93,7 %
- Rendimiento de generación de electricidad: 35,74 %

Vehículo térmico:

- Rendimiento de transporte y distribución: 94.5%
- Rendimiento de extracción y refinado: 88%

Con estos valores traduciremos la energía eléctrica consumida por la batería durante la recarga en energía primaria extraída del medio. Del mismo modo, la energía introducida en forma de combustible (gasolina o diésel) en los depósitos de los vehículos térmicos se traducirá en energía extraída del medio en forma de petróleo.

Los datos energéticos mostrados por Advisor están expresados en litros equivalentes de gasolina. Teniendo en cuenta que un litro de gasolina tiene un contenido energético de 34,78 MJ, podemos expresar la energía consumida en unidades del sistema internacional.

Habitualmente, para comparar de un modo sencillo las eficiencias de los coches eléctricos con las de los coches térmicos, se realiza un análisis “del pozo a la rueda”, en el cual se obtienen todos los rendimientos desde la extracción de la energía del medio hasta el rendimiento en marcha de los vehículos; posteriormente se multiplican y, suponiendo que ambos desarrollan la misma potencia útil, se obtiene la comparación entre consumos de energía primaria[3]. Un ejemplo típico sería calcular la diferencia de energía consumida a partir del siguiente gráfico[7](los valores de rendimientos utilizados para los cálculos no han sido tomados de aquí):

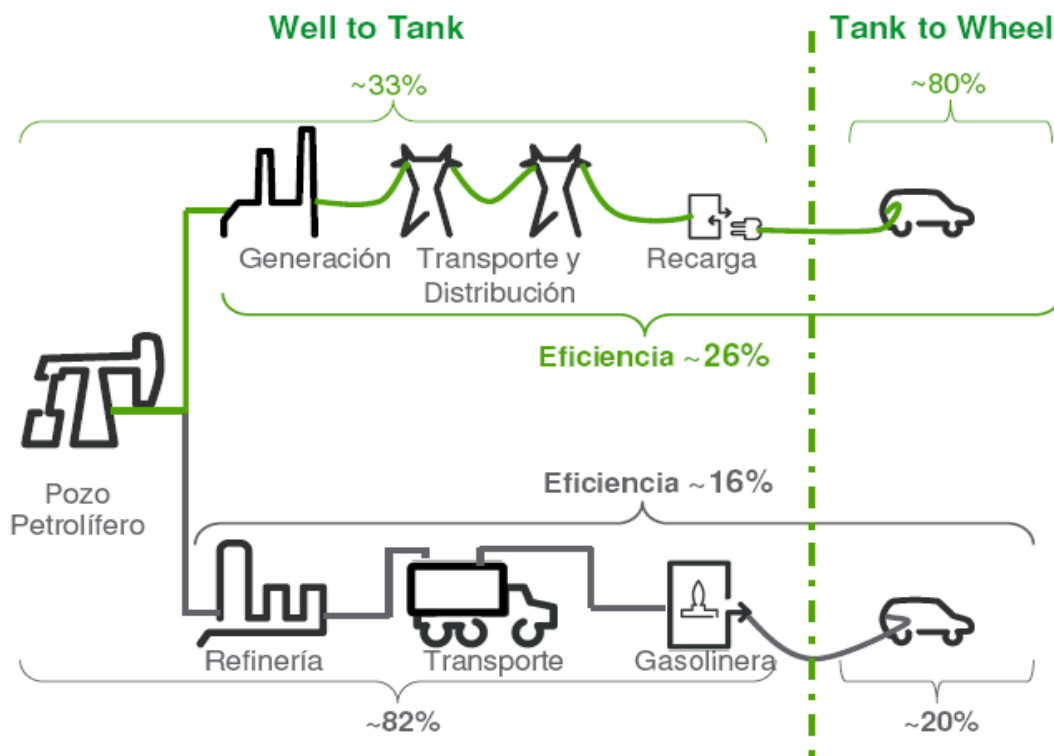


Figura 4. Eficiencia de los coches eléctricos

A partir de dicho gráfico concluiríamos que la energía primaria consumida por los vehículos de combustión interna es un 62,5% mayor que la consumida por los vehículos

térmicos. Este análisis es demasiado simplificado si se busca una comparación más realista, por diferentes motivos.

En primer lugar, la energía útil que ponen en marcha ambos tipos de vehículos no es la misma, por dos razones. Los vehículos eléctricos diseñados lo han sido con vistas al funcionamiento eficiente en los escenarios urbanos seleccionados, mientras que los vehículos particulares y públicos térmicos que circulan hoy en día no alcanzan su mejor rendimiento en funcionamiento urbano (no llegan a ese 20% estimado en el gráfico). En segundo lugar, la energía mecánica útil utilizada por ambos vehículos es diferente (al menos en los vehículos particulares y en los vehículos tipo taxi), al ser diferentes sus pesos estimados. Los vehículos más pesados están desarrollando un trabajo(en unidades de energía) mayor que aquellos menos pesados.

Para evitar corregir estas dos diferencias en el cálculo se ha procedido a medir directamente la energía consumida por ambos tipos de vehículos en su funcionamiento en entorno urbano. Realmente, el análisis aquí realizado no es “del pozo a la rueda”, sino “del pozo al depósito” (“well to tank”), ya que se traduce la energía introducida en las baterías o en el depósito en energía primaria extraída del medio. Otro valor que no tiene porqué ser el indicado en el esquema anterior es el valor del rendimiento de generación de electricidad, que se ha supuesto en dicho gráfico entorno al 40%. Este valor depende de la proporción de cada tipo de fuente de energía en el mix energético de producción de electricidad, pues cada tipo de proceso de generación de electricidad (central termoeléctrica, nuclear, hidráulica, etc.) tiene su propio rendimiento.

A continuación se muestra el mix energético de producción actualizado a 2010⁶, para la generación de electricidad en España [9]:

MIX DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA POR CADA 100 KWH GENERADOS

TIPO TECNOLOGÍA	KWh PRODUCIDOS	RENDIMIENTO TECNOLOGÍA	KWh EXTRAIDOS DEL MEDIO	% ENERGÍA EXTRAIDAS
carbon/fuel/gas/ciclo comb.	31,12	28,90	107,68	38,49
nuclear	20,73	22,30	92,91	33,21
hidráulica	21,03	71,20	29,52	10,56
resto renovables	27,12	54,60	49,65	17,75
	100,00		279,77	

Tabla 2. Mix de producción de energía

⁶ Método de cálculo: Anexo 7.7

Los Kwh. producidos respecto a los Kwh. extraídos del medio informan del rendimiento de generación, cuyo valor es 35,74%.

Una vez explicado esto, se procede a calcular el rendimiento combinado de producción, transporte y distribución de la energía que es almacenada en el vehículo (eléctrico o térmico), es decir, el rendimiento 'well to tank':

Vehículo eléctrico:

$$\eta_{\text{combinado}} = \eta_{\text{generación}} * \eta_{\text{transporte y distribución}} * \eta_{\text{SIA y convertidor electrónico}} =$$
$$35,7\% * 93,7\% * 97\% = \mathbf{32,48\%};$$

Vehículo térmico⁷:

$$\eta_{\text{combinado}} = \eta_{\text{extracción y refino}} * \eta_{\text{transporte y distribución}} = 88\% * 94,5\% = \mathbf{83\%};$$

De esta manera, para calcular la energía extraída del medio a partir de los consumos en depósito (consumo de Kwh. para vehículos eléctricos y consumo de litros de combustible para los térmicos) basta con dividir el consumo entre el rendimiento 'well to tank':

Vehículo eléctrico:

$$\text{Energía extraída} = \text{Consumo} / \eta_{\text{combinado}} = \text{Consumo} / 0,3248;$$

Vehículo térmico⁸:

$$\text{Energía extraída} = \text{Consumo} / \eta_{\text{combinado}} = \text{Consumo} / 0,83;$$

Con estos valores se calculará la energía primaria consumida por aquellos vehículos, entre los diseñados, que presenten un menor consumo energético a la hora

⁷ Fuente: Europa (European Petroleum Industry Association)

⁸ Fuente: Europa (European Petroleum Industry Association)

de realizar sus ciclos de funcionamiento. Los que presentan un menor consumo son aquellos diseñados con baterías de NiMH:

	NiMH	
	consumo	motor
vehículo particular		
5 ciclos	3,5	PM49
3 ciclos	3,3	PM32evs
vehículo tipo taxi		
1ciclo	2,5	PM32evs
vehículo de reparto		
3500 Kg MMA	6,9	AC124
2500 Kg MMA	5,2	AC75

Tabla 3. Consumos de los vehículos seleccionados en I.e.g.

En el caso del vehículo tipo taxi y en el de los vehículos de reparto, los consumos indicados en la Tabla 3 están tomados de la simulación en Advisor con las condiciones de 100% de carga. Por ello, el consumo habitual a los 100 Km sería algo menor, sobre todo en los vehículos de reparto, cuya carga representa un gran porcentaje del peso total del vehículo. Considerando una carga media del 50% o del 70% (hipótesis más conservadora) tendríamos que los datos de consumo presentarían un cierto ‘coeficiente de seguridad’ debido a que el vehículo se ha simulado en condiciones de carga máxima.

Los datos de energía primaria consumida total, energía primaria no renovable, energía primaria renovable y energía primaria emisora de CO₂ se muestran en la siguiente tabla y se ilustran en el gráfico, para los vehículos anteriores:

Antes se ha expuesto la fórmula para obtener la energía extraída del medio a partir del consumo. Para obtener las componentes de esta energía basta con fijarse en los datos del mix de producción de electricidad en España (Tabla 2, pag.26).

- Energía no renovable = (0,3849 + 0,3321) * Energía total
- Energía renovable = (0,1055 + 0,1775) * Energía total
- Energía emisora de CO₂ = 0,3849 * Energía total

Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 4 y la Figura 5:

	ENERGÍA CONSUMIDA		ENERGÍA EXTRAÍDA DEL MEDIO			
	consumo	motor	TOTAL	E. no renovable	E.renovable	Emisoras CO2
vehículo particular						
5 ciclos	3,5	PM49	10,78	7,73	3,05	4,15
3 ciclos	3,3	PM32evs	10,16	7,28	2,88	3,91
vehículo tipo taxi						
1ciclo	2,5	PM32evs	7,70	5,52	2,18	2,96
vehículo de reparto						
3500 Kg MMA	6,9	AC124	21,24	15,23	6,01	8,18
2500 Kg MMA	5,2	AC75	16,01	11,48	4,53	6,16

Tabla 4. Energía extraída del medio por los diferentes modelos (l.e.g.)

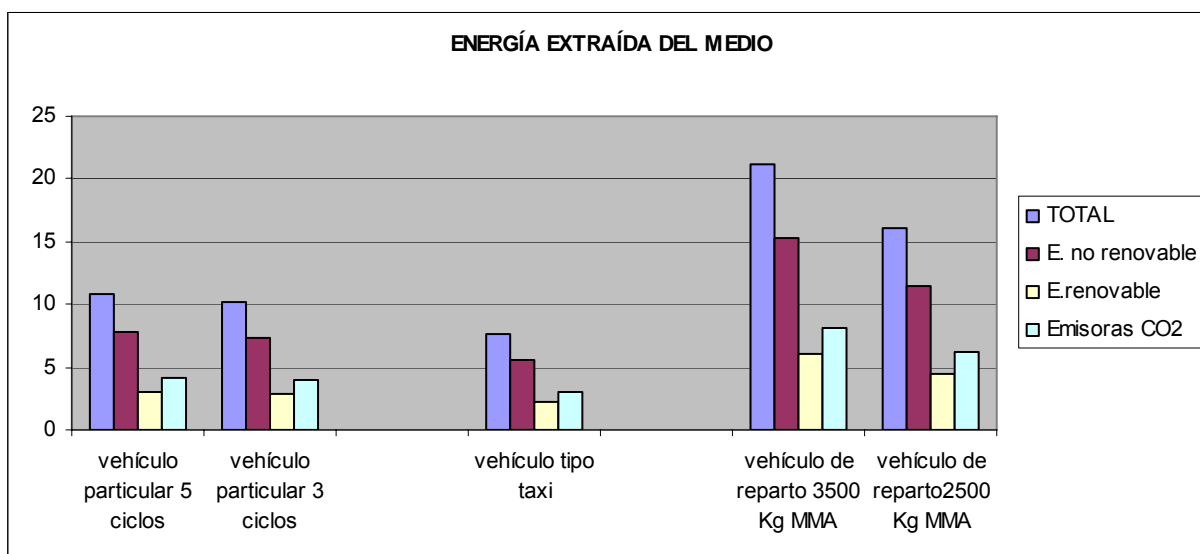


Figura 5. Energía extraída del medio, total, renovable, no renovable y emisoras de CO2

Se recuerda que la energía está expresada en litros equivalentes de gasolina consumidos a los 100 Km.

Una vez analizados los resultados energéticos de los vehículos eléctricos, se paso a analizar los consumos energéticos de los vehículos térmicos análogos[8]. Con este fin, se hizo una media de sus consumos en entorno urbano⁹.

Para el coche térmico análogo al coche eléctrico de uso particular, se ha estimado como una media de los consumos urbanos de coches de tamaño pequeño, de varias marcas. Los coches térmicos estudiados son de tamaño y potencias bajas, lo que

⁹ Anexo 7.6

comúnmente se denominaría un utilitario, un coche funcional utilizado fundamentalmente para trayectos urbanos. Cómodo y suficiente para el transporte de dos pasajeros. Los pesos de los vehículos analizados están entre 750 y 1295 Kg (1047 Kg de promedio).

En el caso del vehículo tipo taxi, debido a las mayores exigencias de carga, se analizaron vehículos de tamaños y potencias medias. Los vehículos analizados en esta comparación presentan pesos entre los 1285 y 1585 Kg (1424,9 Kg de promedio) y potencias entre 105 y 150 CV (125 CV de promedio).

El objetivo es comparar el consumo del vehículo que actualmente satisface un determinado escenario de demanda de transporte con el consumo del vehículo diseñado en este proyecto para conocer las implicaciones energéticas de una posible sustitución de la tecnología usada en el transporte.

Los resultados estimados para los vehículos térmicos en cuanto a consumo [6] se muestran a continuación:

	ENERGÍA CONSUMIDA
vehículo particular	6,18
vehículo tipo taxi	8,63
vehículo de reparto 3500 Kg MMA	12,92
vehículo de reparto 2500 Kg MMA	9,49

Tabla 5. Energía consumida en l.e.g. (vehículos térmicos)

Las unidades están nuevamente en litros de gasolina equivalentes. Estos consumos en litros equivalentes de gasolina representan un mayor consumo (energético) de petróleo, debido a las pérdidas en extracción, transporte, refinado del crudo, etc. Los anteriores consumos representan una cierta energía primaria extraída del medio, la cual es en su totalidad no renovable y emisora de CO₂ y otros gases contaminantes:

	ENERGÍA CONSUMIDA	ENERGÍA EXTRAÍDA
vehículo particular	6,18	7,45
vehículo tipo taxi	8,63	10,40
vehículo de reparto 3500 Kg MMA	12,92	15,57
vehículo de reparto 2500 Kg MMA	9,49	11,43

Tabla 6. Energía primaria utilizada en l.e.g (vehículos térmicos)

A la hora de comparar el consumo de energía en ambas tecnologías hay que tener en cuenta los criterios de selección de los vehículos según su función. Como ya se explicó en el apartado 2.1, para vehículos particulares y vehículos tipo taxi se comparará el consumo a los 100 Km, mientras que en el caso de los vehículos de reparto de mercancías se comparará el consumo por Kg de carga transportado, midiendo así la eficiencia en el transporte de la carga. Para la comparación de los vehículos de reparto de mercancías se han tomado unos cuantos modelos de prestaciones medias con pesos máximos autorizados entorno a 2500 Kg y otros tantos con pesos entorno a 3500 Kg¹⁰.

En la siguiente tabla se muestra el consumo y la energía extraída de los modelos de furgonetas eléctricos diseñados frente a los vehículos de reparto térmicos actuales; los consumos se ilustran en litros equivalentes de gasolina por vehículo y también, como se ha explicado anteriormente, por tonelada de carga transportada:

	FURGON MMA 3500 KG		FURGONETA MMA 2500 KG	
	ELÉCTRICO	TÉRMICO	ELÉCTRICO	TÉRMICO
CONSUMO	6,9	12,92	5,3	9,49
ENERGÍA EXTRAÍDA	21,24	15,57	16,31	11,43
CARGA ÚTIL	1204	1499	659	893
CONSUMO/TM	5,73	8,62	8,04	10,63
ENERGÍA EXTRAÍDA/TM	17,64	10,39	24,75	12,80

Tabla 7. Comparativa de consumos y energía extraída entre los vehículos eléctricos y térmicos

¹⁰ Anexo 7.6

Como se observa en la gráfica, los consumos de los vehículos eléctricos son menores, sin embargo, representan un consumo de energía primaria mayor que en el caso de los análogos térmicos.

Pese a ser mayor, la energía primaria usada en los vehículos eléctricos puede proceder de energías renovables; la proporción de las energías renovables sobre las no renovables aumentaría mejorando el rendimiento de las instalaciones existentes o aumentando la capacidad productiva de las mismas. Como se puede ver en la tabla 1, por cada Kwh. eléctrico consumido, el 71,98% (38,49% de combustibles fósiles y el 33,21% de combustibles nucleares) procede de fuentes de energía no renovables, y sólo el 38,49% procede de fuentes de energía con emisiones de efecto invernadero.

Los siguientes gráficos ilustran los resultados finales en cuanto a consumos de energía, analizando también las distinciones entre tipos de fuentes de energía. En primer lugar se muestran los consumos de energía primaria (en l.e.g.) de vehículos particulares y tipo taxi a los 100 Km y posteriormente se muestran los consumos de los vehículos de reparto por cada tonelada transportada, a los 100 Km:

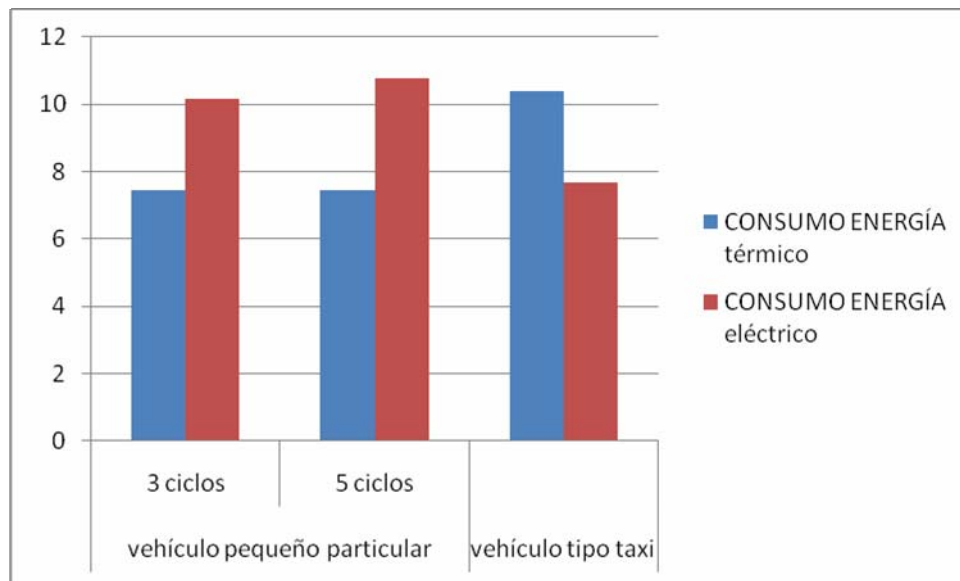


Figura 6. Consumos de energía primaria (vehículo particular y tipo taxi)

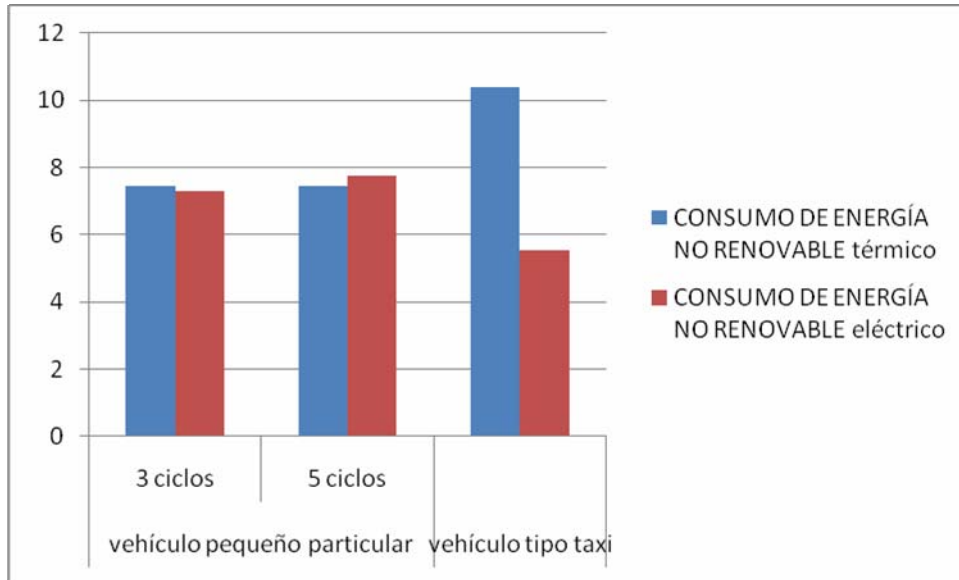


Figura 7. Consumos de energía primaria no renovable (vehículo particular y tipo taxi)

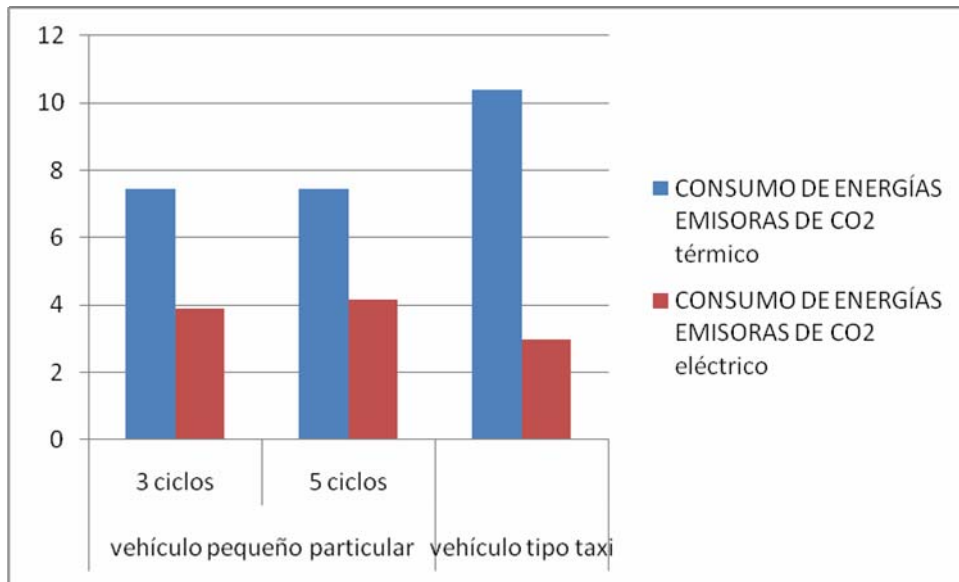


Figura 8. Consumos de energía primaria emisora de CO2 (vehículo particular y tipo taxi)

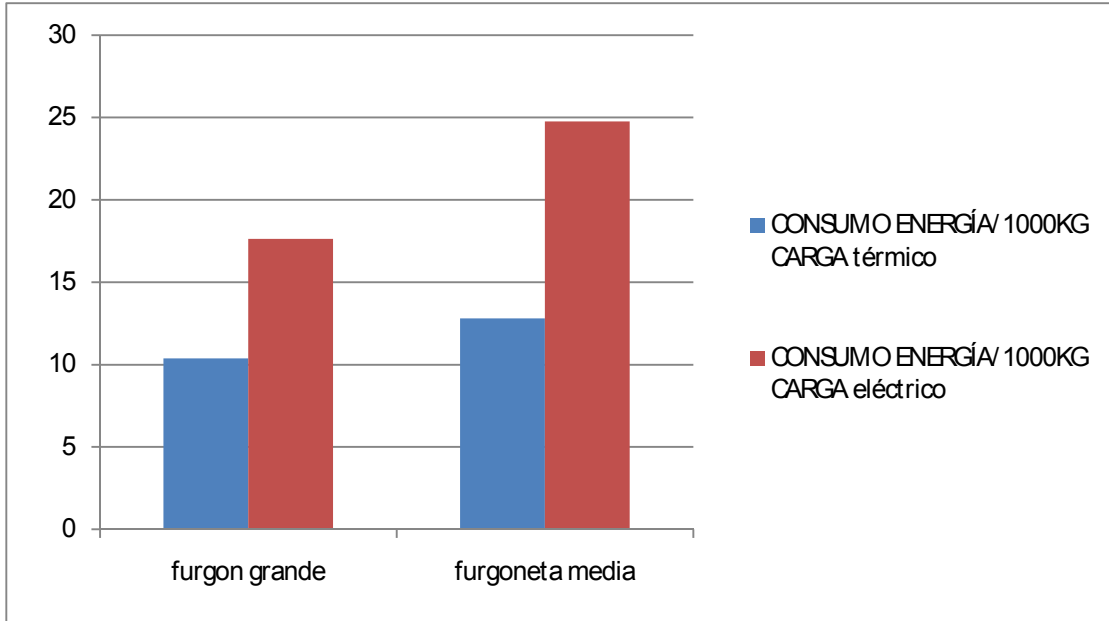


Figura 9. Consumos de energía primaria (vehículo de reparto de mercancías)

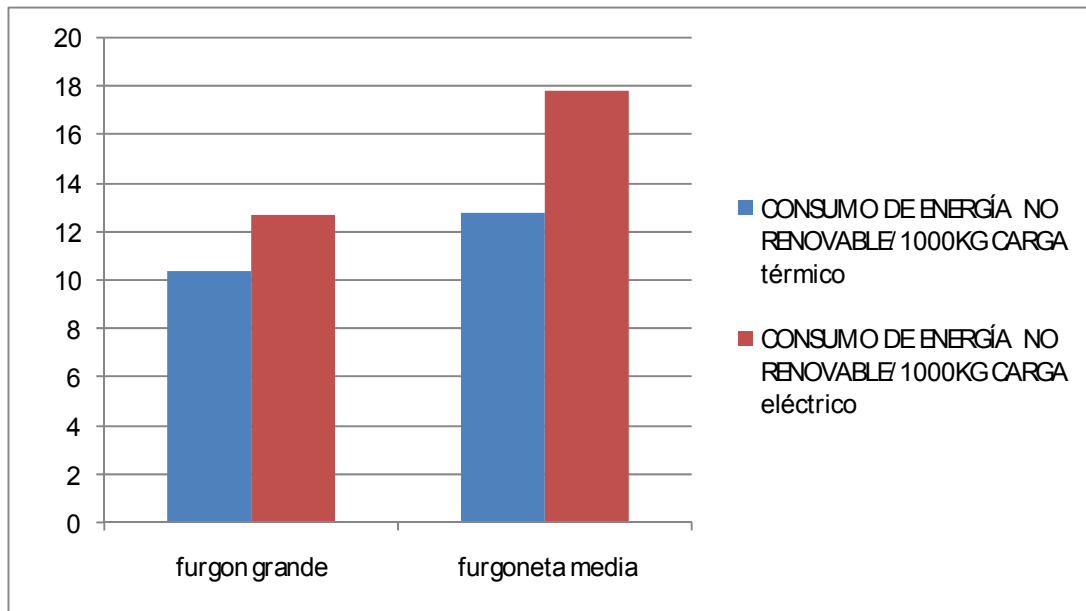


Figura 10. Consumos de energía primaria no renovable(vehículo de reparto de mercancías)

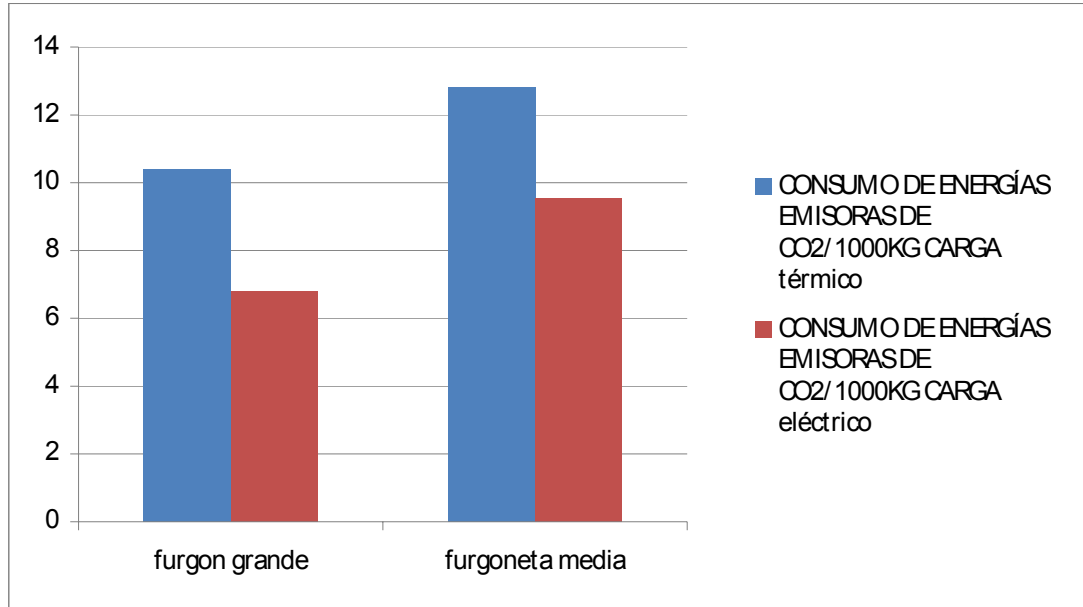


Figura 11. Consumos de energía primaria emisora de CO2(vehículo de reparto de mercancías)

4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO. COSTE DE MANTENIMIENTO

Para complementar el análisis energético se realizó un pequeño análisis económico desde el punto de vista del consumidor. El objeto de dicho análisis es ver si el coste de mantenimiento de los vehículos eléctricos diseñados es menor que el de los equivalentes térmicos que circulan actualmente en entorno urbano.

El cálculo del coste de mantenimiento es muy simplificado ya que sólo se tiene en cuenta el coste del combustible a los 100 Km para los vehículos particulares y vehículos tipo taxi, y el coste de combustible por tonelada de carga transportada a los 100 Km en el caso de vehículos de reparto de mercancías. De esta manera, se omiten reparaciones, compra de complementos o recambios para el vehículo, etc. También se omite la inversión inicial (el coste de compra) en los diferentes vehículos ya que el análisis se realiza en un supuesto contexto de competitividad de las dos tecnologías: se supone un coste inicial y un ciclo de vida similar en ambos casos.

Este escenario es el más sencillo entre los que se podría encontrar el usuario tras una hipotética implantación masiva del coche eléctrico. La inversión inicial del

Estado y de las empresas posiblemente la acabaría pagando el propio consumidor, o en el momento inicial o a través de alguna sobrecarga en la factura mensual.

Para el análisis del coste de mantenimiento se ha comparado el consumo multiplicado por el precio del combustible. En la siguiente tabla se muestran los precios de los combustibles tratados:

	EUROS
<i>coste del litro de gasolina</i>	1,167
<i>coste del litro de diesel</i>	1,092
<i>promedio gasolina/diesel</i>	1,130
<i>coste actual del kWh</i>	0,115

Tabla 8. Coste de los combustibles y del Kwh. eléctrico

El precio del Kwh. se tomó de la tarifa para pequeños consumidores; evidentemente este precio está sujeto a la demanda total de energía y a la proporción de ésta que el consumidor requiere, pero se tomó como una estimación.

El consumo de los vehículos eléctricos diseñados y seleccionados se calculó en Kwh. (1 l.e.g. = 9,661 Kwh.), y el consumo de los vehículos térmicos se calculó para un promedio de diesel y gasolina (el contenido energético del diesel por cada litro es mayor). Haciendo un promedio de ambos tanto en coste del litro como en contenido energético por litro, calculamos el coste del combustible.

En la siguiente tabla se recogen los resultados del cálculo del coste de mantenimiento para los vehículos eléctricos analizados:

	consumo 100 km	consumo en kwh	euros a los 100 km
furgón 3500 Kg	6,900	66,662	7,666
furgoneta 2500 Kg	5,300	51,204	5,888
vehículo particular 5 ciclos	3,500	33,814	3,889
vehículo particular 3 ciclos	3,300	31,882	3,666
smcar taxi	2,500	24,153	2,778

Tabla 9. Coste de mantenimiento de los vehículos eléctricos

Para los vehículos de reparto, el consumo a los 100 Km por tonelada de carga es:

	consumo 100 km	l.e.g. por Tm carga	kwh por Tm carga	euros por Tm carga
furgón 3500 Kg	6,900	5,731	55,367	6,367
furgoneta 2500 Kg	5,300	8,042	77,699	8,935

Tabla 10. Coste de mantenimiento por Tm de carga (vehículos eléctricos de reparto)

En cuanto a los vehículos térmicos, los resultados de coste de mantenimiento se recogen en las siguientes tablas, primero para vehículos particulares y tipo taxi y luego para vehículos de reparto de mercancías:

	consumo 100 km	consumo en promedio g/d	euros a los 100 km
furgón 3500 kg	12,920	12,305	13,898
furgoneta 2500 kg	9,490	9,038	10,209
vehículo particular pequeño	6,180	5,886	6,648
vehículo particular medio(para taxi)	8,630	8,219	9,283

Tabla 11. Coste de mantenimiento de los vehículos térmicos

	consumo 100 km	consumo por Tm carga	cons.en promedio g/d por Tm carga	euros por Tm carga
furgón 3500 kg	12,920	8,620	8,209	9,273
furgoneta 2500 kg	9,490	10,629	10,123	11,434

Tabla 12. Coste de mantenimiento por Tm de carga (vehículos térmicos de reparto)

Para comparar visualmente el precio del combustible a los 100 Km y el precio del combustible para transportar una tonelada 100 Km se han construido los siguientes gráficos:

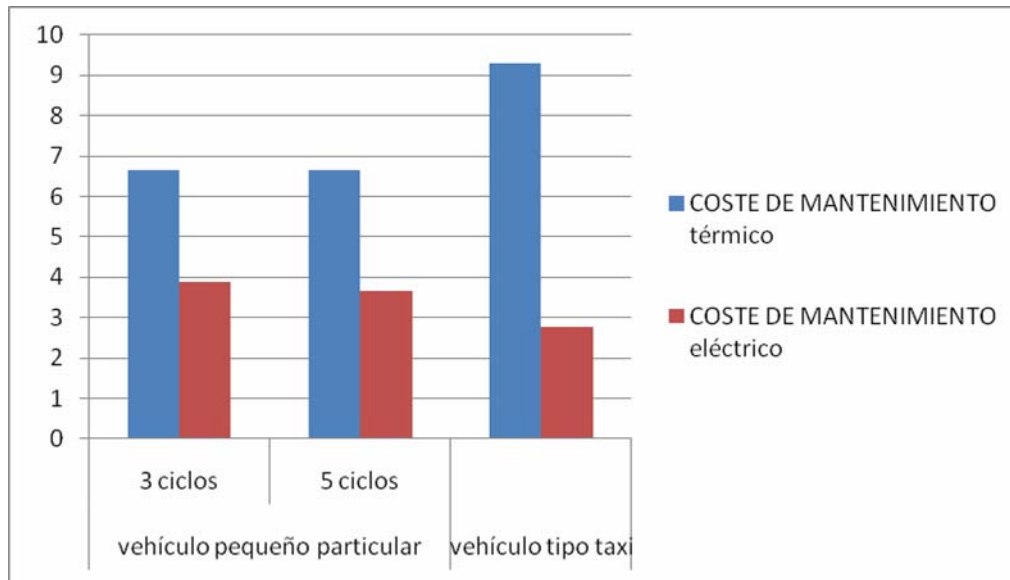


Figura 12. Coste de mantenimiento (vehículo particular y tipo taxi)

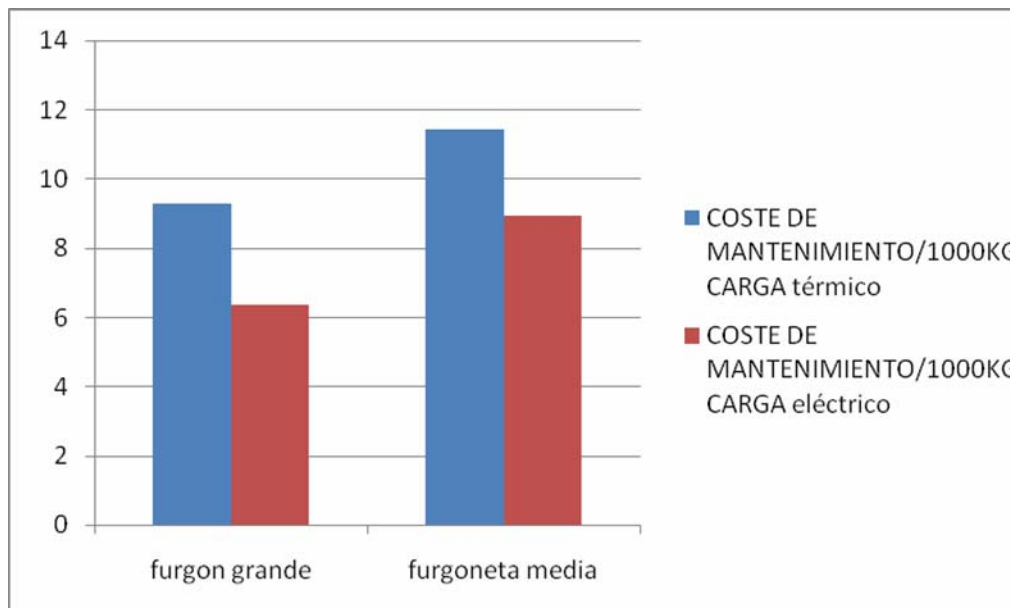


Figura 13. Coste de mantenimiento (vehículo de reparto de mercancías)

Se puede apreciar las diferencias notables en todos los casos, sobre todo en los casos de vehículo particular y en los casos de vehículo tipo taxi.

Hay que recordar que los parámetros en los que se ha basado este estudio económico podrían variar notablemente en un escenario de integración completa del coche eléctrico.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de este estudio se basan en los resultados de los análisis energéticos realizados.

En los actuales análisis “del pozo a la rueda” que comparan la eficiencia del vehículo eléctrico frente al térmico, el primero sale ganando como un sistema de transporte más eficiente (Figura 4). Por otro lado, en los diseños realizados se ve que la energía primaria consumida por los modelos eléctricos al realizar sus ciclos de funcionamiento es mayor en la mayoría de los casos (excepto para el vehículo tipo taxi). Esto se debe fundamentalmente a que la energía mecánica útil requerida es mayor en el caso de los vehículos eléctricos al ser mayor el peso final de los mismos en vacío. Por ello, pese a ser una tecnología potencialmente más eficiente, el consumo puede ser mayor.

El origen del problema del excesivo peso de los vehículos diseñados es la enorme diferencia actual entre baterías eléctricas y combustibles fósiles en cuanto a capacidad de almacenamiento de energía¹¹. A este respecto hay que comentar que las baterías almacenadas en la base de datos de Advisor pueden tener hasta 10 años de antigüedad (en la universidad se dispone de la versión de 2004); en los últimos años se ha mejorado mucho la densidad de energía de las baterías, sobre todo en las basadas en la tecnología ión-litio. Estas baterías pueden almacenar hasta 2 veces más energía que las baterías de NiMH utilizadas en este estudio, aunque presentan un alto coste que por ahora dificultarían su instalación en turismos comerciales masivamente. De todos modos, es preciso decir que los resultados de este proyecto mejorarían seguramente hasta el punto de que los diseños eléctricos consumiesen menor energía primaria que los térmicos.

Se pasará ahora a presentar las conclusiones por separado para los modelos diseñados y seleccionados.

En primer lugar, en los vehículos tipo turismo particular vemos que los diseños eléctricos consumen una mayor energía primaria que sus análogos térmicos. La energía

¹¹ A este respecto, resulta muy interesante el artículo “Los límites de la tecnología de almacenamiento energético”, de Kurt Zenz House.

no renovable consumida es similar en ambos casos (requieren las mismas provisiones de fuentes de energía 'limitadas'), y el consumo de energías productoras de CO₂ es superior en el caso de los vehículo térmicos. Se puede notar que el consumo de energía es bastante similar para el caso de recarga tras 5 ciclos (5 jornadas de trabajo) que para el caso de recarga tras 3 ciclos (3 jornadas de trabajo); sería interesante analizar hasta qué punto influiría el número y la frecuencia de recargas en el consumo final del vehículo, tanto a nivel energético como económico. Si el consumo fuera muy similar casi sería más favorable tender hacia recargas más espaciadas, por comodidad y por duración de las baterías (menor número de cargas y descargas).

El vehículo tipo taxi presenta los resultados más favorables del estudio, al ser su consumo de energía menor, y por lo tanto el consumo de energías no renovables y emisoras de CO₂ mucho menor. La mejora de los resultados de este vehículo frente al particular se debe al menor recorrido antes de realizar la recarga (112,3 Km frente a 211,7 o 127 Km, según recorra 3 ó 5 ciclos el turismo particular), siendo también menores las velocidades exigidas, ya que el vehículo particular presenta en su ciclo de funcionamiento tramos de recorrido extraurbano.

Los resultados en el caso de los vehículos eléctricos de reparto de mercancías son los menos esperanzadores. Para los vehículos diseñados, al requerirse mucha energía y potencia para mover sus masas, las baterías tienden a ser tan grandes que la carga útil disponible antes de llegar a la masa máxima autorizada se hace muy pequeña, en torno a la mitad de la que podría transportar un vehículo térmico semejante. Esto hace que la energía consumida por unidad de carga transportada sea bastante superior a la consumida por los vehículos térmicos de reparto.

Otro resultado interesante es el de que los camiones de 3500 Kg diseñados presentan menos consumo que los de 2500 Kg por tonelada de carga transportada. A priori podría parecer que un vehículo eléctrico pequeño consumiría menor energía en el transporte de mercancías, pero el peso propio del vehículo (chasis + motor + tripulación) y de las baterías necesarias dejan poco margen para el peso de la carga útil. Parece que un vehículo resistente y aligerado, con capacidad volumétrica de carga elevada sería la única manera de construir vehículos de reparto eléctricos competitivos.

Hay otros factores que pesan mucho en el desarrollo del coche eléctrico frente al

térmico, unos favoreciéndolo y otros retrasándolo. Hablando de factores políticos, resulta interesante para los países occidentales ser independientes de los países productores de petróleo. Respecto a los factores ambientales, el calentamiento global es una realidad mundialmente aceptada, y se han realizado acuerdos internacionales a este respecto (protocolo de Kioto y otros). La emisión de gases se produce en el mismo vehículo en el caso de los coches térmicos, mientras que en el caso de coches eléctricos estas emisiones se producirían en los puntos de generación de energía eléctrica, esto hace posible dos vías de reducción de las emisiones [4]: variar la proporción de fuentes de energía del mix energético a favor de las energías renovables o incluso de la energía nuclear y trabajar con técnicas de captura de CO₂ en los puntos de generación eléctrica. Esta última estrategia es mucho más factible que la de intentar capturar el CO₂ en los propios vehículos térmicos.

La continuación de este proyecto sería básicamente realizar de nuevo los cálculos para unos vehículos diseñados con las nuevas baterías de ión-litio, y también realizar un análisis de sensibilidad de las energías no renovables y de las energías emisoras de CO₂ usadas al variar en el mix de producción energética el porcentaje de fuentes de energía renovables; también se complementarían este estudio con otros que ya se están llevando a cabo referentes a la investigación de nuevos motores síncronos de imanes permanentes, a la instalación de 'electrolineras' [5] o puntos de recarga de vehículos con varias potencias disponibles de recarga, y en general las instalaciones necesarias para hacer posible la electrificación del transporte urbano.

La competitividad del vehículo eléctrico frente al térmico depende básicamente de la mejora de la capacidad energética de las baterías, siendo éste un punto imprescindible para el desarrollo e implantación de los vehículos eléctricos en nuestras ciudades.

6. BIBLIOGRAFÍA

- LIBROS:

[1] *'Build Your Own Electric Vehicle'*, Bob Brant

- PROYECTO SINGULAR ESTRATÉGICO:

[2] *'Cityelec: Sistemas para Electrificación de la Movilidad en Entorno Urbano'*, Consorcio de empresas e instituciones públicas liderado por Robotiker

- ARTÍCULOS:

[3] *'El vehículo eléctrico y la eficiencia energética global'*, R.Bargalló

[4] *'Análisis económico y energético del vehículo eléctrico'* Francisco Laverón Simavilla, Miguel Ángel Muñoz Rodríguez, Gonzalo Sáenz de Miera Cárdenas; IBERDROLA

[5] *'Desarrollo del coche eléctrico y las electrotecnologías y sus efectos técnicos y económicos en la gestión de la red'* Juan Antonio Alonso González, perteneciente al Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE)

[6] *'Green Power for Electric Cars'* Bettina Kampman y otros

[7] *'Vehículo Eléctrico, ¿Tan Sencillo como Plug and Play?'* J. M. Solans

- RECURSOS WEB:

[8] www.arpem.com, página web comparativa de seguros, préstamos, ofertas y prestaciones de turismos y vehículos comerciales.

[9] www.ree.es, página web de la Red Eléctrica de España.

ANEXOS

7. ANEXOS

7.1. CITYELEC. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente la movilidad por carretera en entorno urbano se basa principalmente en el vehículo particular, recorriéndose el 75% de kilómetros en coche¹ y con trayectos de menos de 5 Km. Los vehículos actuales, diseñados para tener prestaciones elevadas en carretera abierta, evolucionan por la ciudad de un modo altamente ineficiente en dos aspectos fundamentales:

- **Eficiencia energética.** Los ciclos de conducción urbana, con constantes paradas y aceleraciones provocan consumos y emisiones nocivas muy elevadas.
- **Ocupación y uso del vehículo.** Las medias de ocupantes por vehículo en entorno urbano oscilan entre el 1 y 1,5, con trayectos normalmente cortos.

Este modo de transporte de personas y mercancías basado en el vehículo de uso personal, aun siendo necesario como uno de los pilares de la movilidad urbana, no es sostenible en su configuración actual teniendo en cuenta el precio del petróleo, emisiones e incremento de población. Aunque ya se ha identificado al vehículo eléctrico ligero como una solución para mitigar el problema, existen múltiples riesgos asociados a la madurez tecnológica de la solución, relacionados con la aproximación de los grandes fabricantes de automóviles, que ven cómo el vehículo eléctrico no puede sustituir de forma competitiva al vehículo de turismo actual. No es competitivo construir vehículos eléctricos de prestaciones dinámicas y autonomías comparables a los turismos basados en motor de combustión, porque aunque es técnicamente factible, implica unos costes muy elevados que el usuario final puede no estar dispuesto a asumir en el contexto actual.

Teniendo en cuenta los aspectos citados anteriormente, algunas plataformas tecnológicas como ERTRAC ya han identificado hojas de ruta para la progresiva implementación de propulsión eléctrica y híbrida en los vehículos del futuro alineada con las prioridades de la iniciativa “green cars”. La plataforma ERTRAC² publicó recientemente el documento estratégico “Electrification of urban

transport” y también el documento estratégico “ERTRAC Research Framework: Steps to implementation”. En ambos documentos se especifica claramente la necesidad de la electrificación del transporte urbano así como las prioridades y/o pasos a llevar a cabo para su consecución desde el punto de vista de la investigación básica y de aplicación. Estos documentos estratégicos están basados en cuatro pilares:

- Mobility, Transport and Infrastructure.
- Safety and Security.
- Energy, Environment and Resources
- Design and Production Systems.

Es importante resaltar que las últimas previsiones de penetración del vehículo ligero eléctrico en EEUU anticipan un 64% de la cuota de mercado en 2030, siendo el vehículo pequeño el más susceptible de electrificar su sistema de propulsión. Esto sin duda es un hecho a tener en cuenta a la hora de reforzar el tejido industrial, desarrollando el conocimiento necesario para proporcionar nuevos productos y servicios relacionados con la movilidad electrificada.

Es evidente la necesidad de investigar en nuevos conceptos de vehículos eléctricos ligeros que tengan en cuenta las necesidades reales asociadas a la movilidad urbana para proporcionar una solución realmente sostenible en el medio plazo. Es conveniente señalar a este respecto, que dentro de la iniciativa European Green Car Initiative, se han definido una serie de temas de investigación relacionados con el vehículo eléctrico. Uno de ellos se denomina “Advanced Electric Vehicle Concepts” (FP7 TRANSPORT WP 2010 - SST.2010.7.5) y reconoce el significativo impacto que la tracción eléctrica tiene en el vehículo actual, totalmente condicionado por la presencia de un motor de combustión interna, y como es necesario plantearse el concepto de vehículo tal y como lo conocemos hoy en día.

Como condicionantes más reseñables en relación con el uso de los vehículos en entorno urbano, es necesario tener muy presentes los siguientes conceptos:

- **Velocidad limitada.** En entorno urbano existen una serie de limitaciones de velocidad que limitan la velocidad máxima.
- **Trayectos cortos.** Los trayectos son de pocos kilómetros y con múltiples paradas.
- **Elevada disponibilidad del vehículo.** Tiempo de carga reducido, es necesario que la movilidad sea “a demanda” reduciendo tiempos de espera para dar al usuario un servicio similar al del coche particular.
- **Capacidad de mezclarse con el tráfico urbano convencional** de forma segura con buena usabilidad y aceleración.
- **Requisitos adaptados de seguridad,** el tipo de accidente habitual en entorno urbano es muy diferente a la del trayecto interurbano o en autopista. Es más frecuente el atropello que el impacto severo entre vehículos.

La aproximación de CITYELEC va mucho más allá de una introducción de puntos de recarga. Lo que se propone en este proyecto es la definición de un **nuevo sistema integral de movilidad urbana sostenible**, con elementos y sub-sistemas (vehículo + infraestructura) definidos desde el inicio para adecuarse al entorno urbano. El sistema CITYELEC identificará las necesidades reales que pueden resolver el problema de la movilidad urbana por carretera, complementando tanto el transporte público como el transporte privado, para ofrecer un nuevo paradigma en la movilidad urbana.

Otro aspecto fundamental relacionado con el transporte eléctrico es la procedencia de la energía eléctrica necesaria para mover los vehículos. La emisión de gases de efecto invernadero simplemente cambia su ubicación, si solo se cargan los vehículos eléctricos a partir de una red eléctrica basada en la utilización de combustibles fósiles, por lo que es necesario en el proyecto identificar nuevos sistemas que permitan que la energía utilizada tenga origen renovable, de modo que la ecuación de movilidad sostenible arroje un balance global de emisiones nulo.

Resumiendo, el sistema CITYELEC debe ser lo más independiente posible de la energía fósil. Para ello plantea incorporar en la investigación dos elementos clave:

- **Generación de energía basada en renovables en entorno urbano.** La integración de las energías renovables en el entorno urbano mediante paneles fotovoltaicos y microturbinas eólicas, ofrece grandes oportunidades para abastecer de energía a estos vehículos. Es necesario mencionar la sinergia de otros proyectos singulares estratégicos con los que se comparte equipo de trabajo⁴ (microrredes y minieólica). Una instalación de recarga basada en energía fotovoltaica con sistemas de acumulación de energía en baterías y infraestructura de recarga se observa en la Figura 3.

- **Elementos intermedios de almacenamiento/transformación de energías renovables.** Entre los puntos de recarga de los vehículos y la red eléctrica, se propone implementar una serie de sistemas de transformación y acumulación de energía que permitan aprovechar energía generada por las renovables en la red eléctrica, compensando picos y valles de generación asociados a estas fuentes de energía, por ejemplo, acumulando la sobreproducción nocturna habitual en los parques eólicos.

Es reseñable también el nuevo modelo de negocio asociado a la utilización del sistema CITYELEC, relacionado con diversos esquemas de utilización como pueden ser:

- **Compra de los vehículos por particulares**, especialmente atractivo para los habitantes de la ciudad.
- **Alquiler de los vehículos para trayectos en un esquema de movilidad a demanda**, de forma que se complementen las carencias del transporte público (Car sharing).
- **Adquisición por operadores** para flotas cautivas, policía, vigilancia, correos, logística de mercancía ligera.
- **Transporte público con conductores profesionales** (microbuses y servicios taxi) de utilización en entorno urbano.

Como se puede observar, para proponer una solución que suponga un salto importante en la movilidad urbana, es necesario trabajar en los elementos que formarán el sistema CITYELEC de forma combinada, y cobra una importancia muy relevante la existencia de un subproyecto capaz de tener en cuenta el sistema en su conjunto y garantizar que se definen requisitos y especificaciones para que éste funcione de forma adecuada.

Teniendo en cuenta el alcance del proyecto CITYELEC de diseñar y validar un concepto de electrificación urbana integral el presente sub-proyecto SP1 tiene los siguientes objetivos generales:

- Desarrollar y definir criterios para el diseño de alto nivel del sistema CITYELEC teniendo en cuenta los factores que beneficien al trinomio CVE (conductor-vehículo-entorno). Al ser el concepto presentado un concepto integrador, es necesario tener muy en cuenta las interacciones principales dentro del sistema que serán a nivel CVE, y por lo tanto estas influirán de forma crítica en el diseño del sistema. Tendrá que ser un sistema adaptado al conductor, pero que tenga en cuenta el vehículo y su posterior relación con el entorno que será la infraestructura de recarga, pero también el resto de tráfico no electrificado, y el resto de sistemas de transporte en general.
- Analizar y cuantificar las necesidades de movilidad urbana de personas en una ciudad tipo, en Km recorridos/persona*año, actuales y futuras. Este objetivo conlleva el estudio de diferentes escenarios posibles, teniendo en cuenta los estudios disponibles sobre necesidades de movilidad urbana, y la selección del escenario que se ajuste y pueda obtener beneficios del concepto CITYELEC, que será sobre el que se base el proyecto y que podrá validar con resultados experimentales en última instancia, la validez del concepto CITYELEC de estudio y solución integral de la movilidad urbana.
- Cuantificar los beneficios que conllevaría la adopción del concepto de electrificación integral (teniendo en cuenta vehículo e infraestructura, y los escenarios futuros previsibles), de tal manera que se pueda estimar cuantitativamente unos valores objetivo (a nivel de ahorro energético,

ahorro de emisiones, descongestión del tráfico, etc.) que se puedan validar en el demostrador final y que sirvan para concluir validando el concepto CITYELEC.

- Dentro del proyecto CITYELEC será preciso realizar modificaciones o nuevas instalaciones relacionadas con la infraestructura, por lo que será necesario analizar, plantear y proponer conceptos de suministro, distribución y generación en entorno urbano que sean compatibles con la solución propuesta, ya que uno de los objetivos de la infraestructura propuesta en el concepto CITYELEC sería el obtener un balance cero o negativo a nivel de emisiones de CO₂.

7.2. PROGRAMA ADVISOR

A continuación se adjunta un breve manual del programa Advisor:

NOTA: La numeración de las figuras en este anexo es independiente de la numeración del resto de las figuras dentro del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este manual es proporcionar una visión general del programa de simulación de vehículos ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator, de AVL) de cara a facilitar el aprendizaje de un nuevo usuario.

Se trata de un programa que funciona en el entorno MATLAB-SIMULINK. Su base de datos cuenta con varios tipos de cada uno de los componentes de un vehículo que han sido modelizados previamente. El vehículo se simula como un diagrama de bloques en el que cada bloque representa un sistema y está formado, a su vez, por cierto número de subsistemas. Se puede editar el diagrama de cada componente, si bien la complejidad de éstos hace que sea una opción poco recomendable.

El programa consta únicamente de 3 pantallas: en la primera se define el vehículo a simular, con su configuración, sus componentes y sus características; en la segunda se definen los parámetros de la simulación y en la última aparecen los resultados del proceso.

El usuario sólo selecciona componentes e introduce el valor de las variables que le interese, no teniendo la necesidad de trabajar con los diagramas de bloques de SIMULINK, si bien, como ya se ha comentado, se pueden visualizar para comprender mejor los funcionamientos de las diferentes configuraciones y componente e incluso se pueden editar.

El programa ADVISOR ha sido utilizado para la realización del proyecto fin de carrera de Ingeniería Industrial de título “Dimensionamiento óptimo de sistemas de producción y suministro de energía para el sistema propulsor de automóviles no contaminantes” de Francisco Cebrián durante el curso académico 2005-2006

en el Centro Politécnico Superior, en colaboración con el grupo de ingeniería GITEL.

2. PANTALLA DATOS DEL VEHÍCULO

Esta es la primera pantalla que aparece una vez se ha iniciado el programa y se ha elegido el tipo de unidades deseadas (entre unidades métricas y anglosajonas). En ella se selecciona la configuración del vehículo, se eligen los componentes y se definen sus características. En la Fig.1 se muestra la pantalla de datos del vehículo:

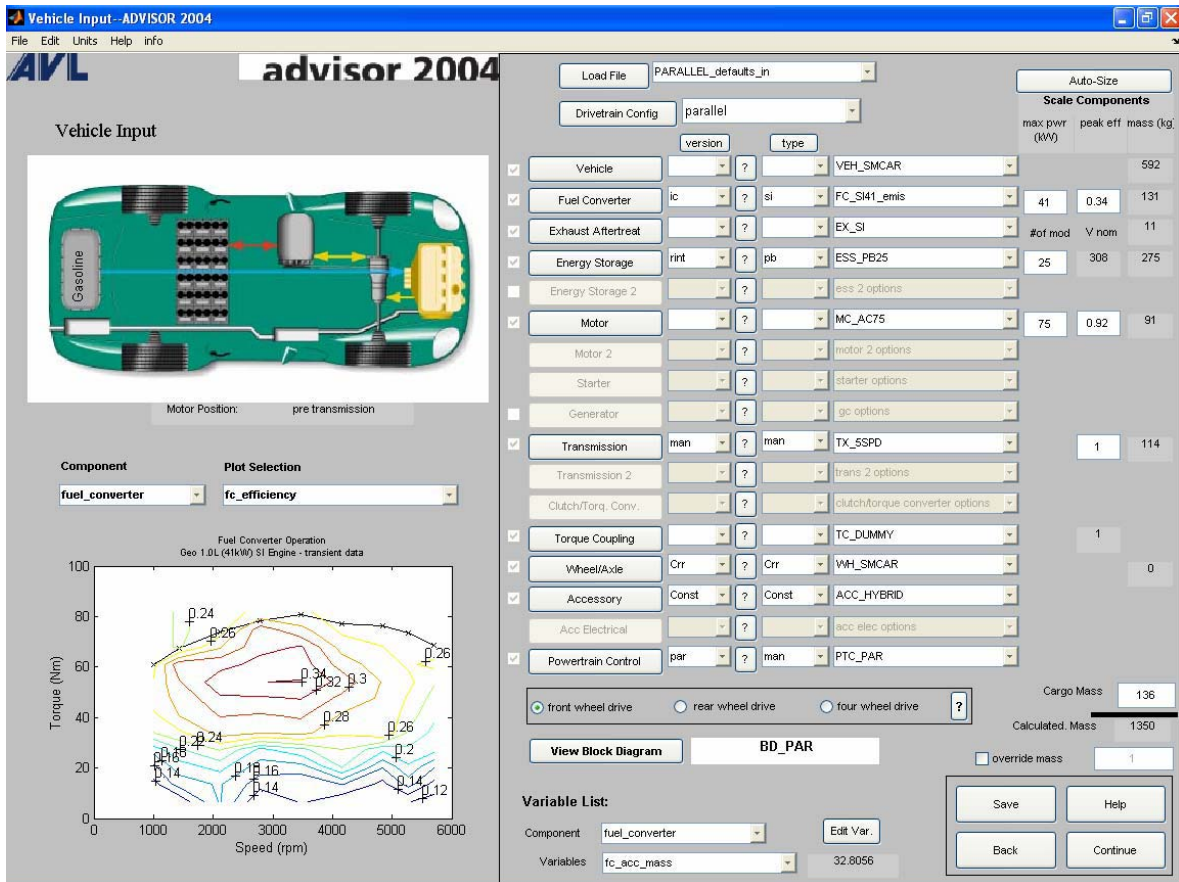


Fig.1. Pantalla datos del vehículo

Los datos se pueden guardar en todo momento, aunque la opción más recomendable es guardar el resultado de la simulación completa – en la tercera

pantalla - , ya que así se almacena la información de las tres fases, es decir, datos de vehículo, simulación y resultado.

2.1 CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO

En primer lugar se debe definir el tipo de configuración de vehículo que se va a utilizar; el programa permite elegir entre varias opciones, las cuales parecen en una pestaña, tal y como se observa en la Fig.2:

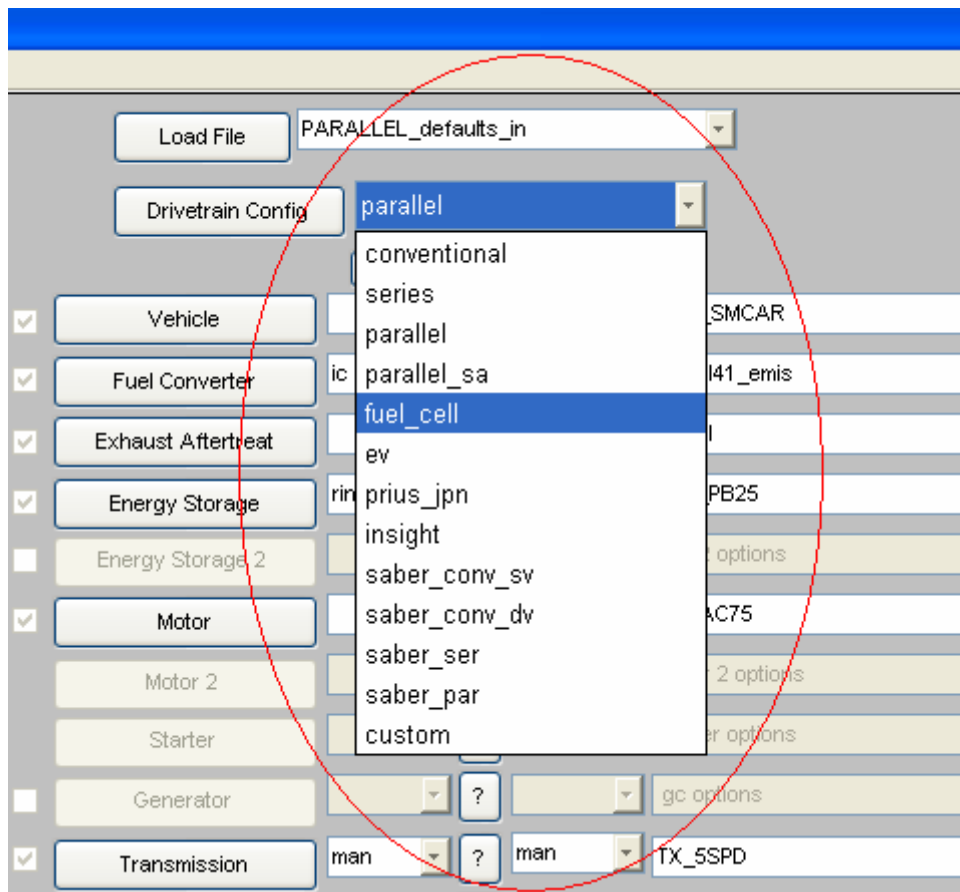


Fig.2. Pestaña selección de configuración

A la izquierda de la pantalla, en la parte superior, aparece un esquema representativo del tipo de configuración seleccionado que se puede observar en la Fig.3. En este caso, se trata de un vehículo híbrido con motor térmico, motor eléctrico y baterías en configuración paralelo:

Vehicle Input

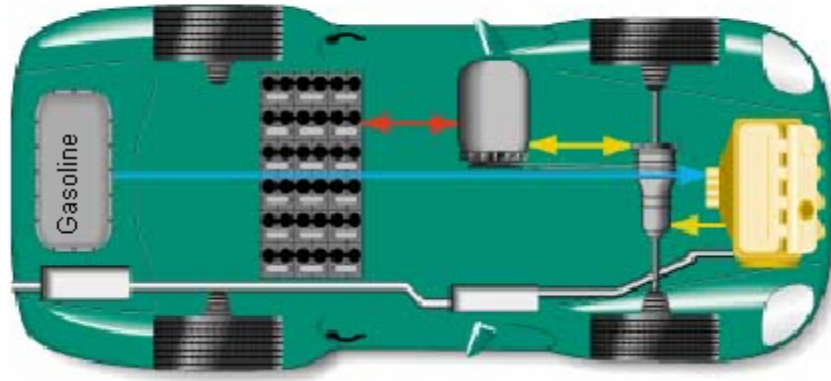


Fig.3. Esquema de configuración del vehículo (paralelo en este caso)

En la pestaña inmediatamente inferior a la de selección de configuración, se puede elegir, tal y como se observa en la Fig. 4, entre un cierto número de vehículos predefinidos. Algunos de ellos son modelos reales y otros son vehículos genéricos; por ejemplo, se puede seleccionar el modelo Prius de Toyota, y directamente todas las variables aparecerán con el valor del modelo real (a partir de los datos del NREL, National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos).

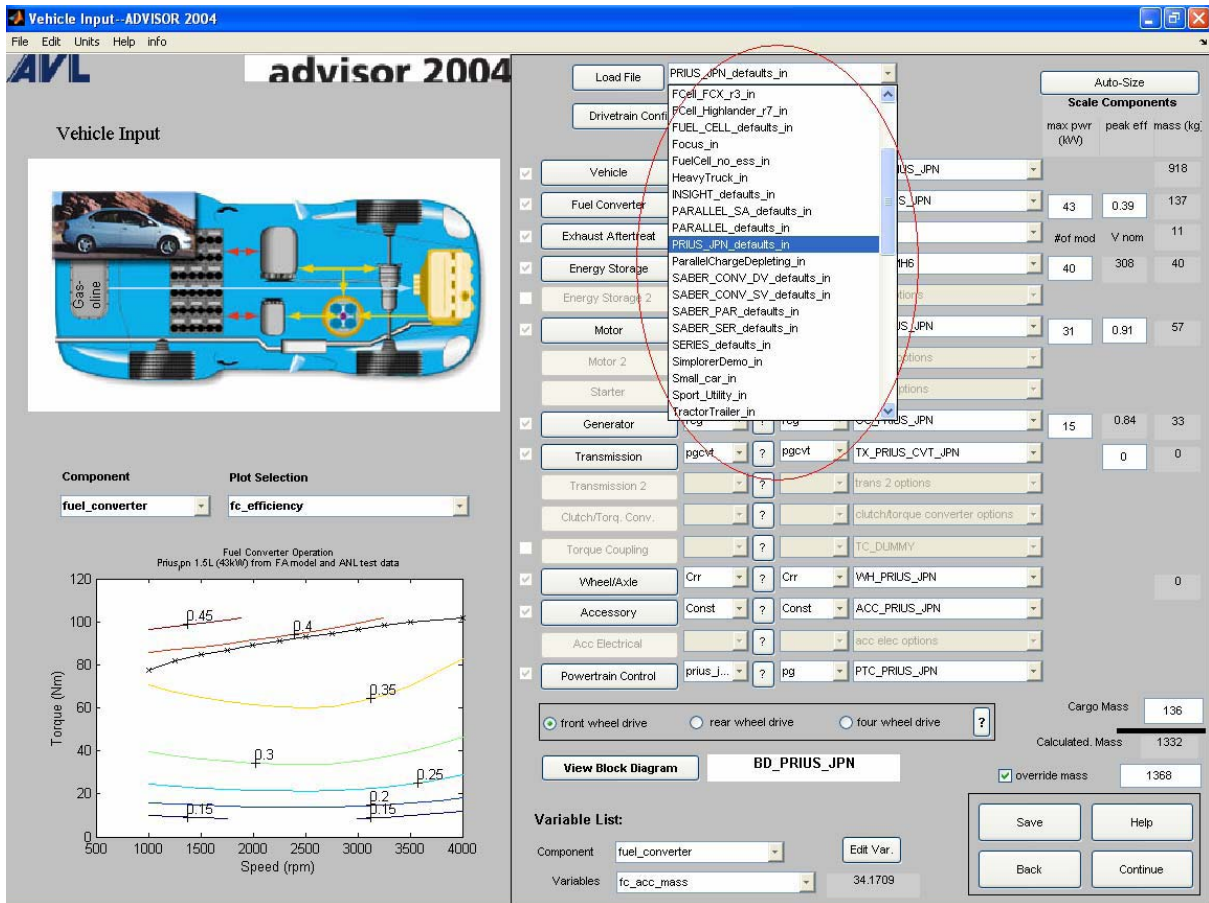


Fig.4. Selección de modelos predefinidos

Para observar el diagrama de bloques de la configuración seleccionada se debe pulsar el botón de la parte centra inferior de la pantalla “View Block Diagram”.

2.2 COMPONENTES DEL VEHÍCULO

Una vez que se ha elegido la configuración del vehículo, se procede a definir las características de cada componente. En primer lugar, dentro de cada componente se puede elegir entre diferentes opciones. Por ejemplo, en el componente “Energy Storage” (sistema de almacenamiento de energía) se puede elegir entre diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía –Fig. 5.-, por ejemplo batería de plomo, de ión-litio, etc. Además, una vez seleccionado el

tipo, se debe elegir entre los diferentes modelos de un mismo tipo –Fig. 6.-. En algunos componentes se puede elegir entre varias opciones en la columna “version”, que representan diferentes formas en las que se puede simular un componente.

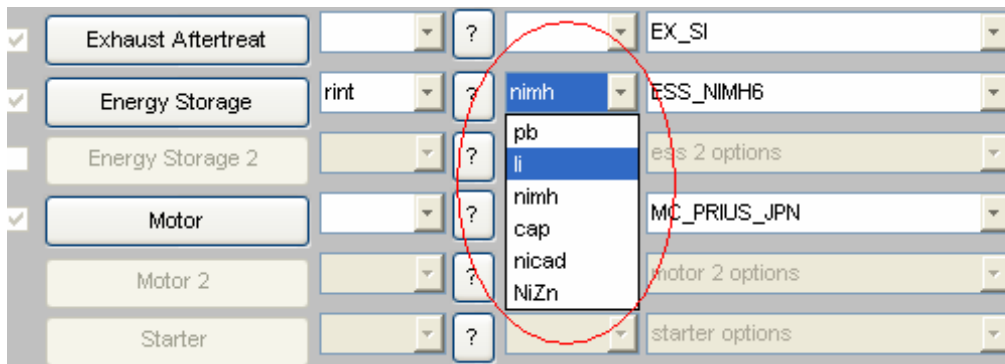


Fig. 5. Selección tipo de componente

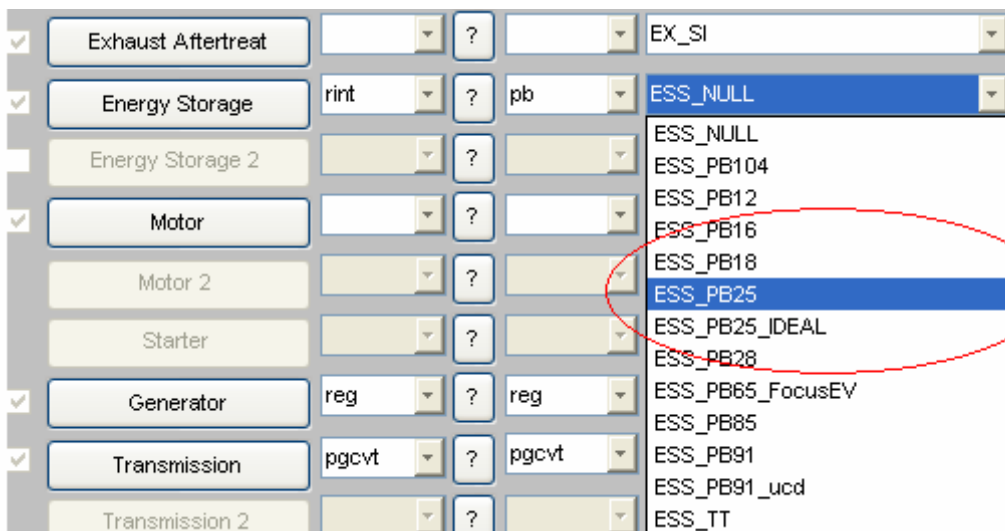


Fig. 6. Selección modelo

En esta última pestaña es cuando realmente se elige el componente. De hecho, los nombres que aparecen en la pestaña son los nombres de las variables que utiliza ADVISOR (en este caso se observa ESS_PB25, que significa “Energy Storage System”, “Sistema de almacenamiento de Energía”, batería de plomo-ácido “PB” con una capacidad de 25 Ah).

Los componentes tienen gran cantidad de valores que se pueden modificar. Hay varias maneras de modificar estos valores. Para el caso de la potencia, eficiencia o tensión (según componentes) se puede editar el valor de dichas variables directamente desde las casillas situadas a la derecha de la pantalla principal, tal y como se aprecia en la Fig. 7:

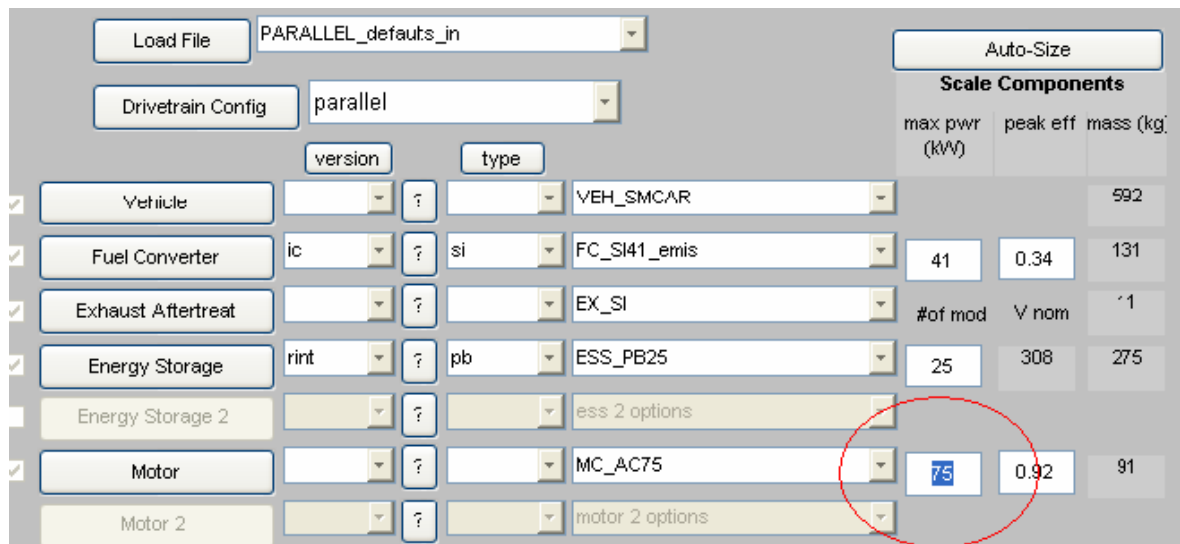


Fig. 7. Modificación valores principales en pantalla principal

El resto de variables se modifican gracias a dos pestañas desplegadas que se encuentran en la parte inferior de la pantalla. En la primera de las pestañas se selecciona el componente cuyos valores se van a modificar –Fig. 8- y en la siguiente, una vez seleccionado el componente en la anterior, aparecen todos los parámetros que se pueden editar para ese componente –Fig. 9-. Tanto la figura 8 como la 9 ilustran el proceso que se debería seguir para seleccionar el parámetro que se desea modificar. Una vez realizado este proceso, se selecciona el botón de “Edit Var.” y aparece la ventana de edición de la variable –Fig. 10 -:

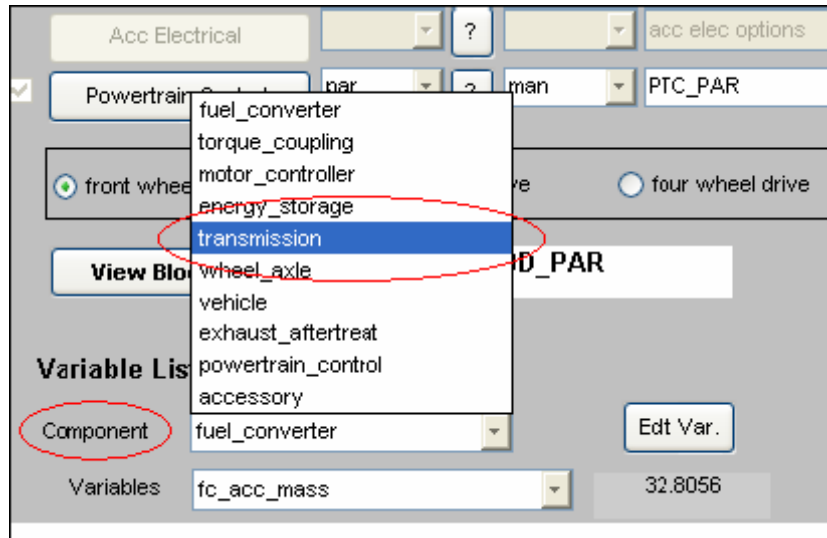


Fig. 8. Selección del componente a editar

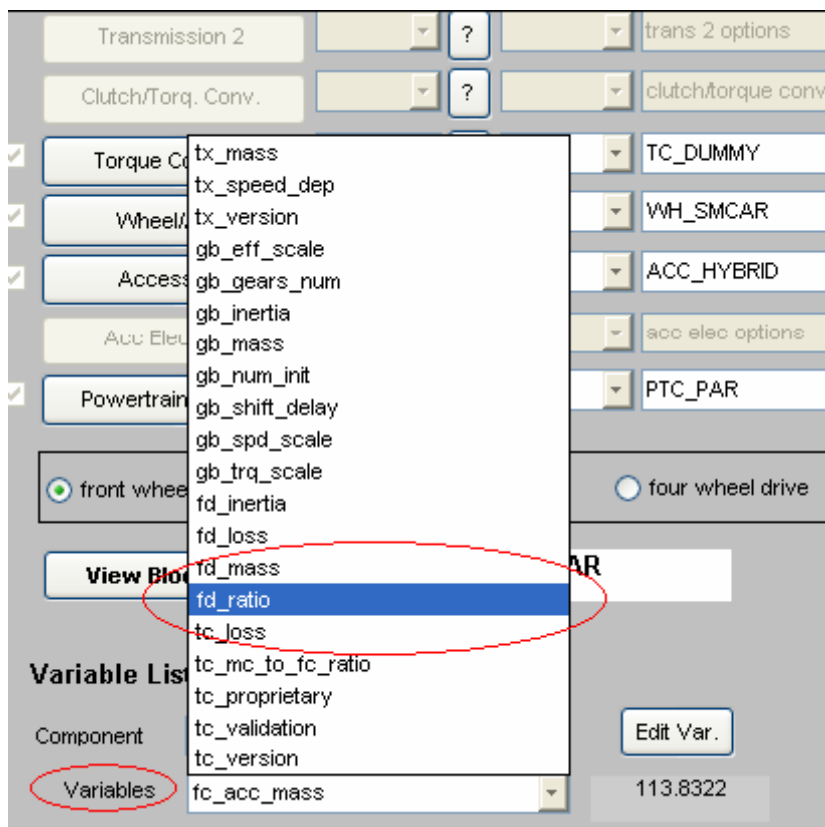


Fig. 9. Selección de la variable a editar

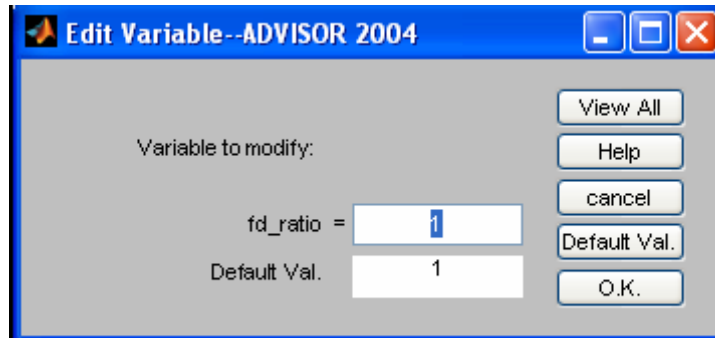


Fig. 10. Ventana de edición de variable

La ayuda del programa incluye un completo apéndice en el que aparece el nombre de cada variable con una breve descripción, su tipo, sus unidades y el tipo de vehículo en el que puede aparecer.

El programa también incluye una función llamada “Auto-size” (“autodimensionamiento”) a la que se accede pulsando su botón que se encuentra en la esquina superior derecha de la pantalla. Se fijan unos requerimientos – de velocidad máxima, aceleración, pendiente máxima superable a una velocidad dada, etc – y el programa, por medio de una serie de iteraciones, ofrece los valores aproximados de los valores de algunos componentes – potencia de motor, de batería, etc – para alcanzar dichos requerimientos. En la Fig. 11 se muestra la ventana de la función “auto-size”:

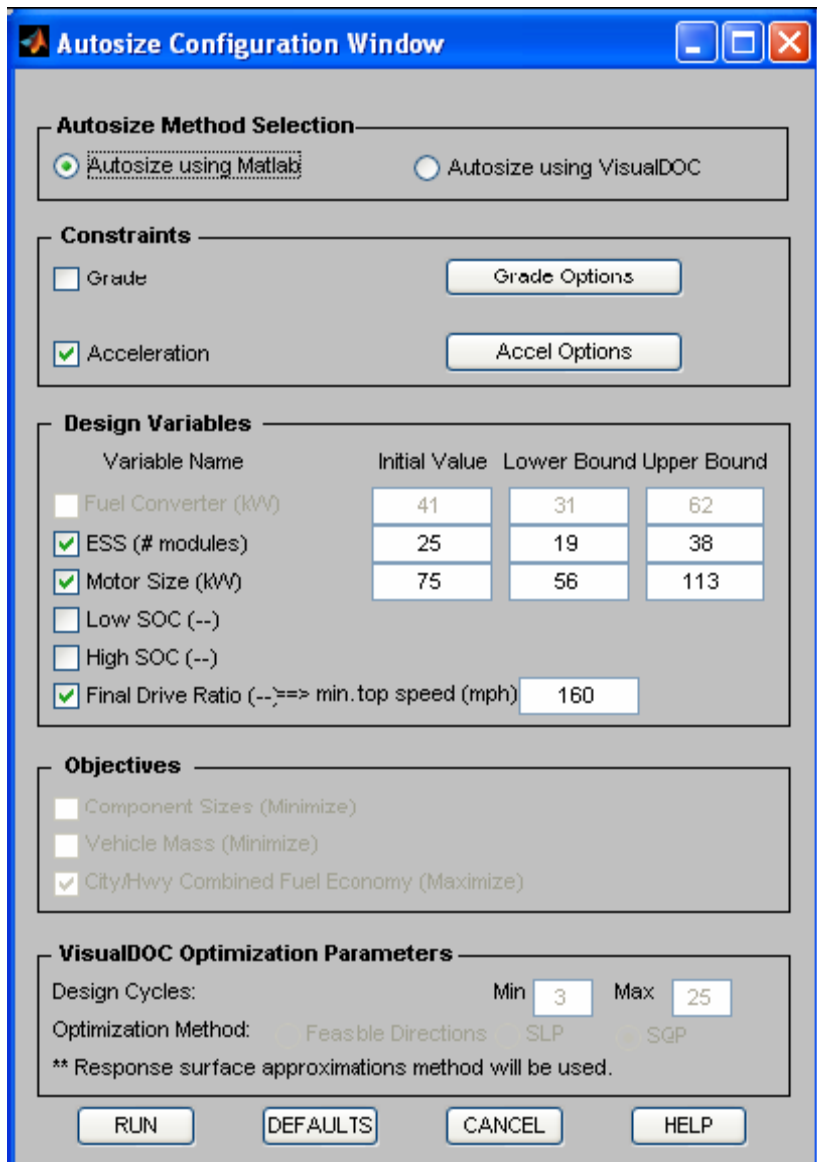


Fig. 11. Ventana función “auto-size”

2.3 MASA DEL VEHÍCULO

La masa del vehículo a simular es la suma de todos sus componentes, es de decir, la suma de la columna que aparece a la derecha de la pantalla – Fig. 12 - . A dicha cantidad se le suma el peso del equipaje (que también es una variable editable). Sin embargo, existe la posibilidad de imponer la masa total del vehículo, independientemente de su masa real. Para esto se debe activar la función

“Override mass”, también señalada en la Fig 12, e introducir el valor de masa con el cual se desea llevar a cabo la simulación.

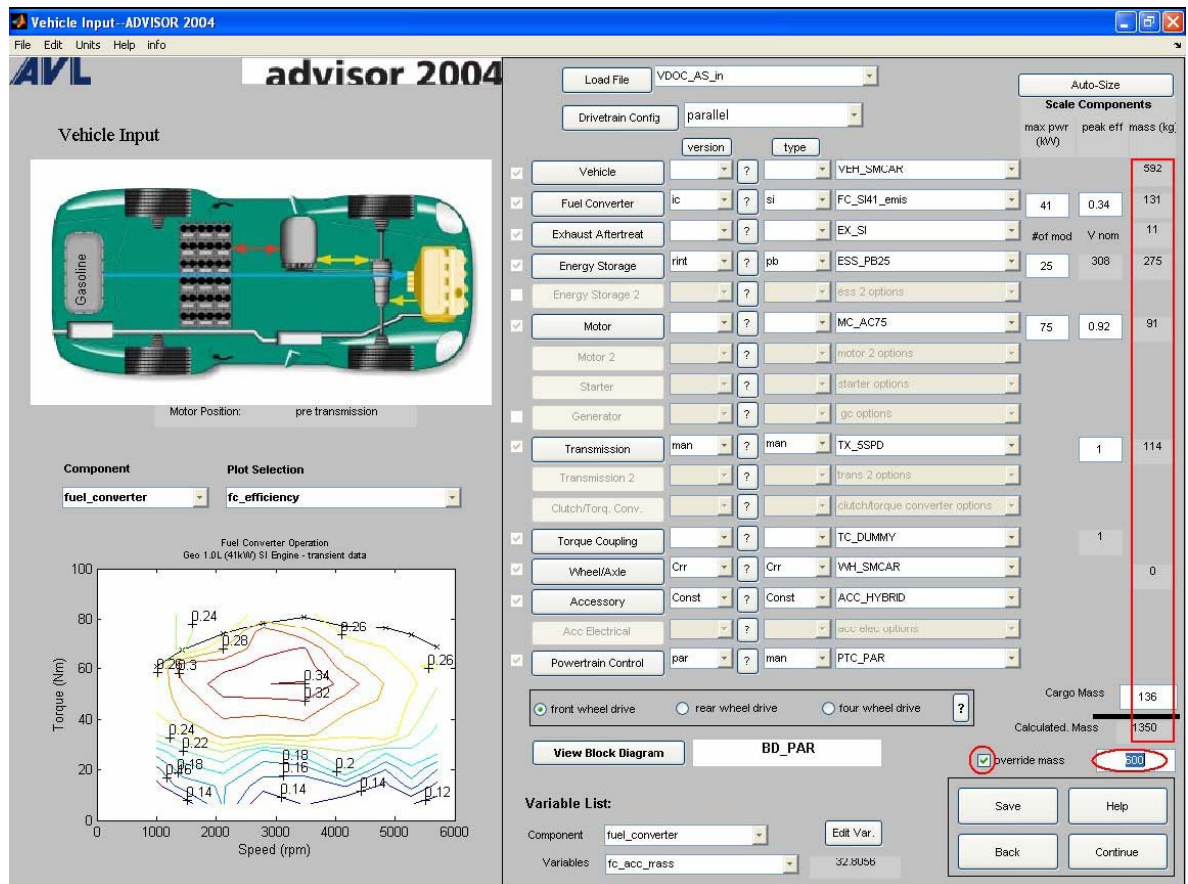


Fig. 12. Masa del vehículo a simular. Función “override mass”

Una vez completada esta fase, se pulsa el botón de continuar en la parte inferior derecha de la página.

3. PANTALLA DATOS DE LA SIMULACIÓN

Después de haber determinado el vehículo que se va a simular se deben determinar las características de la simulación que se va a realizar; dónde se va a simular, qué resultados se van a extraer, etc. En la Fig.13 se muestra la pantalla de datos de la simulación:

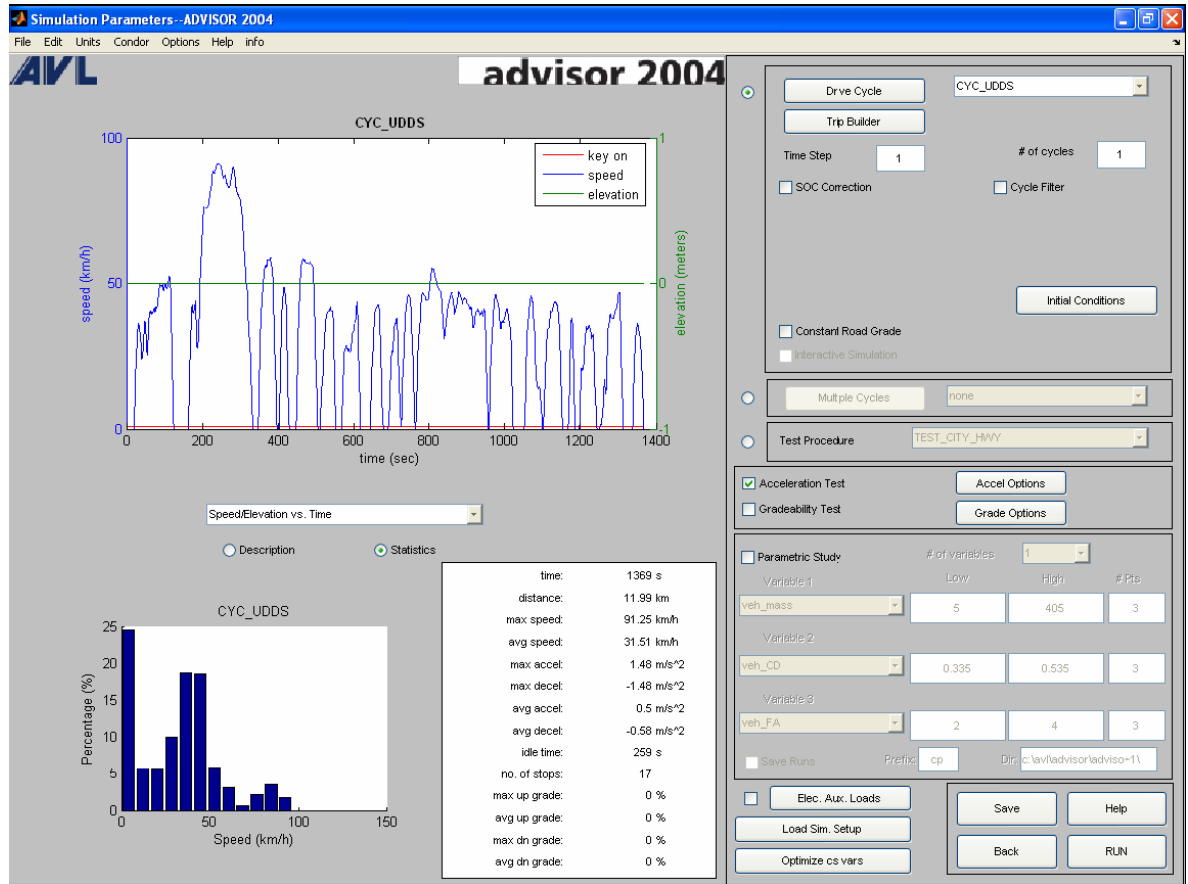


Fig. 13. Pantalla de datos de la simulación

3.1. CICLOS DE UTILIZACIÓN

Las simulaciones se llevan a cabo en los ciclos de utilización. Se trata de representaciones de los diferentes entornos en los que puede utilizarse un vehículo. Constan de un perfil de velocidades en función del tiempo (o de la distancia, según la gráfica) donde también aparece la pendiente (o la altura total según la representación). Hay ciclos de carácter urbano - con bajas velocidades y frecuentes paradas -, suburbano - con velocidades elevadas y relativamente constantes -, y mixtos.

El ciclo se elige en la pestaña que de la esquina superior derecha, tal y como se muestra en la Fig. 14. La pantalla muestra una gráfica del ciclo

seleccionado – en la Fig. 14 aparece la de “velocidad y elevación / tiempo” ya que es la que aparece por defecto por ser la más representativa -. Además, en la parte inferior se pueden observar las estadísticas del ciclo (en lugar de las estadísticas también se puede mostrar una descripción escrita, pero la información que aporta es mucho menor).

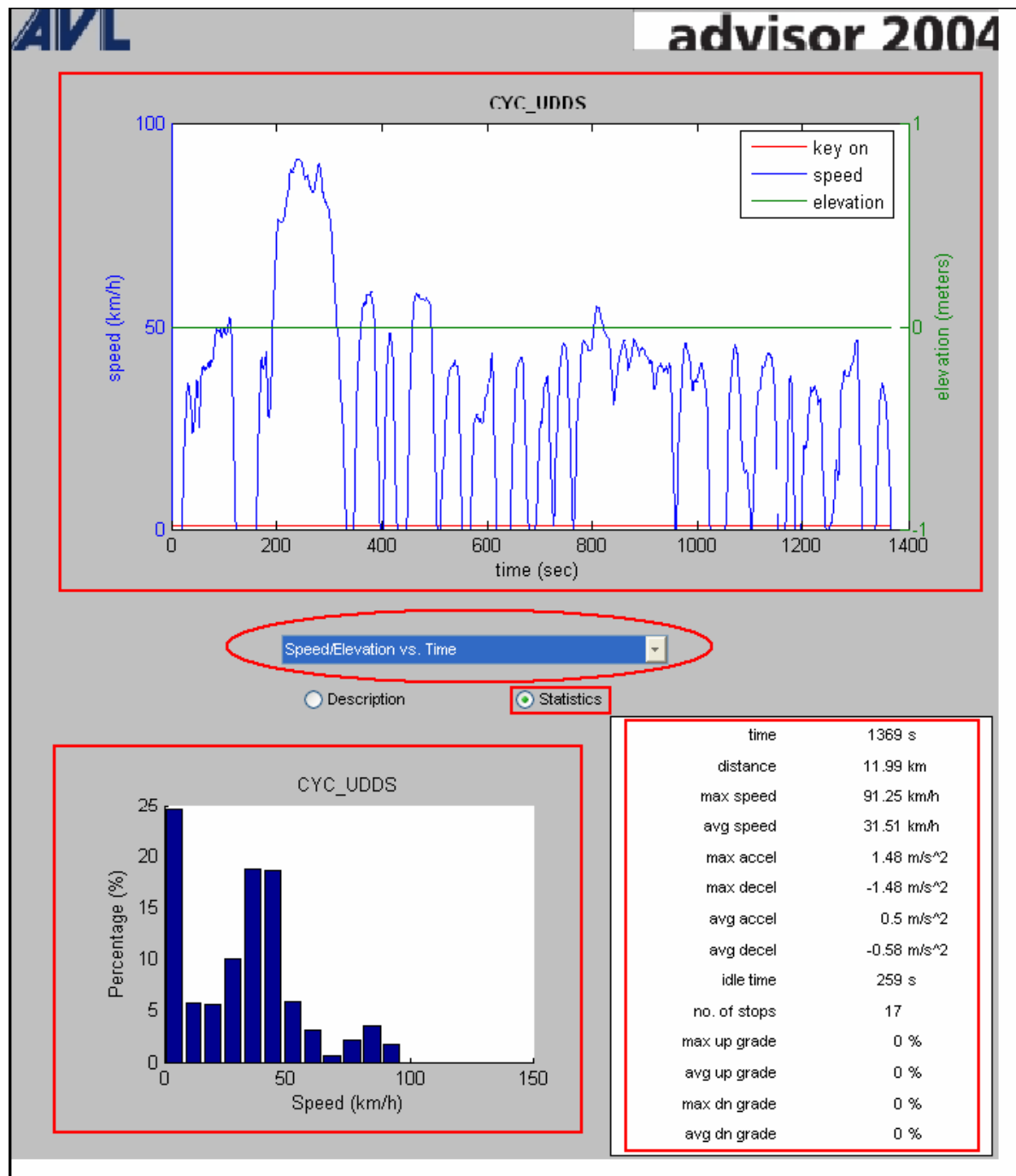


Fig. 14. Información del ciclo de utilización

Existe la posibilidad de crear un nuevo ciclo a partir de una serie de ciclos ya existentes. Para ello se debe pulsar el botón “trip builder”, en la parte superior derecha. Aparece entonces la ventana de esa opción – Fig. 15 –, en donde se seleccionan los ciclos – y el número de ellos – que conformarán el nuevo ciclo de funcionamiento.

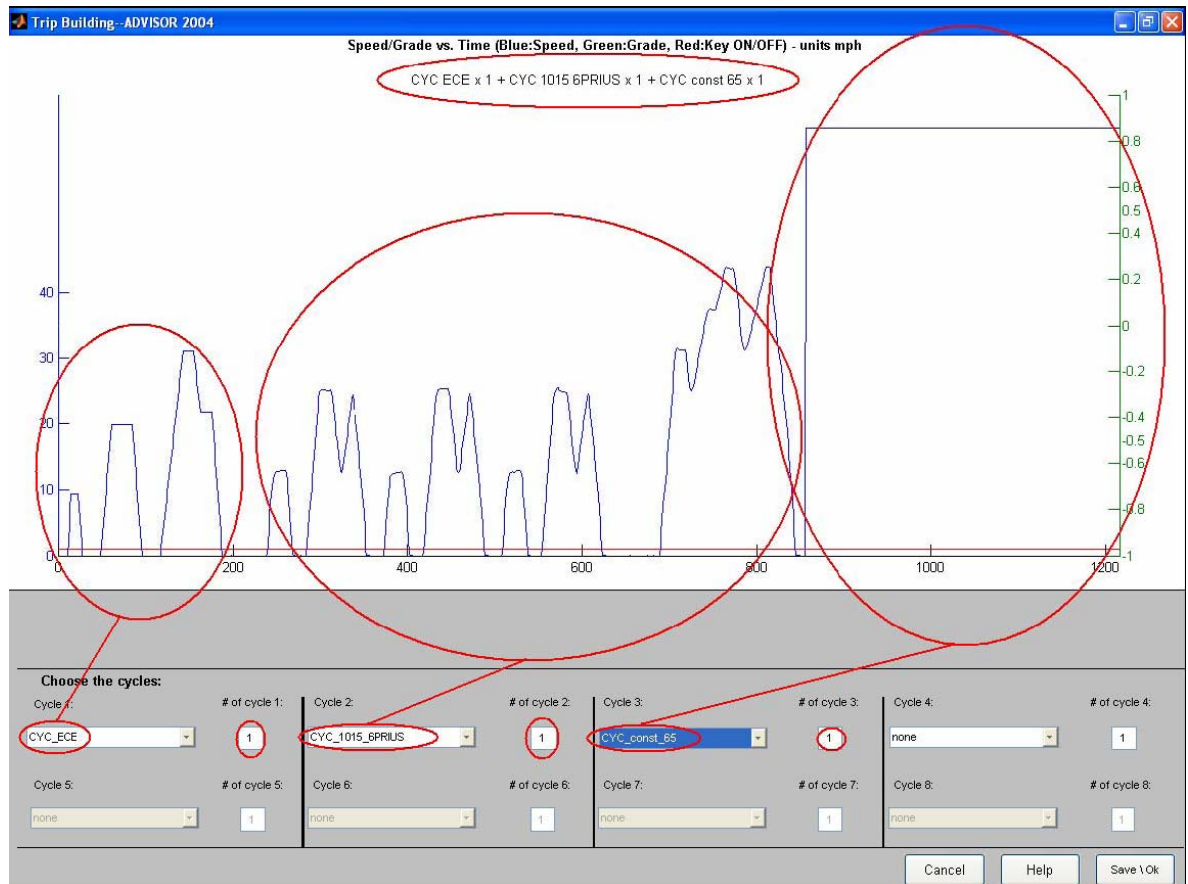


Fig. 15. Ventana de la opción “trip builder”

Por último, también en la parte superior derecha, se debe indicar en la casilla “ # of cycles” el número de ciclos que se desea que se realicen en la simulación.

3.2. CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN

Una vez definido el ciclo de funcionamiento en el que se va a probar el vehículo, se deben determinar las condiciones iniciales de la simulación. Para ello se selecciona el botón “initial conditions” en la parte superior derecha. Aparece entonces la pantalla de condiciones iniciales – Fig. 16 – en la que se puede definir el valor de diferentes variables, como por ejemplo, la temperatura ambiente, la temperatura inicial del motor o el estado inicial de carga de los sistemas de almacenamiento de energía.

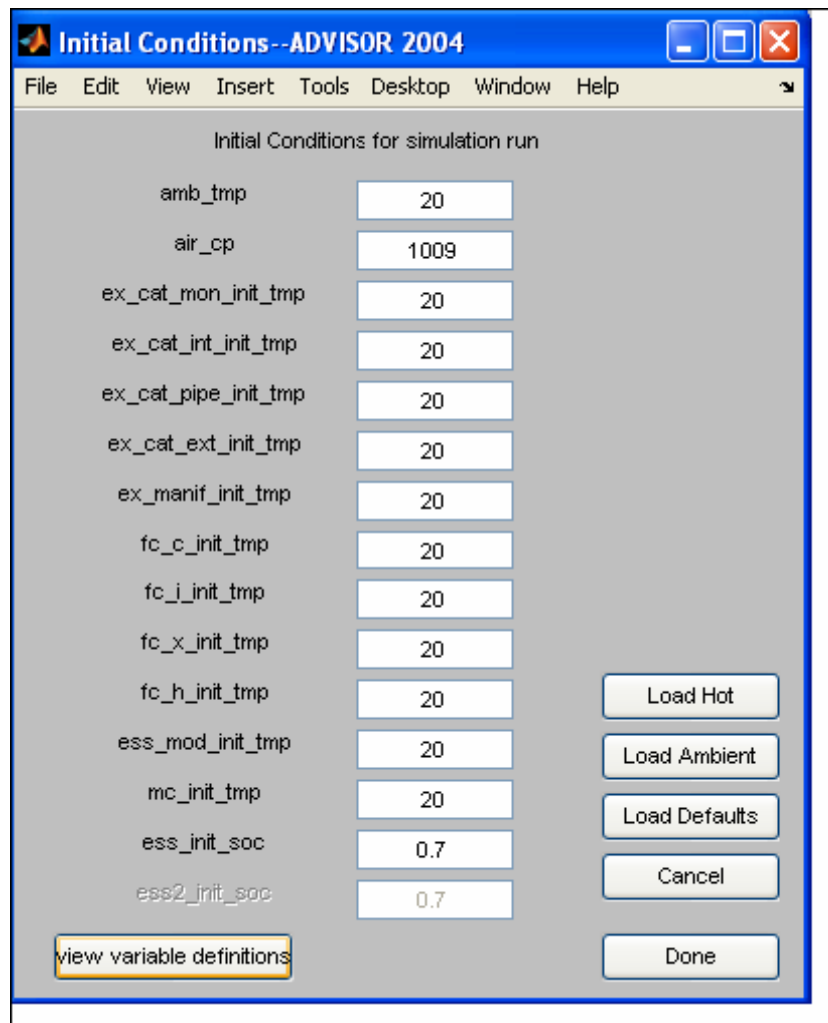


Fig. 16. Ventana condiciones iniciales

3.3. TESTS A REALIZAR

Una vez definidas las condiciones iniciales y el ciclo en el que se va a simular el vehículo ya se puede proceder a la simulación. Sin embargo, existe la opción de realizar al vehículo una serie de pruebas que darán como resultado sus prestaciones. Se puede seleccionar un test de aceleración, uno de pendiente o ambos al mismo tiempo. Para ello se seleccionan respectivamente el botón de “Accel options” y el de “Grade options”.

En la ventana del test de aceleración – Fig. 17 - se fijan primero algunos parámetros relativos al test, como por ejemplo los sistemas de energía que se consideran activados para el test o el tiempo perdido en cada cambio de marcha. En la parte inferior de la ventana se determinan los test que se desea que se realicen, como por ejemplo hasta tres aceleraciones – determinando el usuario entre qué velocidades – o la velocidad máxima.

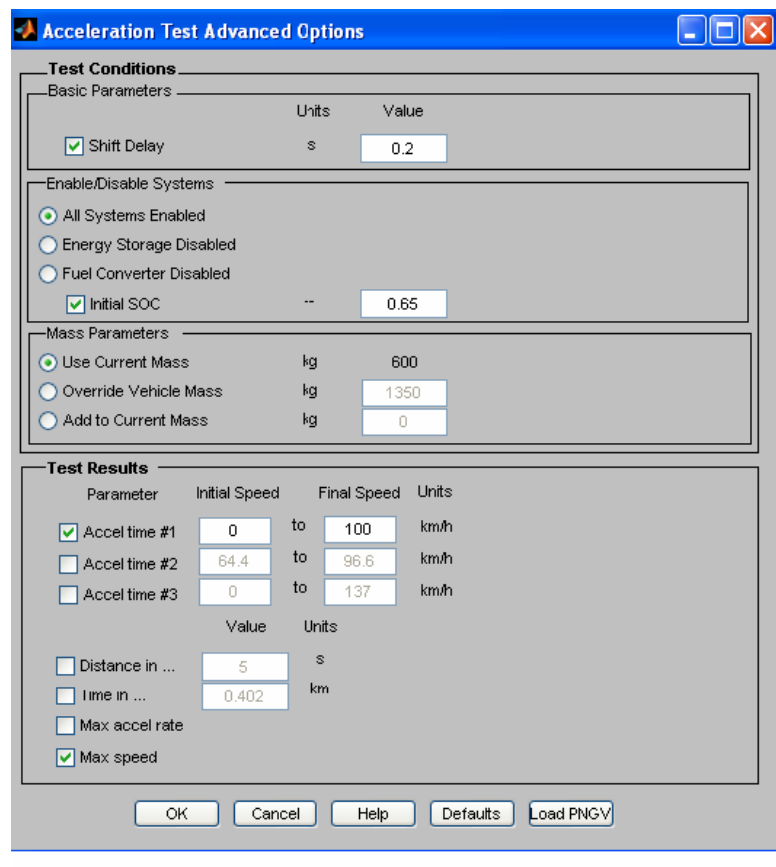


Fig.17. Ventana del test de aceleración

En la ventana del test de pendiente – Fig. 18 – se determina la velocidad y la duración de la pendiente, y se obtiene como resultado la pendiente superable en esas condiciones. Además, se fijan igualmente los parámetros comentados en el test de aceleración.

Grade Test Advanced Options

Test Conditions

Basic Parameters		Units	Value
<input type="checkbox"/>	Grade	%	6
<input checked="" type="checkbox"/>	Speed	mph	55
<input checked="" type="checkbox"/>	Duration	s	10
<input type="checkbox"/>	Gear Number	--	1

Enable/Disable Systems

All Systems Enabled
 Energy Storage Disabled
 Fuel Converter Disabl...

<input type="checkbox"/>	Initial SOC	--	0.65
<input type="checkbox"/>	Minimum SOC	--	0.6

Mass Parameters

<input checked="" type="radio"/>	Use Current Mass	kg	600
<input type="radio"/>	Override Vehicle Mass	kg	600
<input type="radio"/>	Add to Current Mass	kg	0

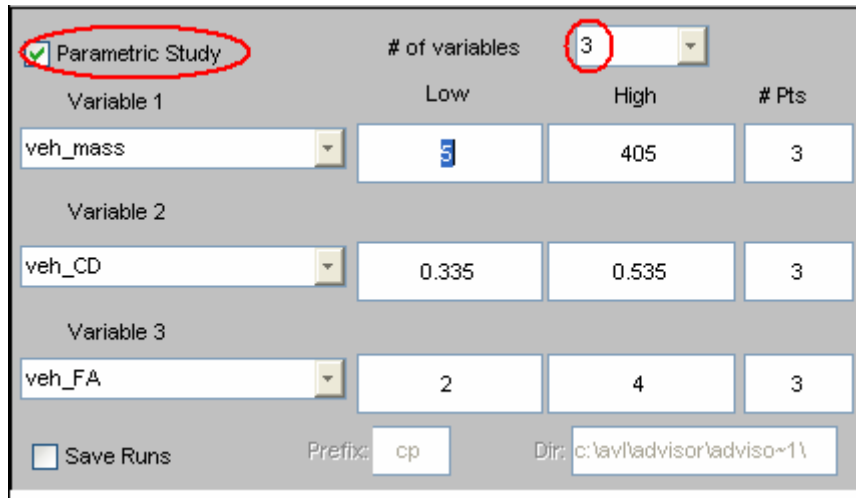
Solution Conditions

<input type="checkbox"/>	Grade Lower Bound	%	0
<input type="checkbox"/>	Grade Upper Bound	%	10
<input type="checkbox"/>	Grade Initial Step Size	%	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Speed Tolerance	mph	0.01
<input type="checkbox"/>	Grade Tolerance	%	0.05
<input type="checkbox"/>	Maximum Iterations	--	25
<input type="checkbox"/>	Display Status	--	0

Fig. 18. Ventana del test de pendiente

3.4. ESTUDIO PARAMÉTRICO

El programa ofrece la posibilidad de realizar un estudio paramétrico de hasta 3 variables – Fig. 19 - para observar su influencia en los resultados. Para ello se deben introducir los valores inferiores y superiores de cada variable y el número de puntos. Se debe tener en cuenta que cada punto del estudio paramétrico se obtiene con una simulación, por lo que si se exige un elevado número de puntos de tres variables el cálculo puede ser muy lento.



Variable	Low	High	# Pts
veh_mass	5	405	3
veh_CD	0.335	0.535	3
veh_FA	2	4	3

Additional settings: Parametric Study, # of variables: 3, Save Runs, Prefix: cp, Dir: c:\avl\advisor\adviso~1\

Fig. 19. Ventana de estudio paramétrico

Un ejemplo de estudio paramétrico sencillo (sólo 1 variable) es el de la evolución del consumo de combustible en función de la masa del vehículo de la Fig. 20.

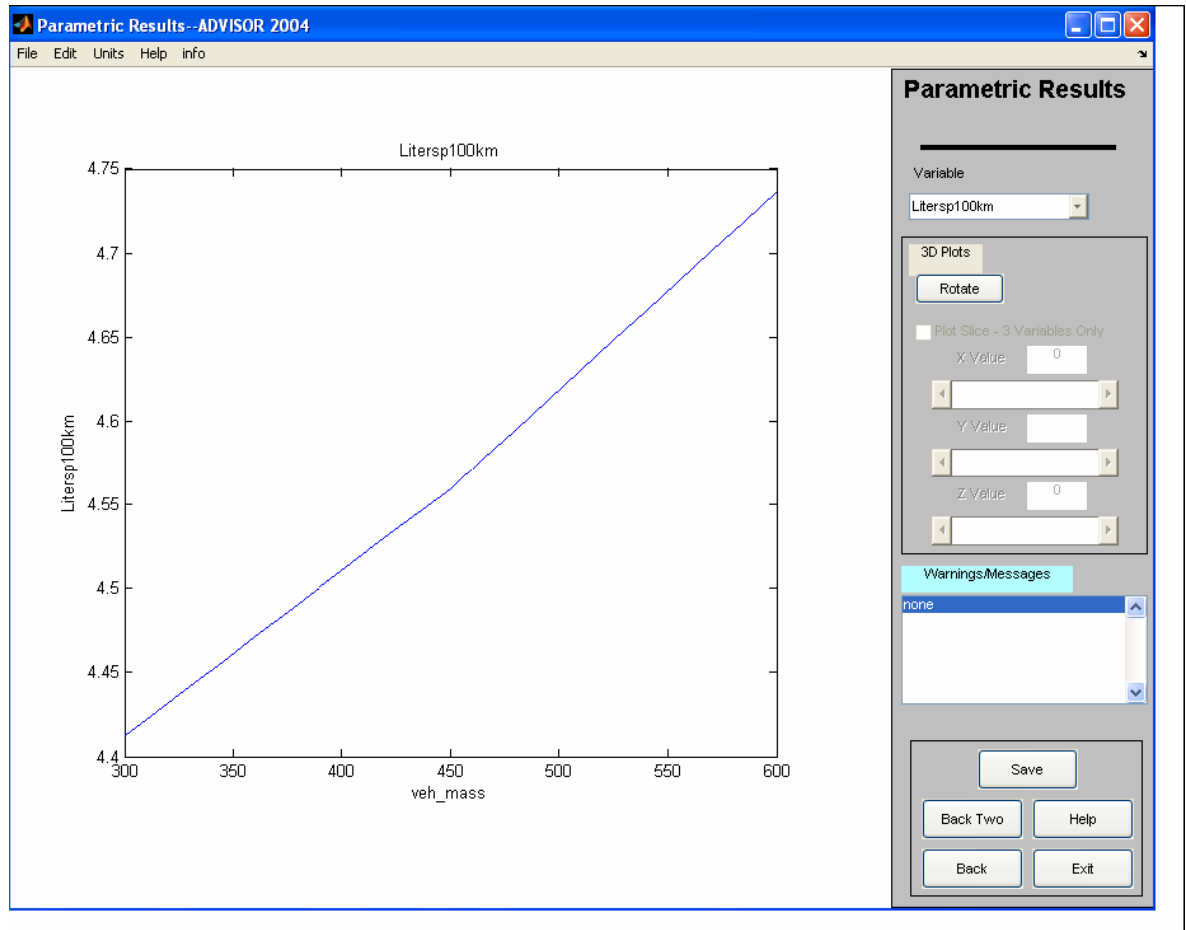


Fig. 20. Resultado de estudio paramétrico

3.5. CARGAS AUXILIARES

Si se desea aplicar al vehículo unas cargas auxiliares detalladas se debe pulsar el botón “Elec. Aux. Load” en la parte inferior derecha. Aparece entonces la ventana de cargas auxiliares – Fig 21 – en la que se pueden modelar con más precisión las cargas auxiliares del vehículo, como por ejemplo, la carga de las luces, de la radio o de los asientos calefactables.

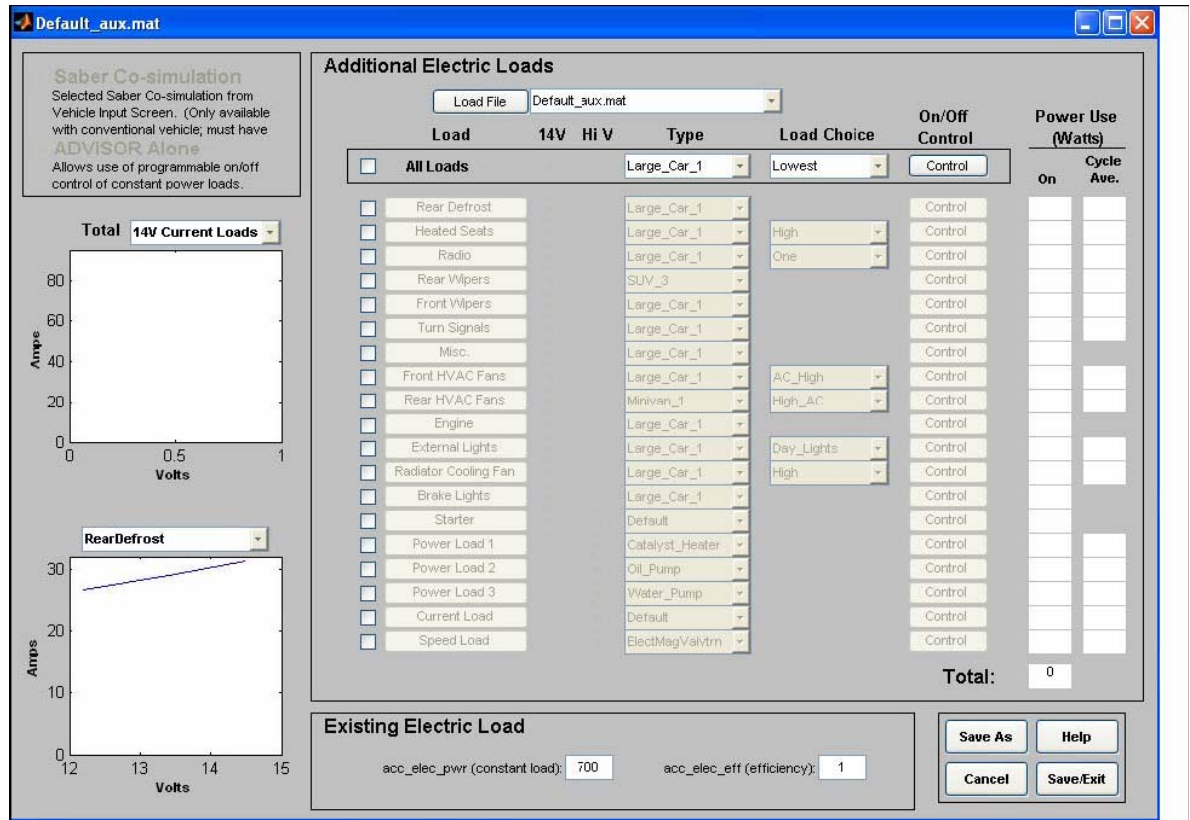


Fig 21. Ventana de cargas auxiliares

3.6 ESTRATEGIA DE CONTROL

El programa ofrece la posibilidad de modificar la estrategia del sistema de control energético del vehículo. Para ello se debe pulsar el botón “optimize cs vars”. Aparecerá la ventana de optimización de estrategia de control – Fig. 22 – en la que se pueden modificar las variables relativas a la estrategia de control.

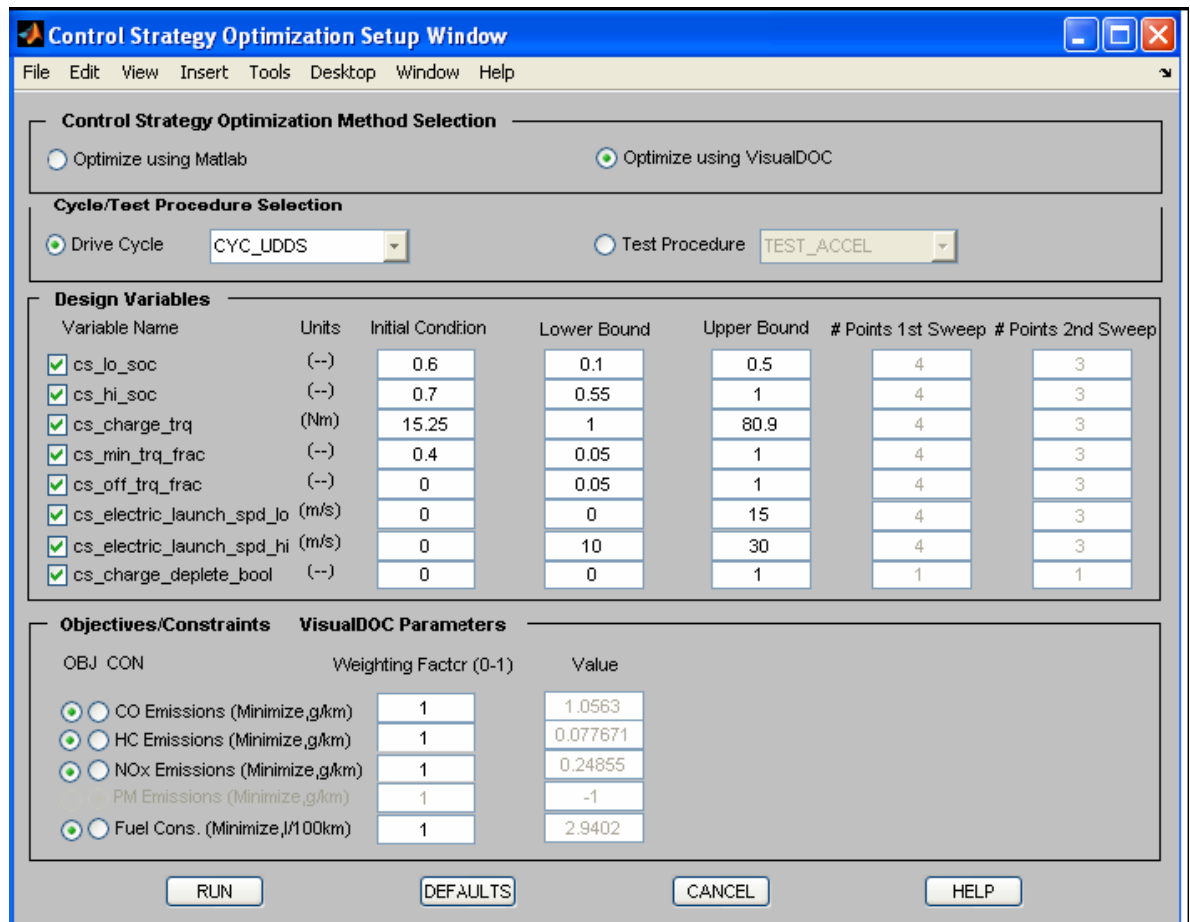


Fig. 22. Ventana de la estrategia de control

4. PANTALLA DE RESULTADOS

Después de haber introducido los datos del vehículo, en la primera pantalla, y los de la simulación, en la segunda, se lleva a cabo el proceso de cálculo de la simulación. Cuando el programa termina dicho proceso, aparece la pantalla de resultados – Fig. 23 -.

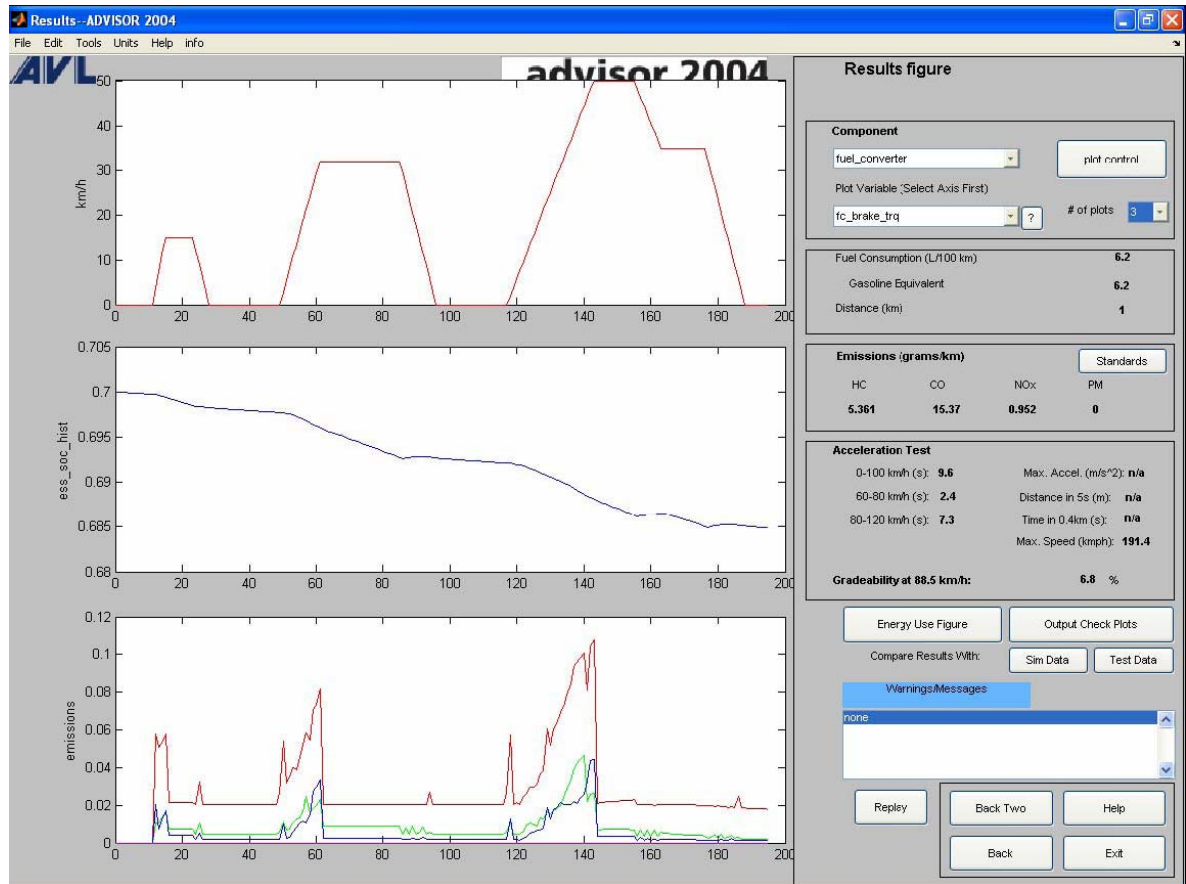


Fig. 23. Pantalla de resultados

4.1. RESULTADOS GRÁFICOS

El programa ofrece la posibilidad de visualizar una gran cantidad de gráficas resultas – que aparecen a la izquierda de la pantalla, tal y como aparece en la Fig. 23. Para la gestión de estas gráficas existe un recuadro en la parte superior derecha de la pantalla – Fig. 24 -. En primer lugar se encuentran dos pestañas desplegables, en las que se selecciona el componente y la gráfica que se desea visualizar. Existe otra pestaña en la que se elige el número de gráficas a representar en la pantalla, que puede variar desde 1 hasta 4. Por último, aparece el botón “Plot control”, que activa la barra de herramientas para gráficas – Fig. 25 - , con la que se pueden realizar funciones básicas como el zoom, mover la gráfica,

obtener los valores numéricos de cada punto de la gráfica o representar varias gráficas superpuestas (función “hold”)entre otras.

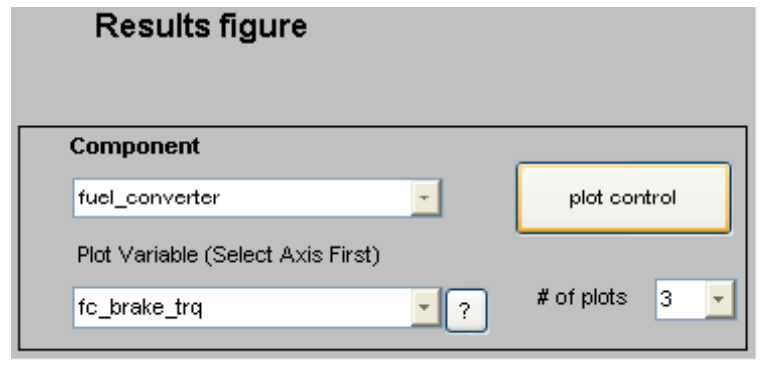


Fig. 23. Gestión de resultados gráficos

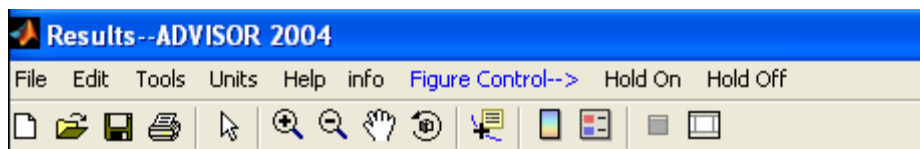


Fig. 24. Barra de herramientas para gráficos

Si se desea obtener las gráficas en ventanas individuales con la barra de herramientas para imagen ya activada, se debe pulsar el botón “Output check plots”, en la parte derecha de la pantalla.

4.3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Además de los resultados gráficos, el programa cuenta con una zona en la pantalla dedicada a resultados numéricos – Fig. 25 -. En ella aparece el consumo cada 100km para el vehículo simulado en el ciclo seleccionado. Se expresa tanto en litros de combustible (independientemente de cual sea este: gasolina, gasóleo, hidrógeno, etc.) como en litros equivalentes de gasolina, unidad que representa una cantidad de combustible tal que contiene la misma cantidad de energía que un litro de gasolina. Esta es una unidad muy adecuada para realizar comparaciones

entre diferentes tipos de vehículos. Junto a los datos de consumo aparece el número de kilómetros recorridos durante la simulación.

Fuel Consumption (L/100 km)	6.2		
Gasoline Equivalent	6.2		
Distance (km)	1		
Emissions (grams/km)			
			<input type="button" value="Standards"/>
HC	CO	NOx	PM
5.361	15.37	0.952	0
Acceleration Test			
0-100 km/h (s):	9.6	Max. Accel. (m/s ²):	n/a
60-100 km/h (s):	5.5	Distance in 5s (m):	n/a
80-120 km/h (s):	7.3	Time in 0.4km (s):	n/a
		Max. Speed (kmph):	191.4
Gradeability at 120.7 km/h:	%		

Fig. 25. Resultados numéricos

Inmediatamente debajo de los datos de consumo aparece el resultado de las emisiones, expresado en gramos por kilómetro. Si se pulsa el botón “Standards”, el programa remite al usuario a una página con enlaces a autoridades competentes en materia de contaminación ambiental en los estados unidos. También se puede obtener una representación gráfica de las emisiones en función del tiempo solicitándolo por medio de las pestañas de selección de gráficas de la parte superior derecha de la pantalla.

Más abajo aparece la zona de prestaciones. Los resultados que aparezcan serán únicamente los solicitados en la pantalla anterior (datos de simulación). Se observan los datos de las aceleraciones solicitadas. Las prestaciones que no se ha solicitado simular aparecen como “n/a”.

En la parte inferior derecha aparece una zona reservada a mensajes acerca de las incidencias de la simulación. Si no ha existido ningún tipo de problema, el

recuadro aparecerá vacío – Fig. 26 -. En cambio, si la simulación no se ha desarrollado normalmente – por ejemplo, el vehículo no ha sido capaz de seguir el perfil de velocidades que marcaba el ciclo de utilización – aparece un mensaje de atención similar al de la Fig. 27. Se puede detectar que un vehículo no ha sido capaz de seguir a partir de la gráfica de velocidad requerida y velocidad adquirida en función del tiempo – aparece un ejemplo en la Fig. 28 -.

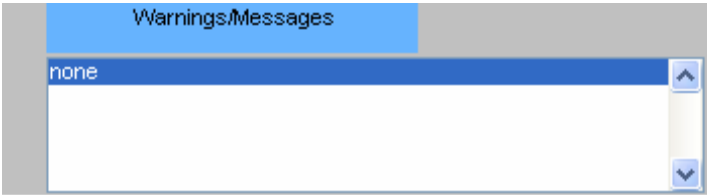


Fig. 26. Ventana de mensajes. Simulación correcta



Fig. 27. Ventana de mensajes. Simulación con problemas

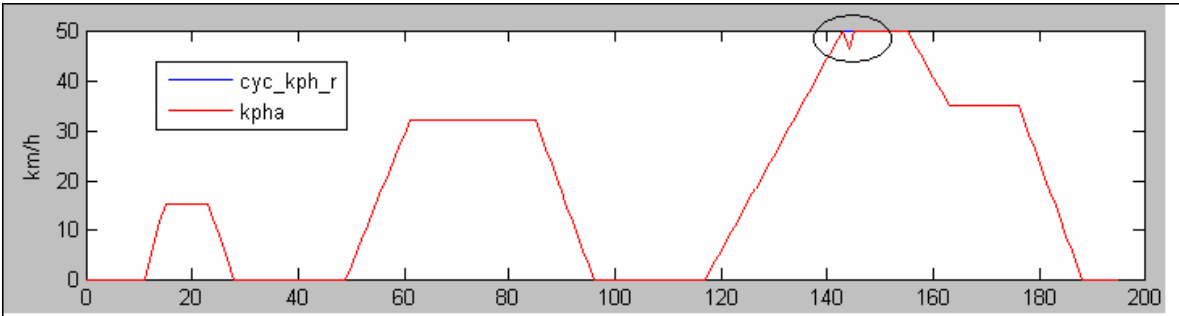


Fig. 28. Gráfica ejemplo de vehículo que no sigue el perfil de velocidad del ciclo

4.4. RESULTADOS USO DE ENERGÍA

El programa ofrece la posibilidad de visualizar el valore de energía que entra y sale en componente del vehículo, tanto cuando opera en modo normal

como cuando lo hace en modo regenerativo. Para ello se debe activar el botón “Energy Use Figure” que activa la ventana que se observa en la Fig. 29.

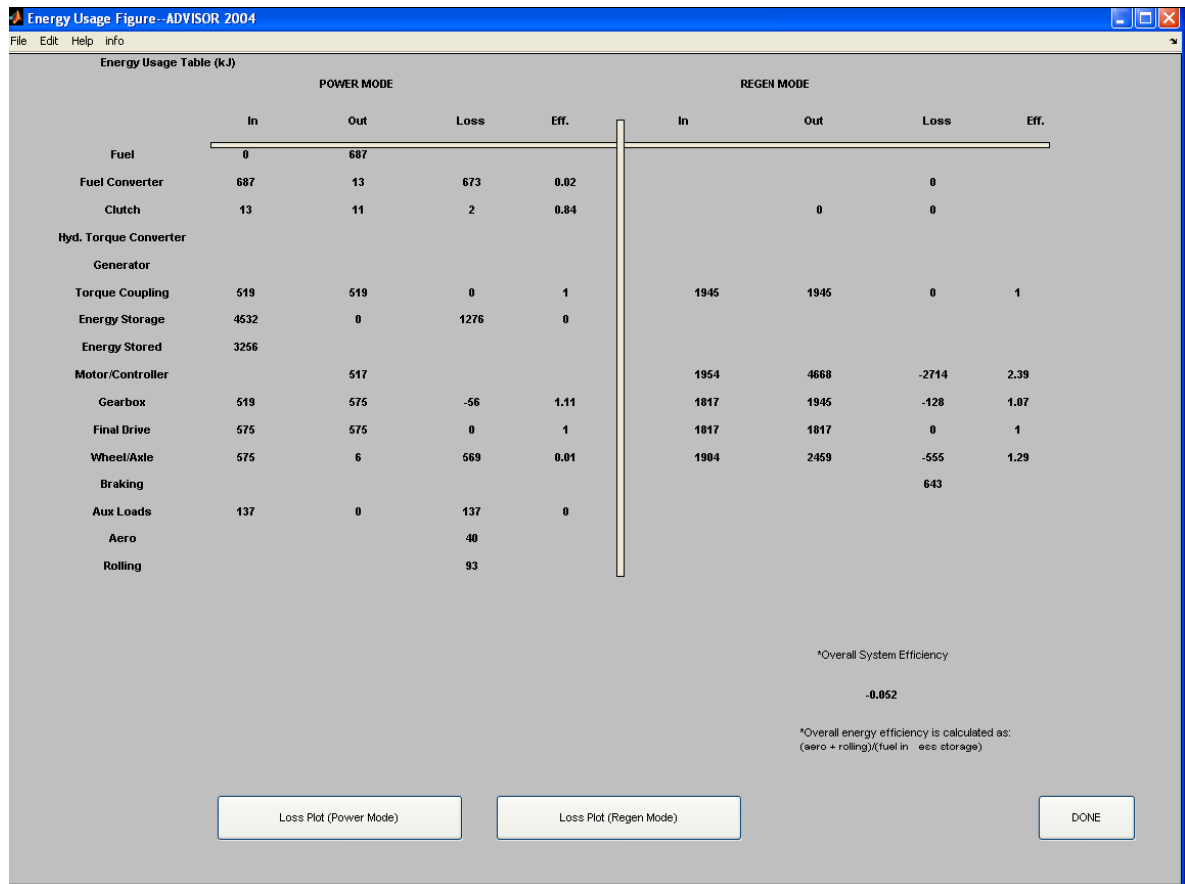


Fig. 29. Ventana de utilización de energía

Esta ventana ofrece la posibilidad de visualizar una representación gráfica de los resultados de utilización de energía, tanto para modo normal como para modo regenerativo. Para ello hay que pulsar los botones de la parte inferior de la ventana “Loss Plot (Power Mode)” o “Loss Plot (Regen Mode)”, según se desee la gráfica de energía funcionando en modo regeneración o en modo normal. En la Fig. 30 aparece un ejemplo de gráfica de utilización de energía en modo normal.

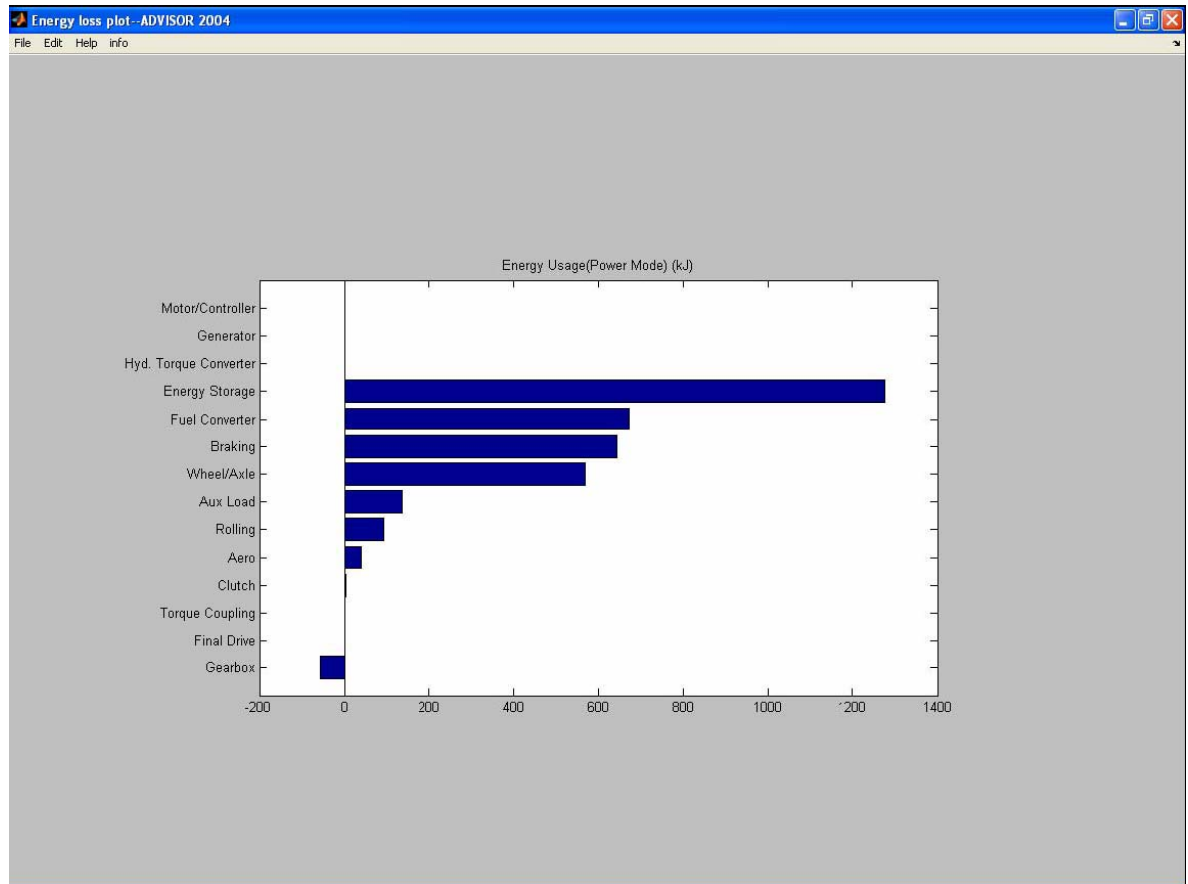


Fig. 30. Ejemplo de gráfica utilización de energía, modo normal

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la manera más recomendable de guardar resultados es la de guardar la simulación “save simulation”, puesto que de ese modo se tiene acceso a toda la información anterior con un solo archivo guardado; al cargar una simulación, aparece la tercera pantalla – resultados de la simulación -. Pero si se retrocede – botones “Back” o “Back twice”, se tiene acceso a los datos de la situación – ciclo, condiciones iniciales, etc – y a los datos del vehículo.

7.3. TIPOS DE BATERÍAS

Batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, se le denomina al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. El mayor salto en el campo de las baterías ocurrió en 1991 al comercializarse la primera de iones de litio que por su poco peso eran ideales para los equipos electrónicos portátiles, y los nuevos coches eléctricos.

La duración de las baterías, los largos periodos de recarga, su capacidad y su alto precio, son los factores clave que explican la escasa implantación de los vehículos eléctricos, hasta ahora. Un vehículo eléctrico se alimenta de la electricidad almacenada en baterías recargables, que permite su funcionamiento con cero emisiones en su punto de uso y sin apenas ruido, excepto el producido por los neumáticos. En la última década hemos asistido a una profunda mejora de las baterías, reduciendo su coste y permitiendo más ciclos de carga, a la vez que ha aumentado la capacidad de almacenamiento por unidad de peso y volumen, se ha eliminado el efecto memoria y ha aumentado su duración. La mejora de las baterías va a continuar.

Como sistemas de almacenamiento de energía, las baterías electroquímicas pueden dividirse en aquellas que almacenan la energía que se les proporciona para luego cederla en la misma forma (pasivas) y aquellas que proporcionan energía por sí mismas (activas).

A continuación se enumeran y explican brevemente los tipos de baterías usadas en los coches eléctricos:

Baterías Ión-litio: La batería de iones de litio, también denominada batería

Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, la ausencia de efecto memoria o su capacidad para operar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados para las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo, y también para los coches eléctricos.

Desde el inicio de su comercialización a principios de los años 1990 su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles y lectores de música, y hoy la industria del automóvil empieza a dar un salto cualitativo. Las baterías de iones de litio deben su desarrollo a la telefonía móvil y su desarrollo es muy reciente. Su densidad energética asciende a unos 115 Wh/kg, y no sufren el efecto memoria. Cada batería proporciona 3,7 voltios, lo mismo que tres baterías de Ni-MH o Ni-Cd (1,2 V cada una). Las baterías de iones de litio se usan en teléfonos móviles, ordenadores portátiles, reproductores de MP3 y cámaras, y alimentarán la siguiente generación de vehículos híbridos y eléctricos puros conectados a la red. A pesar de sus indudables ventajas, también presentan inconvenientes: sobrecalentamiento, alto coste y dependencia del litio. Presentan una larga vida para las baterías profesionales de los vehículos eléctricos. Algunos fabricantes muestran datos de más de 3.000 ciclos de carga/descarga para una pérdida de capacidad del 20% al 33%.

Las baterías de polímero de litio es una tecnología similar a la de iones de litio, pero con una mayor densidad de energía, diseño ultraligero (muy útil para equipos ultraligeros) y una tasa de descarga superior. Entre sus desventajas está la alta inestabilidad de las baterías si se sobrecargan y si la descarga se produce por debajo de cierto voltaje.

Baterías Níquel-metal-hidruro: Una batería de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) es un tipo de batería recargable que utiliza un ánodo de oxidróxido de níquel (NiOOH), como la batería de níquel cadmio, pero su cátodo es de una aleación de hidruro metálico. Esto permite eliminar el costoso (y medioambientalmente peligroso) cadmio a la vez que se beneficia de una mayor capacidad de carga (entre dos y tres veces la de una pila de NiCd del mismo tamaño y peso) y un menor efecto memoria. Por contra, presentan una mayor tasa de autodescarga que las de NiCd (un 30% mensual frente a un 20%), lo que hace que estas se perpetúen en nichos de largos periodos entre consumo (como los mandos a distancia, luces de emergencia, etc), mientras que son desplazadas por las NiMH en el de consumo continuo.

Cada célula de Ni-MH puede proporcionar un voltaje de 1,2 V y una capacidad entre 0,8 y 2,9 Ah. Su densidad de energía llega a los 80 Wh/kg. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad (a causa de un tiempo largo, una alta temperatura, o una corriente elevada), imposibilitando el uso de toda su energía.

Los ciclos de carga de estas baterías oscilan entre las 500 y 700 cargas, algunos de sus inconvenientes son las "altas" temperaturas que alcanzan en las cargas o en los usos.

Baterías de plomo-ácido: Las baterías de plomo son un tipo de batería muy común en vehículos convencionales, no híbridos.

Suelen dar 6V, 12V u otro múltiplo, pero la tensión que suministra cada celda es de 2 V. Tienen una gran capacidad de corriente que las hacen ideales para los motores de arranque.

Su forma más conocida es la batería de arranque de automóviles térmicos. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y dentro de él una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente. Para evitar la combadura de las placas positivas, se dispone una negativa adicional, de forma que siempre haya una placa negativa exterior. Generalmente, en su fabricación, las placas positivas

están recubiertas o impregnadas de dióxido de plomo (PbO_2), y las negativas están formadas por plomo esponjoso. Este estado inicial corresponde a la batería cargada, así que el electrolito agregado inicialmente debe corresponder a la batería con carga completa (densidad 1.280 g/ml). Según el número de placas, la corriente (intensidad) suministrada será mayor o menor. Debajo de las placas se deja un espacio para que se depositen eventuales desprendimientos de los materiales que forman las placas. Para que no haya contacto eléctrico directo entre placas positivas y negativas, se disponen separadores aislantes que deben ser resistentes al ácido y permitir la libre circulación del electrolito.

Baterías de níquel cadmio: Son baterías recargables de uso doméstico e industrial profesionales. Cada vez se usan menos (en favor de las de NiMH) debido a su efecto memoria y al cadmio, muy contaminante. Sin embargo, poseen algunas ventajas sobre el NiMH, como por ejemplo la cantidad de ciclos de carga y descarga, que oscilan entre los 1.000 y 1.500 ciclos, presentando de esta manera una vida más larga. En condiciones estándar dan un potencial de 1,3 V; presentan una densidad de energía de sólo 50 Wh/Kg.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los distintos tipos de baterías en la que aparecen tanto datos técnicos como económicos:

TIPO		Densidad de energía (kW/kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Nº ciclos al 80% de descarga (ciclos)	Tensión de salida (V/acumulador)	Coste mínimo aprox. (€/kWh)
PASIVAS	Pb-ácido convencionales	35	150	1000	2,1	50
	Pb-ácido avanzadas	45	250	1500	2,1	170
	Pb-ácido reguladas con válvula	50	>150	>700	2,1	130
	Pb-ácido de lámina de metal	30	900	>500	2,1	120
	Ni- Metal hidruro	80	200	>2000	1,3	150
	ión-Li	50-150	120-150	>1000	3,6	200
	Zn-aire	200	80-140	200	1,65	90
	Al-aire	220	30	200	1,5	100
ACTIVAS	Na-S	110	150	1000	2,1	125
	Na-NiCl	100	150	1000	2,1	200
	Li-FeS	150	300	1000	1,75 - 2,1	160
	Li-Polímero Sólido	200	350	1000	1,75 - 2,2	125
	Zn-Br	80	150	3000	1,8	200

Tabla 13. Tabla comparativa de distintos tipos de baterías

7.4. TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

A la hora de seleccionar el motor para una aplicación eléctrica en un vehículo hay que tener en cuenta su alta eficiencia, características de par notables, alto rango de velocidad a potencia constante, libertad de mantenimiento, insensibilidad a la sobrecarga, y menor peso y volumen para la misma potencia. El coste puede ser, de todas maneras, el factor más importante en la selección de un motor. Aquí se recoge, a modo de resumen, las características de las tecnologías de máquinas que más se emplean en la actualidad.

- **Motores DC con escobillas:** Los vehículos que utilizan un motor de DC como sistema de propulsión disponen de un motor con una excelente característica par-velocidad. La velocidad del motor es proporcional a la tensión aplicada, lo que simplifica el circuito de control. Los motores DC son menos eficientes que los de AC y su construcción es más complicada debido al conmutador de delgas y escobillas. La eficiencia va cambiando empeorando a bajas velocidades y altos pares (50-60%).

Requieren un mantenimiento regular y son muy sensibles a sobrecargas y sobrevelocidades. La velocidad máxima que logran es menor a la de un motor equivalente de corriente alterna o AC. La eficiencia de estos motores puede mejorarse sustituyendo el sistema de excitación del estator por imanes permanentes, el problema es el precio de éstos, lo que hace que sean sobretodo en motores pequeños.

Un inconveniente de estos motores es su baja densidad de potencia(Kw/volumen) y su baja potencia específica(Kw/Kg).

Estos motores son utilizados sobre todo en pequeños motores en vehículos especiales y en vehículos de bajas potencias.

- **Motores AC:** Por motores de corriente alterna entendemos motores de jaula de ardilla trifásicos de inducción que disponen de un estator trifásico

bobinado y de un rotor de jaula de ardilla. La tensión del estator es trifásica y de frecuencia variable. La eficiencia de estos motores varía con la velocidad y el régimen de carga.

Son los más utilizados, fabricados y contrastados actualmente. Tienen mejor comportamiento en cuanto a densidades de potencia y par específicos que las máquinas DC.

- **Motores Brushless DC:** Los motores sin escobillas de continua DC son llamados también **motores síncronos de imanes permanentes (PM o BLCD)**. Estos motores consisten en un rotor de imán permanente y, típicamente, tres o cuatro sets de bobinas montadas en el estator. La principal ventaja de estos motores con respecto a los de DC es la eliminación de la fricción originada por las escobillas y el conmutador del arco voltaico. Por otra parte para el control de la corriente y flujo en el estator bobinado se requieren complejos circuitos electrónicos para poder medir con exactitud la posición del rotor y así activar los switches apropiados en el momento adecuado.

Los motores brushless tienen mayor eficiencia y fiabilidad que los motores DC con escobillas y las mejores densidades específicas de potencia. Simultáneamente el incremento de costo en los motores brushless se da tanto en el sistema de control como en el mismo motor. Estos motores son especialmente buenos para funcionar a altas velocidades. La mayoría de los vehículos eléctricos de altas prestaciones disponen de estos motores como propulsores.

Su topología de flujo axial es muy recomendable para la configuración de motor en rueda.

Su comportamiento es bastante bueno, manteniendo la eficiencia entre el 82 y el 94% en todo su rango de funcionamiento, aspecto clave para su aplicación en vehículos eléctricos.

- **Motores de reluctancia variable:** Se trata de una tecnología de relativa simplicidad, de bajo coste, aunque presenta algunas desventajas con respecto al Motor DC brushless y serios problemas de alto rizado de par, alto ruido y bajo factor de potencia. Su densidad de potencia y potencia específica son buenas y mantiene su eficiencia (aunque un poco peor que el motor DC brushless) en todo su rango de funcionamiento.

Las máquinas eléctricas candidatas para los sistemas de propulsión eléctrica de vehículos son las máquinas de inducción de corriente alterna, las máquinas DC brushless de imanes permanentes, las máquinas síncronas de imanes permanentes y las máquinas de reluctancia variable. Durante los ciclos de conducción habituales, los automóviles operan típicamente en una fracción de la velocidad y la potencia nominal de la máquina. Los grandes ahorros energéticos en el motor vienen a partir de máquinas de alta eficiencia en los regímenes de baja velocidad y baja potencia.

En la actualidad un gran esfuerzo de diseño, de fabricación, de abaratamiento de costes, etc., se está llevando a cabo en los motores DC sin escobillas (máquinas síncronas de imanes permanentes), los cuales ofrecen mejor eficiencia y mucho mejor relación potencia/peso y potencia/volumen que los motores de corriente continua y que los de corriente alterna de inducción.

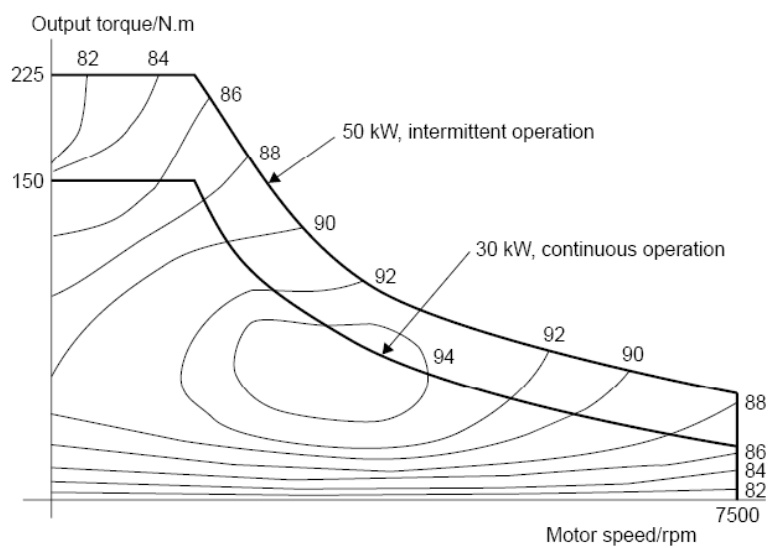


Figura 14. Mapa de eficiencia típico de un motor de 30 KW de imanes permanentes

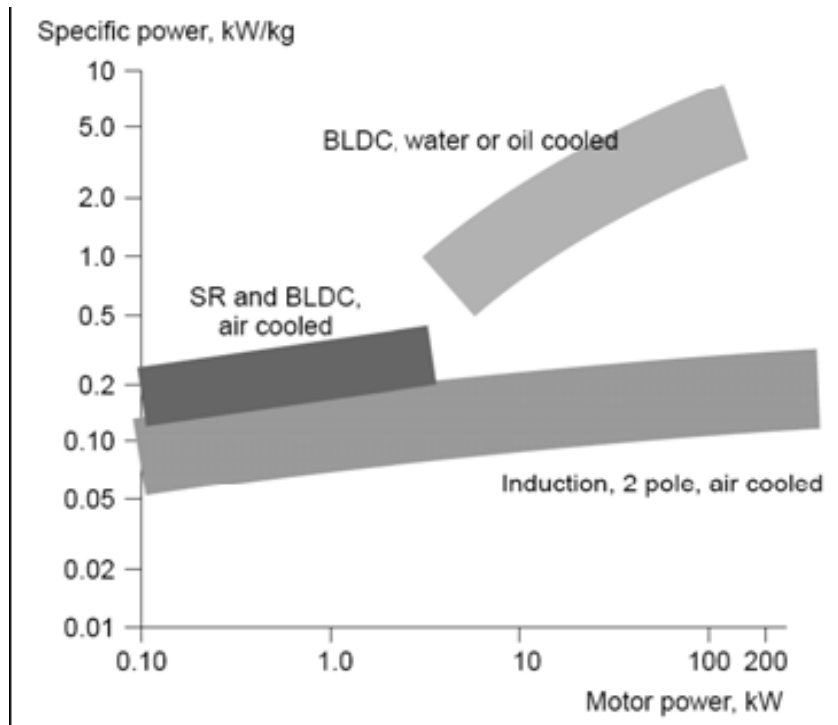


Figura 15. Comparativa de densidades de potencia

En la primera figura se muestra un mapa de eficiencia de un motor de 30 Kw síncrono de imanes permanentes. La máxima eficiencia es del 94 %, aunque ésta es sólo obtenida en un rango de operación. Hay zonas de operación, tal y como se observa en la figura en la que el rendimiento baja al 82-84%. Este aspecto es muy importante debido al amplio rango de funcionamiento o puntos de operación que supone la aplicación de propulsión eléctrica en vehículos. De todas formas los motores síncronos de imanes permanentes consiguen de media una mejor eficiencia que las máquinas de corriente alterna de inducción (en torno al 2 o 3 % mejor) y además su relación potencia/peso y potencia volumen es muchísimo mejor, tal y como se puede observar en la figura 8, dónde las siglas BLDC se corresponden con las máquinas DC sin escobillas (que guardan similitud con las máquinas síncronas de CA de imanes permanentes) y las siglas SR se corresponden con las máquinas de reluctancia variable.

También se desprende de estas gráficas (Figura 9) que la refrigeración del motor es un aspecto muy importante en el tamaño de la máquina eléctrica. Un motor de la misma potencia refrigerado por agua o por aceite es más pequeño que

uno con refrigeración convencional de aire por su mejor y más efectiva evacuación del calor ocasionado por las pérdidas de la máquina. Otro aspecto importante, deducido de estas gráficas, es que a mayor potencia implica mayor eficiencia y también mejor densidad específica de potencia.

En la figura 10 se muestra una tabla con la influencia de la velocidad de la máquina para la misma potencia en el peso de la misma. Con altas velocidades se consigue mejor densidad específica de potencia. El tamaño del motor eléctrico está más fuertemente influenciado por el par motor que por la potencia del mismo. La consecuencia es que para la misma potencia, mayor velocidad de motor se corresponde menor par y por lo tanto el motor será más pequeño. De esta forma si se necesita una velocidad pequeña, un conjunto motor de velocidad alta más reductor puede tener menor peso que un solo motor de baja velocidad. Esta opción de motor de alta velocidad más reductor es la más utilizada en el caso de la propulsión eléctrica de vehículos. El inconveniente es que se introduce un elemento más, la reductora, y por lo tanto un elemento que introduce unas pérdidas, contribuyendo a un empeoramiento de la eficiencia total del conjunto. La utilización de motores sin reductor directamente acoplados o integrados en las ruedas puede ser una solución a tener en cuenta para la mejora en este aspecto. La potencia está distribuida a lo largo de las 2 o 4 ruedas tractoras, siendo de menor valor por unidad y aunque las velocidades de las mismas son más pequeñas (no hay reductora) lo que puede ocasionar un mayor tamaño, se está haciendo un esfuerzo importante en cuanto a investigación, desarrollo y diseño de máquinas de bajo peso y volumen para bajas velocidades, por ejemplo con la tecnología de máquinas de imanes permanentes de flujo axial.

Speed (rpm)	Mass (kg)
3000	270
1500	310
1000	415
750	570

Tabla 14. Influencia de la velocidad en el peso del motor eléctrico.

En la figura se muestra una comparativa para la evaluación de las diferentes tecnologías de máquina eléctrica con respecto a algunas características importantes a tener en cuenta en la aplicación en los vehículos eléctricos.

	DC motor	Induction motor	PMS motor	PMBDC motor	SR motor	PMH motor
Power density	2	3	5	5	3	4
Efficiency	2	3	5	5	3	5
Controllability	5	3	4	4	3	5
Reliability	3	5	4	4	5	4
Maturity	5	5	4	3	3	2
Cost	3	5	2	2	4	2
Total	20	24	24	23	21	22

Tabla 15. Influencia de la velocidad en el peso del motor eléctrico

Se puede observar que la mayor puntuación es obtenida por la máquinas síncronas de imanes permanentes (PMS motor), máquinas DC de imanes permanentes sin escobillas (PMBDC) y las de inducción, aunque si sólo nos fijáramos en los aspectos de prestaciones sin incluir los aspectos relacionados con el coste y la madurez, las máquinas de imanes permanentes DC sin escobillas o síncronas serían las más apropiadas para la utilización en esta aplicación.

Según un informe del programa FreedomCAR¹², los objetivos técnicos a alcanzar por las máquinas eléctricas para la propulsión de vehículos eléctricos a alcanzar en 2010 para la viabilidad de la solución serían:

- Densidad específica de potencia > 1.3 KW / Kg
- Densidad volumétrica de potencia > 5 KW / litro
- Eficiencia = 90% (desde el 10% hasta el 100% de la velocidad al 20% del par nominal)
- Coste < 7 dólares / KW pico

Estos valores habría que ir mejorándolos de cara al 2020 en torno al 40% más. Esto hace que haya que hacer un esfuerzo importante de investigación y desarrollo en este campo de cara a conseguir máquinas de alta eficiencia, de bajo peso y volumen y de bajo coste, con necesidades de investigación claras en cuanto a los materiales de los imanes permanentes, en optimización estructural y aligeramiento de los materiales totales de la máquina. Figura 12, diseño optimizado para la aplicación de propulsión de vehículos eléctricos, nuevas topologías y conceptos de máquina, configuraciones avanzadas de motor en rueda, integración óptima del reductor, sistemas de refrigeración eficientes, etc.

A modo de resumen se citan las necesidades que actualmente requiere la aplicación de propulsión eléctrica de vehículos en cuanto a la máquina eléctrica se refiere:

¹² FreedomCAR, Vehicles Technologies Program, Energy efficiency and renewable energy. US Department of Energy, http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/about/fcvt_mission.html

- Alta eficiencia en todo el rango de operación de la máquina (a lo largo de toda la característica par-velocidad).
- Altas densidades de potencia: Kw/Kg, Kw/l.
- Conceptos de refrigeración de alta eficiencia.
- Necesidades de Par alto a bajas vueltas y aumento del rango de velocidades a potencia constante. Alta eficiencia en todo el rango.
- Diseño integrado motor/inversor para optimización y eficiencia energética.
- Diseño integrado motor/reductor para optimización de peso y tamaño y eficiencia energética.
- Alta eficiencia en los dos modos de operación: como motor y como generador para aprovechar la frenada regenerativa.
- Conceptos avanzados para configuración de motor en rueda.

7.5. TABLA DE RESULTADOS OBTENIDOS CON ADVISOR

Para llegar a las soluciones óptimas en cada escenario de demanda se realizaron sucesivas iteraciones en la selección de parámetros del vehículo. Los resultados de éstas se guardaron en tablas en Excel, las cuales se presentan a continuación. Hay que recordar que el rendimiento se expresa en pérdidas (rendimiento(%) = 100 – pérdidas(%)).

vehículo particular 3 ciclos			carga = 136 Kg		distancia = 127 Km			
chasis	tipo batería	nº módulos	peso baterías	motor	peso vehículo	consumo	recorrido	pérdidas
smcar	pb104	25	750	pm32evs	1576	3,9	105,9	
smcar	pb104	27	810	pm32evs	1636	4,2	105,9	
smcar	pb104	29	870	pm32evs	1696	4,1	118,9	
smcar	pb104	30	900	pm32evs	1726	4	125,6	
smcar	pb104	31	930	pm32evs	1756	4	127	0,251
smcar	pb104	32	960	pm32evs	1786	4	127	
smcar	pb104	31	930	pm49	1768	4	127	0,254
smcar	pb104	31	930	ac30	1766	4,6	112,2	
smcar	nimh90	28	468	pm49	1306	3,6	111,8	
smcar	nimh90	29	484	pm49	1322	3,4	122,3	
smcar	nimh90	30	501	pm49	1339	3,4	127	
smcar	nimh90	30	501	pm58	1349	3,6	121,4	
smcar	nimh90	30	501	pm32evs	1327	3,4	127	0,235
smcar	nimh90	29	484	pm32evs	1310	3,5	120,9	
smcar	nimh93	25	447	pm49	1285	3,5	108,9	
smcar	nimh93	27	483	pm49	1321	3,3	126,5	
smcar	nimh93	28	501	pm49	1339	3,3	127	0,235
smcar	nimh93	28	501	pm32evs	1327	3,3	127	0,233
smcar	nimh93	28	501	pm32ev	1340	3,3	127	0,236
smcar	li_temp	440	499	pm32evs	1325	3,6	105,9	
smcar	li_temp	530	601	pm32evs	1427	3,4	127	
smcar	li_temp	515	584	pm32evs	1410	3,4	127	
smcar	li_temp	505	573	pm32evs	1399	3,4	127	
smcar	li_temp	495	562	pm32evs	1388	3,4	127	
smcar	li_temp	470	533	pm32evs	1359	3,5	116,8	
smcar	li_temp	490	556	pm32evs	1382	3,4	126,1	
smcar	li_temp	491	557	pm32evs	1383	3,4	126,6	
smcar	li_temp	492	558	pm32evs	1384	3,4	127	0,237

Tabla 16. Resultado de simulaciones con Advisor para vehículo particular, 3 ciclos.

vehículo particular 5 ciclos			carga = 136 Kg		distancia = 211,7 Km			
chasis	tipo batería	nº módulos	peso baterías	motor	peso vehículo	consumo	recorrido	pérdidas
smcar	pb104	25	750	ac30	1586	3,9	105	
smcar	pb104	34	1020	ac30	1856	4,4	128,3	
smcar	pb104	34	1020	pm49	1858	3,9	148,2	
smcar	nimh90	30	501	ac59	1349	3,6	120,9	
smcar	nimh90	40	668	ac59	1516	3,8	153,2	
smcar	nimh90	50	835	ac59	1683	3,8	190,5	
smcar	nimh90	55	919	ac59	1767	3,8	211,7	
smcar	nimh90	55	919	pm49	1757	3,6	211,7	
smcar	nimh93	46	823	pm49	1661	3,6	199,8	
smcar	nimh93	48	859	pm49	1697	3,6	207,8	
smcar	nimh93	49	877	pm49	1715	3,5	211,7	0,253
smcar	nimh93	49	877	pm32evs	1703	3,6	211,7	
smcar	nimh93	49	877	pm58	1725	3,7	207,8	
smcar	li_temp	500	567	pm49	1405	3,6	129,1	
smcar	li_temp	600	681	pm49	1519	3,7	163,9	
smcar	li_temp	700	794	pm49	1632	3,7	201,1	
smcar	li_temp	700	794	ac75	1663	3,8	161,3	
smcar	li_temp	700	794	ac62	1642	3,9	156,2	

Tabla 17. Resultado de simulaciones con Advisor para vehículo particular, 5 ciclos.

vehículo tipo taxi			carga = 400 Kg		distancia = 112,3 Km			
chasis	tipo batería	nº módulos	peso baterías	motor	peso vehículo	consumo	recorrido	pérdidas
smcar	pb104	25	750	pm49	1852	3,3	112,3	
smcar	pb104	19	570	pm49	1672	3,2	107,8	
smcar	pb104	20	600	pm32evs	1690	3,2	110	
smcar	pb104	21	630	pm32evs	1720	3,2	112,3	0,216
smcar	pb104	21	630	pm49	1732	3,2	112,3	0,222
smcar	nimh93	16	286	pm49	1388	2,5	103,9	
smcar	nimh93	17	304	pm49	1406	2,5	110	
smcar	nimh93	17	304	pm32evs	1394	2,5	109,9	
smcar	nimh93	18	322	pm32evs	1412	2,5	112,3	0,21
smcar	nimh93	18	322	pm49	1424	2,5	112,3	0,212
smcar	nimh93	18	322	pm58	1434	2,7	107,7	
smcar	nimh93	18	322	pm33	1434	3,7	75,5	
smcar	li_temp	283	321	pm49	1423	2,5	103,9	
smcar	li_temp	288	329	pm49	1429	2,5	105,6	
smcar	li_temp	303	344	pm49	1446	2,5	110,8	
smcar	li_temp	305	346	pm49	1448		111,3	
smcar	li_temp	309	351	pm49	1453	2,5	112,3	
smcar	li_temp	308	349	pm49	1451	2,5	112,3	0,218
smcar	li_temp	307	348	pm49	1450		112,2	
smcar	li_temp	308	349	pm32evs	1439	2,6	112,1	
smcar	li_temp	308	349	pm58	1461	2,7	103,9	

Tabla 18. Resultado de simulaciones con Advisor para vehículo tipo taxi.

vehículo de reparto 2500 Kg				distancia = 91,1 Km							
chasis	tipo batería	nº módulos	peso baterías	motor	peso vehículo	M.M.A.	carga útil	consumo	recorrido	pérdidas	consumo/Tm
smallTruck	nimh93	30	537	ac75	1785	2500	715	5,2	91,1	0,165	7,27
smallTruck	nimh93	29	519	ac75	1767	2500	733	5,2	91,1	no prestac.	7,09
smallTruck	nimh93	27	483	ac75	1731	2500	769	5,2	84,7	no prestac.	
smallTruck	nimh93	25	447	ac75	1695	2500	805	5,2	78,4	no prestac.	
smallTruck	nimh90	31	518	ac75	1766	2500	734	5,3	91,1	0,167	7,22
smallTruck	nimh90	31	518	ac83	1785	2500	715	6,2	75,6		
smallTruck	nimh90	31	518	ac62	1745	2500	755	5,7	82,9	no prestac.	
smallTruck	nimh90	31	518	pm58	1745	2500	755	5,4	89,2	no prestac.	
smallTruck	nimh90	31	518	ac83	1785	2500	715	6,2	75,6		
smallTruck	nimh90	31	518	ac62	1745	2500	755	5,7	82,9	no prestac.	
smallTruck	nimh90	31	518	pm58	1745	2500	755	5,4	89,2	no prestac.	
smallTruck	pb104	25	750	ac75	1998	2500	502	5,8	77,3		
smallTruck	pb104	28	840	ac75	2088	2500	412	5,7	87,3		
smallTruck	pb104	29	870	ac75	2118	2500	382	5,7	90,7		
smallTruck	pb104	30	900	ac75	2140	2500	360	5,7	91,1		15,83
samlTruck	li_temp	450	511	ac75	1759	2500	741	5,2	83,2		
samlTruck	li_temp	480	545	ac75	1793	2500	707	5,2	88,9		
samlTruck	li_temp	487	553	ac75	1801	2500	699	5,2	90,3		
samlTruck	li_temp	491	557	ac75	1805	2500	695	5,2	91		
samlTruck	li_temp	492	558	ac75	1806	2500	694	5,2	91,1	0,17	7,49
samlTruck	li_temp	494	561	ac75	1809	2500	691	5,2	91,1		
samlTruck	li_temp	497	564	ac75	1812	2500	688	5,2	91,1		

Tabla 19. Resultado de simulaciones con Advisor para vehículo de reparto, 2500 Kg MMA.

vehículo de reparto 3500 Kg				distancia = 91,1 Km							
chasis	tipo batería	nº módulos	peso baterías	motor	peso vehículo	M.M.A.	carga útil	consumo	recorrido	pérdidas	consumo/Tm
highlander	pb104	35	1050	ac124	2603	3500	897	7,5	84,9		8,36
highlander	pb104	40	1200	ac124	2753	3500	747	7,5	91,1		10,04
highlander	pb104	38	1140	ac124	2693	3500	807	7,5	91,1		9,29
highlander	pb104	37	1110	ac124	2663	3500	837	7,5	90		8,96
highlander	pb104	38	1140	ac83	2712	3500	788	9,1	73,2	no prestac.	11,55
highlander	NIMH 90	40	668	AC124	2221	3500	1279	6,9	91,1		5,39
highlander	nimh93	36	644	ac124	2197	3500	1303	6,9	89,2	no prestac.	
highlander	nimh93	37	662	ac124	2215	3500	1285	6,9	91,1	no prestac.	
highlander	li_temp	500	567	ac124	2120	3500	1380	7	72,9		
highlander	li_temp	550	624	ac124	2177	3500	1323	7	80,3		
highlander	li_temp	600	681	ac124	2234	3500	1266	7	87,6		
highlander	nicad	75	1050	ac124	2603	3500	897	6,9	89,6	no prestac.	
highlander	nicad	77	1078	ac150	2622	3500	878	7,7	81,1	no prestac.	

Tabla 20. Resultado de simulaciones con Advisor para vehículo de reparto, 3500 Kg MMA.

7.6. CONSUMOS DE VEHÍCULOS TÉRMICOS

A la hora de comparar los consumos de los vehículos eléctricos diseñados con los consumos de sus análogos térmicos, se tuvo que realizar una aproximación de estos últimos. Para ello, se tomaron los datos de varios vehículos de diferentes marcas, tanto de modelos en gasolina como en diesel. El consumo se convirtió a litros equivalentes de gasolina (en los diesel) para expresar el gasto energético en las mismas unidades que el programa Advisor.

A continuación se exponen las tablas con los modelos escogidos, sus consumos, y el consumo medio estimado, primero para vehículos particulares y posteriormente para vehículos tipo taxi:

gasolina					
modelo	potencia (CV)	peso	consumo	consumo l.eq.gasolina	
alfa mito		105	1090	7,6	7,6
bmw serie 1		122	1265	7,5	7,5
citroen c1		68	800	5,5	5,5
fiat punto evo		65	1015	7,3	7,3
ford fiesta		82	1495	7,5	7,5
chevrolet aveo		84	1030	7,2	7,2
mercedes calse a		95	1215	7,6	7,6
opel corsa		85	1100	6,9	6,9
peugeot 107		68	800	5,5	5,5
renault clio		75	1080	7,6	7,6
seat ibiza		60	974	7,3	7,3
smart fortwo		61	750	5,2	5,2
		80,83	1051,17	6,89	6,89
diesel					
modelo	potencia (CV)	peso	consumo	consumo l.eq.gasolina	
alfa mito		95	1225	5,5	6,05
bmw serie 1		115	1295	5,3	5,83
citroen c1		55	885	5,3	5,83
fiat punto evo		75	1090	6,2	6,82
ford fiesta		68	1535	3,5	3,85
opel corsa		75	1100	5,4	5,94
peugeot 107		54	890	5,3	5,83
renault clio		68	1155	5,3	5,83
seat ibiza		75	1135	4,6	5,06
smart fortwo		54	770	3,4	3,74
		73,4	1108,00	4,98	5,48
		77,12	1079,58	promedio gasolina-diesel	
					6,18

Tabla 21. Consumo de turismos térmicos de tamaño pequeño

Los vehículos térmicos escogidos para ser comparados con los vehículos particulares eléctricos fueron turismos relativamente pequeños y de no mucha potencia. En cambio, los vehículos térmicos escogidos para ser

comparados con los vehículos tipo taxi son vehículos de tamaño relativamente mayor y con una mayor potencia (en los vehículos tipo taxi dimensionados se consideró una carga de 400 Kg).

gasolina					
modelo	potencia (CV)	peso	consumo	consumo l.eq.gasolina	
alfa 147		105	1285	11,1	11,1
bmw serie 3		143	1435	7,9	7,9
citroen c5		125	1585	10,8	10,8
fiat linea		120	1275	9,2	9,2
ford mondeo		145	1479	11,2	11,2
opel insignia		140	1498	10,9	10,9
peugeot 308		120	1337	9,3	9,3
renault laguna		140	1444	10,7	10,7
seat altea		105	1390	7,3	7,3
honda accord		156	1414	9,4	9,4
		129,9	1414,2	9,78	9,78
diesel					
modelo	potencia (CV)	peso	consumo	consumo l.eq.gasolina	
alfa 147		120	1365	7,8	8,58
bmw serie 3		116	1475	5,4	5,94
citroen c5		110	1560	7,3	8,03
fiat linea		105	1205	6,5	7,15
ford mondeo		125	1507	6,8	7,48
opel insignia		110	1498	7,6	8,36
peugeot 308		110	1403	6,4	7,04
renault laguna		150	1428	7,8	8,58
seat altea		105	1375	5,2	5,72
honda accord		150	1540	7,3	8,03
		120,1	1435,6	6,81	7,49
		125	1424,9	promedio gasolina-diesel	
					8,64

Tabla 22. Consumo de turismos térmicos de tamaño medio

A la hora de comparar los vehículos eléctricos de reparto con los vehículos térmicos destinados al mismo fin se escogieron unos cuantos modelos de vehículos cuyo peso rondaba los 2500 o los 3500 Kg que circulasen actualmente por nuestras ciudades.

En el caso de las furgonetas más pesadas los modelos escogidos presentaban una M.M.A. de 3500 Kg exactamente, mientras que en el caso de los vehículos de 2500 Kg se trabajó con una población de modelos de entre 2109 y 2770 Kg de peso y de potencias variadas para obtener un espectro aproximado de furgonetas de este tamaño:

Modelo	Potencia	Peso sin carga	Carga útil	Masa Máxima Autorizada	L. eq. G. a los 100 Km
vito furgon extra larga 258(d)	258,00	1840,00	930,00	2770,00	13,09
expert furgon 90(d)	90,00	1661,00	1000,00	2661,00	9,24
expert furgon 120(d)	120,00	1702,00	1000,00	2702,00	10,01
traffic furgon corto 90(d)	90,00	1540,00	1160,00	2700,00	10,78
cangoo furgon 105 (d)	105,00	1294,00	815,00	2109,00	6,93
partner furgon (d)	90,00	1400,00	750,00	2150,00	7,70
turneo connect 90(d)	90,00	1585,00	595,00	2180,00	8,69
	120,43	1574,57	892,86	2467,43	9,49

I. eq. g. por Tm carga Útil 10,6304

Tabla 23. Modelos de furgonetas térmicas de M.M.A. aproximada de 2500 Kg

Los modelos de 3500 Kg de M.M.A. analizados se exponen a continuación en la Tabla 19:

Modelo	Potencia	Peso sin carga	Carga útil	Masa Máxima Autorizada	L. eq. G. a los 100 Km
crafter furgon medio 109(d)	109,00	2516,00	984,00	3500,00	14,52
master furgon 150(d)	150,00	2271,00	1229,00	3500,00	12,10
movano furgon(d)	100,00	2093,00	1407,00	3500,00	11,77
interstar furgon premium 150(d)	150,00	1979,00	1521,00	3500,00	12,10
transit connect media(d)	140,00	1834,00	1666,00	3500,00	14,08
dyna cabina sencilla L 109(d)	109,00	1815,00	1685,00	3500,00	14,19
movano chasis (d)	120,00	1500,00	2000,00	3500,00	11,66
	125,43	2001,14	1498,86	3500,00	12,92

I. eq. G. por Tm carga útil 8,617994663

Tabla 24. Modelos de furgonetas térmicas de M.M.A. aproximada de 3500 Kg

7.7. MIX DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

Los datos usados para construir la Tabla 2 provienen de un informe de la Res Eléctrica Española a día 20 de abril de 2010. La fecha escogida resulta interesante al ser actual ya que en los últimos dos años las proporciones de energías participantes en el mix de generación han variado notablemente: se ha pasado de un 48% de rendimiento de generación a un 36% actual, situándose más cerca del valor medio europeo. Se han tomado los datos de la siguiente tabla, teniendo en cuenta también la proporción de energías participantes en el régimen especial (Tabla 26).



Martes, 20 abril 2010

Balance eléctrico diario (MWh)

Datos revisados el 12/07/2010 • 12:42:51

Balance eléctrico (MWh)	Año	% Δ Año	365 días	% Δ Móvil
Hidráulica	17.315.370	90,52	32.088.298	24,93
Nuclear	18.144.917	5,75	53.747.011	-5,21
Hulla + Antracita	1.233.947	-79,74	8.498.649	-60,80
Lignito pardo	1.472.600	-4,76	7.359.904	2,30
Lignito negro	263.028	-83,52	2.194.185	-57,76
Hulla de importación	1.598.858	-51,81	7.827.080	-5,61
Carbón	4.568.433	-63,60	25.879.818	-38,91
Fuel + Gas	416.644	-33,87	1.868.966	-25,61
Ciclo combinado	17.050.846	-12,64	75.810.892	-8,49
Régimen ordinario	57.496.210	-2,46	189.394.985	-9,86
Consumos generación	-1.793.704	-19,73	-6.680.680	-15,86
Régimen especial ⁽¹⁾	29.586.458	22,97	85.061.113	23,92
Generación neta	85.288.964	5,59	267.775.418	-1,12
Consumos en bombeo	-2.030.788	53,72	-4.445.204	21,22
Saldo intercambios internacionales ⁽²⁾	-1.876.136	-	-8.062.578	-
Demanda transporte (b.c.)	81.382.039	4,97	255.267.636	-0,85
Δdemanda corr. ⁽³⁾	-	3,57	-	-0,90
Pérdidas en transporte	-1.119.722	9,93	-3.191.136	-4,25
Demanda distribución	80.262.317	4,90	252.076.501	-0,81

(1) Incluye energía eólica a partir de valores programados. (2) Un valor positivo

(3) Corregidos los efectos de temperatura y laboralidad.

Demanda máxima b.c.	Año	Histórica
Potencia media horaria (MW)	44.122 (20h - 11/01)	44.876 (20h - 17/12/2007)
Energía diaria (MWh)	895.388 (12/01)	901.130 (18/12/2007)

Generación eólica

Datos revisados el 12/07/2010 • 12:42:51

Generación eólica (MWh)	Año	% Δ Año	365 días	% Δ Móvil
Producción	15.359.097	35,67	40.226.282	27,35

(4) Producción estimada a partir de valores telemedidos, disponibles al finalizar el día.

Datos hidráulicos

Datos revisados el 20/04/2010

Tabla 24. Balance eléctrico español. Mwh obtenidos de cada fuente de energía el último año(hasta 20 abril)

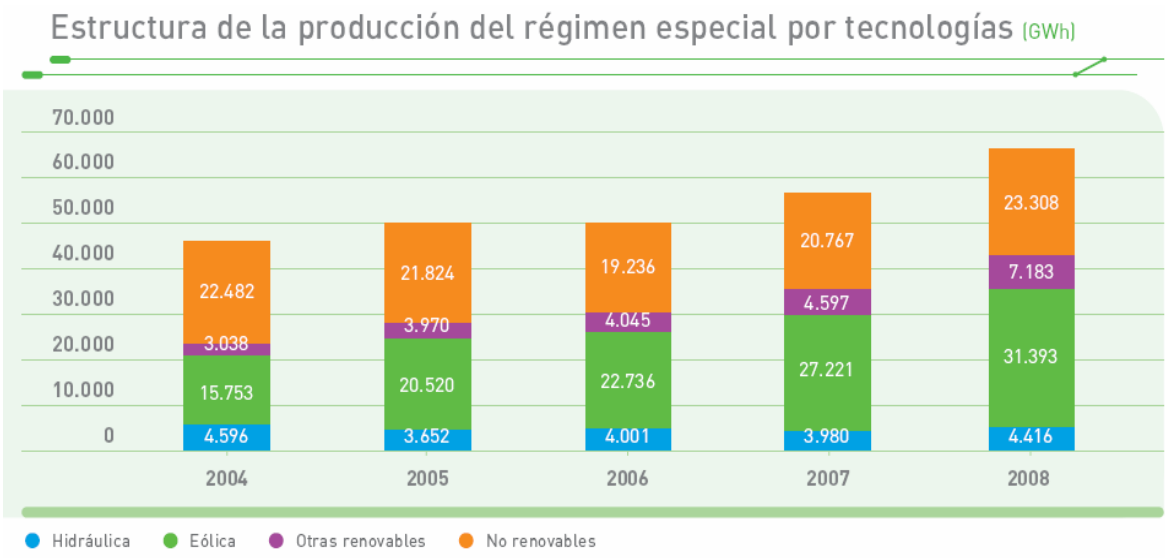


Figura 16. Estructura de producción del régimen especial por tecnologías

Como se ve en la figura 16, dentro del régimen especial, se presenta nuevamente un reparto de tecnologías responsables de generar electricidad. Se ha tomado el reparto del año 2008 para aproximar el del último año, ya que dentro del régimen especial la proporción no varía muy sustancialmente (aparte de que el régimen especial es una pequeña proporción del mix total).

El cálculo, por ejemplo, al generar un Kwh, la cantidad de energía eléctrica generada a partir de energía hidráulica sería:

$$E = 1\text{Kwh} * (17315370/85288964 + 4416 / (23308+7183+31393+4416) * (29586458/85288964)) = 1\text{Kwh} * (E_{\text{hidr}}/E_{\text{total}} + E_{\text{hidr.especial}}/E_{\text{especial}} * E_{\text{especial}}/E_{\text{total}});$$

De esta manera se construiría la Tabla 2 del capítulo 4.1 de la memoria, responsable de las proporciones de energías primarias consumidas por el vehículo eléctrico.