

Requerimientos energéticos de los **vehículos híbridos de transporte urbano** de alto tonelaje

Análisis para los casos de un autobús urbano y un vehículo RSU en función de su utilización y su grado de electrificación



José María López-Martínez*
Felipe Jiménez-Alonso*
Nuria Flores-Holgado*
Daniel Resino-Zamora*

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniera Industrial
Ingeniero Industrial

* INSIA-UPM, Campus Sur UPM. Carretera de Valencia km 7 - 28031 Madrid. Tfno: +34 91 3365290.
josemaria.lopez@upm.es; felipe.jimenez@upm.es; daniel.resino@upm.es; invest1.insia@upm.es

Recibido: 02/08/2010 • Aceptado: 15/11/2010

*Energetic requirements of heavy duty urban transport hybrid vehicles.
Analysis on urban bus and waste collect cases in terms of use and electrification degree.*

ABSTRACT

- The requirements to reduce pollution from vehicles are increasing and this is most prominent, if possible, in urban areas. The way followed by automotive industry to answer this demand consists on vehicle electrification. To reach the aim of pure electric vehicles is passing through intermediate stages of increasing levels of electrification, that impulse knowledge, experience and development of batteries, converters and the other electric equipment that are in early stages of maturity than the rest. With this view, this article presents a modeling method that allows estimating energy requirements of heavy duty vehicles, assuming different driving cycles and kind of services, with the aim of pre-sizing the electric equipment needed for every case of electrification and range. Specifically urban passenger transport and waste collection cases will be analyzed. The aim is to have a tool that make easier the calculation of weight, volume and cost of the required equipment to cover specific operational needs of an electric vehicle, reducing time and cost of tests. These results allow forming a judgment on how far is interesting going with electrification grade on a specific vehicle and use.
- **Keywords:** hybrid vehicle, electric vehicle, heavy duty vehicle, emission pollutants, electric storage.

RESUMEN

Las exigencias para reducir la contaminación provocada por los vehículos es cada vez mayor y esta situación es más destacada, si cabe, en el ámbito urbano. El camino emprendido por la industria del automóvil para responder a esta demanda está siendo el de la electrificación de los vehículos. Para llegar al vehículo eléctrico puro, se está pasando por etapas intermedias de grados de electrificación crecientes, que impulsen el conocimiento, la experiencia y el desarrollo de baterías, convertidores y demás equipamiento que se encuentran en fases más tempranas de madurez que el resto.

Con esta perspectiva, el presente artículo presenta un método de modelado que permite estimar los requisitos energéticos para vehículos de transporte de alto tonelaje o industriales (*heavy duty*), suponiendo también diferentes ciclos de conducción y tipos de servicio, con el fin de pre-dimensionar para cada caso los equipos eléctricos necesarios

para alcanzar distintos niveles de electrificación y autonomía. Concretamente se analizarán los casos de transporte urbano de pasajeros y recogida de residuos sólidos urbanos en las ciudades.

Se pretende contar con una herramienta que facilite el cálculo del peso, volumen y coste de los equipos necesarios para cubrir unas determinadas necesidades de funcionamiento de un vehículo en modo eléctrico, reduciendo los tiempos y los costes de pruebas experimentales. Con los resultados obtenidos, es posible sacar conclusiones acerca de hasta qué grado de electrificación conviene llegar para un determinado tipo de vehículo y un determinado uso del mismo.

Palabras clave: vehículo híbrido, vehículo eléctrico, vehículo industrial, emisiones contaminantes, almacenamiento eléctrico.

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el medioambiente urbano en las

ciudades desarrolladas es creciente en los últimos tiempos. La alta contaminación del aire de las grandes urbes es un problema cada vez más preocupante y una situación cada vez menos aceptada por las sociedades modernas. Fenómenos como el calentamiento global, en el que el transporte parece tener gran peso (Jiménez, et al. 2008), no hacen sino acrecentar la ya de por sí preocupante situación. De hecho, en caso de prolongarse la situación actual, la demanda mundial de energía crecerá un 65% y las emisiones de CO₂ lo harán un 70% entre 1995 y 2020 (Argiri, et al. 1999).

En una situación como la actual, los fabricantes de vehículos tienden a buscar soluciones para paliar los aspectos negativos que el uso de los mismos supone. Se debe tener en cuenta que para 2020 se habrá incrementado entre un 12 y un 15% la población mundial motorizada (General Motors. 2004). Esto conlleva un aumento en la demanda de energía primaria, que si proviene de combustibles fósiles, producirá un aumento en las emisiones. Es por ello que la legislación vigente impone parámetros cada vez más restrictivos que obligan a alcanzar mejores cotas en cuanto a contaminación. La tendencia que en los últimos tiempos se está adoptando va en la dirección de alcanzar la electrificación del transporte. El vehículo alimentado por electricidad tiene la ventaja de que a nivel local sus emisiones son nulas, lo que supone un gran avance en lo que al medioambiente urbano se refiere. Pero actualmente, el nivel tecnológico y de infraestructura necesario para disponer de un parque automovilístico puramente eléctrico no está en los niveles que se requiere, lo que obliga a los fabricantes a adoptar soluciones intermedias pasando por diferentes niveles de electrificación.

Esto ha dado lugar a un concepto de vehículo conocido como *híbrido* o *tensor de autonomía*, cuya tracción puede ser tanto eléctrica como de motor de combustión, pero que en cualquier caso cuenta con ambas tecnologías a bordo. Los sistemas de propulsión híbridos ya se propusieron hace varios años como solución eficiente y factible a los problemas de consumo y emisiones (Unnerwehr, et al. 1976; Weiss, et al. 2000).

En el ámbito de los vehículos *heavy duty*, este tipo de soluciones comienzan lentamente a estar presentes en el mercado, existiendo hoy en día autobuses híbridos de diversos fabricantes, vehículos industriales, algunos vehículos especiales, etc.

Uno de los problemas a los que se enfrenta el desarrollo de este tipo de vehículos es determinar el *mix* eléctrico/térmico que se pretende alcanzar y el dimensionamiento de los componentes del mismo. Hay que tener en cuenta que los equipos de baterías, convertidores, etc. actuales requieren de sofisticados sistemas de control y refrigeración que los hacen bastante pesados. Esto puede conducir a que, para un determinado vehículo y servicio, y contando con la tecnología actual, pretender llegar a su electrificación total sea muy difícil por peso, espacio y rentabilidad.

Es por ello que el presente artículo presenta una herramienta de simulación energética que permite pre-dimensionar los componentes más importantes presentes en

un vehículo híbrido con configuración en serie, en función del tipo de vehículo y tipo de servicio. Para ello, se han desarrollado los siguientes puntos:

- Algoritmo de simulación basado en *Matlab® Simulink®* con el objetivo de modelar el comportamiento dinámico de los vehículos y su utilización.
- Toma de datos de ciclos de conducción representativos para los casos de transporte urbano de pasajeros y recogida de residuos sólidos urbanos.
- Estimación de los consumos energéticos de los equipos auxiliares embarcados en el vehículo, así como de los rendimientos de los componentes implicados y sus ratios energéticos por unidad de peso.

Con todo ello se busca lograr un beneficio en el desarrollo de vehículos híbridos o con extensión de autonomía desde tres puntos de vista. En primer lugar, supone un beneficio para el fabricante de vehículos, que puede ver reducidos los tiempos y los costes asociados a las pruebas necesarias para determinar estos parámetros de manera experimental. En segundo lugar, supone una reducción de costes para los explotadores del servicio, pues permite optimizar el equilibrio entre la inversión necesaria y el ahorro logrado a través de la reducción en el consumo de carburantes. Dicho ahorro viene dado por el hecho de que, en la actualidad, resulta más económica la unidad de energía eléctrica recargada en instalaciones fijas frente a la unidad de energía presente en los combustibles fósiles. Y, por último, supone un beneficio medioambiental derivado de la utilización de tecnologías con menores cotas de emisiones, que favorecen las necesidades actuales de reducción de contaminación.

1. MATERIAL Y MÉTODOS

Para el cálculo de las necesidades energéticas de los vehículos *heavy duty* en las ciudades se han tenido en cuenta las siguientes posibilidades:

- Vehículo: se han modelado las características de un autobús urbano de 12 m de longitud y las de un vehículo de recogida de residuos sólidos urbanos.
- Ciclo de conducción: se han medido ciclos de conducción de ambos vehículos en condiciones reales de circulación. También se han simulado con las condiciones del ciclo Europa.
- Tipo de servicio: se han definido masas variables en función del tipo de servicio desempeñado por el vehículo en cuestión, así como estimaciones de consumo de equipos auxiliares en función también del mismo.

A partir de estos datos, el proceso seguido es el que puede verse en la Figura 1; a partir de los ciclos de conducción medidos, se calculan las distancias recorridas, las velocidades y aceleraciones del vehículo, así como los perfiles de altura medidos a través de GPS. Estos resultados

alimentan el módulo que simula la dinámica de cada uno de los vehículos, con lo que se obtienen los valores de energía, potencia y par requeridos por los mismos. Teniendo en cuenta los rendimientos de la cadena cinemática posterior, el comportamiento de las diferentes partes del sistema y las estimaciones realizadas para el servicio en cuestión, se puede estimar el grado de carga de las baterías. Con éste, es inmediato llegar a unos primeros valores en cuanto a dimensiones de los equipos eléctricos embarcados.



Figura 1: Flujo de información en el proceso de simulación

1.1. CICLOS DE CONDUCCIÓN

Para la realización del presente estudio se han tenido en cuenta dos tipos de ciclos de conducción. Por un lado, y con el fin de filtrar en cierta medida la variabilidad que los datos reales llevan asociados, se ha simulado el conocido ciclo ECE-15 o ciclo Europa, únicamente en su parte urbana. Por otro, se ha recurrido a la medición de ciclos reales correspondientes a una serie de líneas de autobús urbano y una serie de trayectos de recogida de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Madrid. Para realizar la simulación, se han asociado diferentes tipos de perfiles de altura a dichos ciclos de conducción. En el caso de los datos reales, el perfil de alturas utilizado también ha sido el real. En el caso del ciclo Europa, se han utilizado perfiles constantes para poder estudiar su influencia.

1.1.1. Ciclo Europa

Se trata de un ciclo estandarizado que trata de representar un uso típico del automóvil en Europa. Consta tanto de una parte puramente urbana, como de una parte extraurbana, la cual se ha obviado en este estudio por estar trabajando únicamente en el ámbito de la ciudad. La parte utilizada de este ciclo es la que puede verse en la Figura 2.

1.1.2. Ciclo medido en condiciones reales

Con el fin de acercarse lo más posible a la realidad del servicio que prestan los diferentes vehículos y optimizar así al máximo cada una de las aplicaciones, se ha considerado la utilización de medidas reales de ciclos de conducción concretos para cada caso. Para la toma de datos de dichos ciclos, se ha utilizado un dispositivo de registro desarrollado por INSIA (DIVAC) que toma la información del vehículo y posicionamiento GPS. El dispositivo de medida DIVAC (Figura 3) tiene por objetivo la adquisición de señales de un

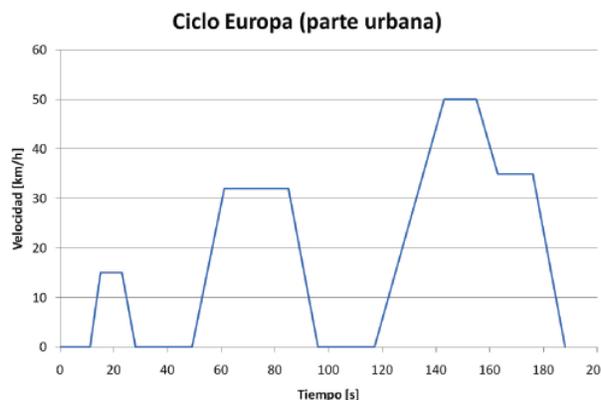


Figura 2: Ciclo Europa (parte urbana)

vehículo de forma autónoma y con registro continuo sobre memoria permanente. Más específicamente, el DIVAC cuenta con numerosas funcionalidades, que se pueden concretar en las siguientes:

- Reloj de tiempo real con alimentación propia interna que permite el cambio de instalación del equipo de un vehículo a otro sin que se produzca una pérdida en los datos, ni en la fecha y hora.
- Registro tanto de señales analógicas como de señales digitales, admitiendo hasta 6 entradas analógicas y otras 6 entradas digitales.
- Medición de la aceleración en el eje X y en el eje Y a través de un acelerómetro interno de $\pm 2g$ de rango de medida.
- Los datos son almacenados en una tarjeta de memoria MMC, pudiéndose acceder a los datos desde cualquier ordenador con dispositivos de lectura de este soporte físico de almacenamiento.



Figura 3: Dispositivo de registro de datos DIVAC

Una de las principales ventajas del sistema es que el registro de datos está marcado por la señal de la llave de contacto, lo que hace que no se requiera ninguna actuación específica por parte del conductor, el cual no es preciso que esté avisado de su instalación. También hace que se

ahorre memoria de almacenamiento mientras el vehículo está estacionado. El registro de fecha y hora permiten la ubicación del ensayo en el tiempo.

En la Figura 4 puede verse un ejemplo del tipo de datos recogidos tanto para el caso de un autobús urbano como para el vehículo RSU. En el detalle puede observarse un ejemplo de cómo quedan registradas las aceleraciones y paradas del vehículo en su funcionamiento normal en tráfico urbano.

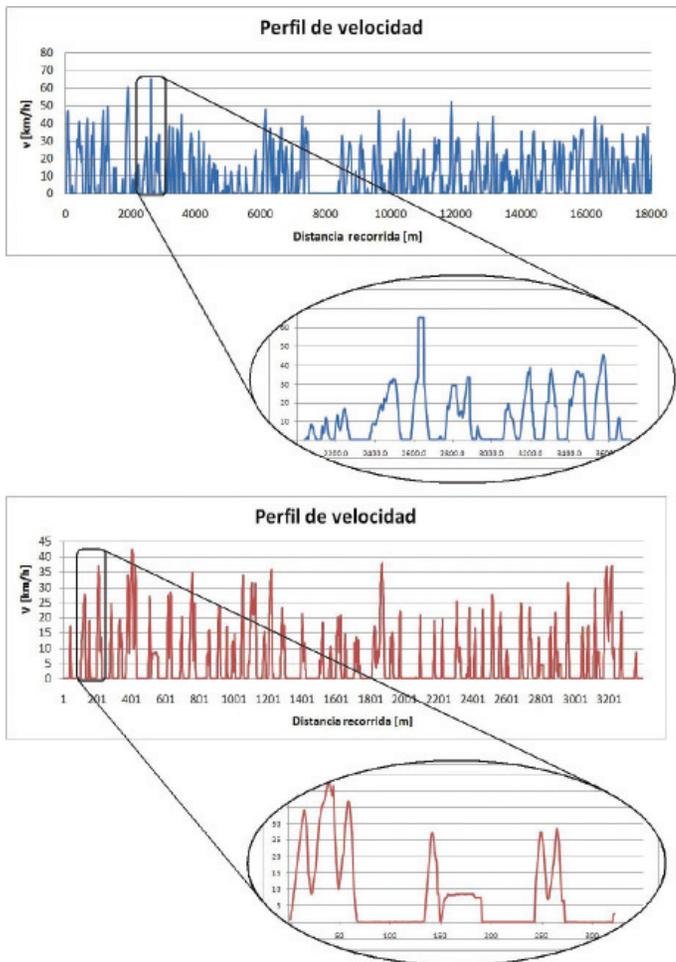


Figura 4: Ejemplos de ciclos de velocidad de autobús urbano (arriba) y de RSU (abajo) medidos

1.1.3. Perfil de alturas

Los perfiles de altura seguidos se han medido mediante geoposicionamiento con GPS. Los datos obtenidos permiten hacer un seguimiento tanto de las rampas que debe superar el vehículo como de su posición. En la Figura 5 puede verse un ejemplo del tipo de datos que se utilizan en este caso.

En el caso del ciclo Europa, se han utilizado perfiles constantes para evaluar en qué medida es una variable influyente en el resultado. Para ello se han introducido en el modelo un perfil llano y un perfil con una rampa del 3% ascendente en la primera mitad del ciclo y del 3% descendente en la segunda mitad, para evaluar el efecto de la frenada regenerativa.

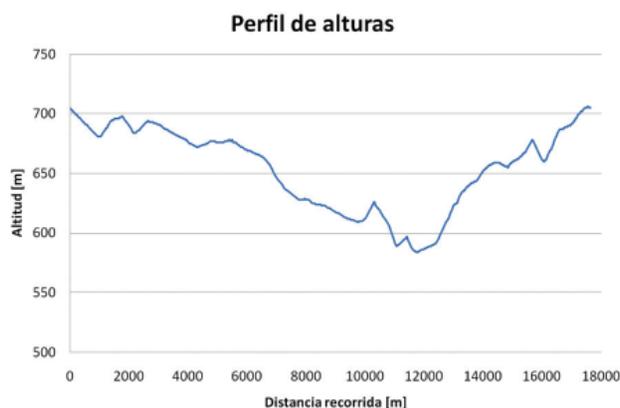


Figura 5: Perfil de alturas de una línea de autobús urbano

1.2. DINÁMICA VEHICULAR

Una vez obtenidos los datos de velocidad y aceleración requeridos por el vehículo, se pasa a simular cuales son las necesidades de energía, potencia y par que el mismo necesita para satisfacer estas demandas. Para ello se recurre a las ecuaciones que pueden verse en la Tabla 1, que determinan la resistencia de un vehículo en función de sus características propias y su ciclo cinemático (Aparicio, et al. 2001; Braess, et al. 2005):

Resistencia aerodinámica	$F_{Ae} = \frac{1}{2} * C_x * \rho_{aire} * A_f * v^2$
Resistencia a la rodadura	$F_{Ro} = m * g * f_r$
Resistencia gravitatoria	$F_G = m * g * \sin\alpha$
Requerimientos de aceleración	$F_{acc} = m * a$

Tabla 1: Algoritmos de simulación de la dinámica vehicular

1.3. RENDIMIENTO DE COMPONENTES Y CONSUMO DE AUXILIARES

Para terminar con el cálculo de las necesidades energéticas de los vehículos híbridos, es necesario tener en cuenta por un lado los rendimientos de todos aquellos componentes de la cadena cinemática presentes en el vehículo, que deben satisfacer la demanda teórica; y por otro, no se puede pasar por alto el consumo energético de los elementos auxiliares, pues en los casos que nos ocupan son muy elevados.

Para el caso de los rendimientos de los distintos componentes se han tenido en cuenta unos valores bastante conservadores y aceptados ampliamente para cada uno de ellos (Miller, 2004). Para la transmisión se ha aplicado un $\eta=0.88$. En el caso de los inversores el valor tomado es de $\eta=0.95$. En el caso del motor eléctrico se ha considerado un valor algo menor de $\eta=0.86$, pues al ser equipos pensados para contar con frenada regenerativa, deben funcionar bien como motor tanto como generador.

A la hora de analizar los consumos energéticos de los equipos auxiliares cabe destacar que los vehículos de transporte urbano de pasajeros cuentan con la peculiaridad de que abren y cierran continuamente sus puertas y que tienen grandes superficies laterales acristaladas, lo que obliga a disponer de potentes equipos de climatización para mantener el confort que el servicio que prestan requiere. Estos equipos además, no suelen estar muy optimizados, lo que hace que sean uno de los mayores consumidores de energía a bordo.

En el caso de los vehículos de recogida de residuos sólidos urbanos, éstos cuentan con unas potentes bombas compactadoras para aprovechar el espacio disponible y rentabilizar así al máximo su explotación. Además, son vehículos con una gran capacidad de carga, que aceleran y frenan continuamente y que además requieren de una cierta solvencia en vías interurbanas para poder descargar en los vertederos situados en los alrededores de las ciudades.

Concretamente, para el modelado de los requerimientos energéticos, se han tenido en cuenta unas estimaciones de consumo de auxiliares como las que se pueden ver en la Tabla 2. En ella cabe destacar el elevado consumo del equipo de aire acondicionado del autobús y de la bomba de compactación del vehículo RSU.

1.4. MODELADO DEL SISTEMA

Para la simulación del comportamiento del sistema híbrido se han modelado las dos principales fuentes de energía: el motor térmico y las baterías. A partir de ahí, y teniendo en cuenta las exigencias a que se van a ver sometidos, se podrá simular correctamente su funcionamiento, de modo que se pueda conocer el flujo de energía existente en el sistema.

	AUTOBÚS URBANO		VEHÍCULO RSU	
Equipo auxiliar	Potencia estimada [kW]	Ratio de Utilización	Potencia estimada [kW]	Ratio de Utilización
Alumbrado interior	1	60%	0,05	60%
Alumbrado exterior	0,75	60%	0,75	60%
Ventilación habitáculo (sin A/A)	5	70%	0,2	70%
Refrigeración equipos electrónicos	0,5	100%	1	100%
Frenos	2	60%	3	60%
Dirección	4	40%	4	40%
Aire Acondicionado	30	70%	12	70%
Bomba de compactación	-	-	50	100%
TOTAL	43,25		93,25	

Tabla 2: Estimación de consumo de auxiliares para un autobús urbano.

1.1.4. Motor térmico

Para el modelado del motor térmico se ha seguido un esquema como el que puede verse en la Figura 6. Los bloques que se han tenido en cuenta son los siguientes (López. 2007):

- Modelo de admisión de aire. El objetivo de este bloque es calcular el gasto másico de aire que entra en la cámara de combustión y la presión en el colector de admisión a partir del régimen de giro del motor y de la posición de la mariposa del acelerador.
- Modelo de inyección de combustible. Con este bloque se pretende calcular el gasto másico de combustible que entra en los cilindros a partir del tiempo de inyección y el régimen de giro.

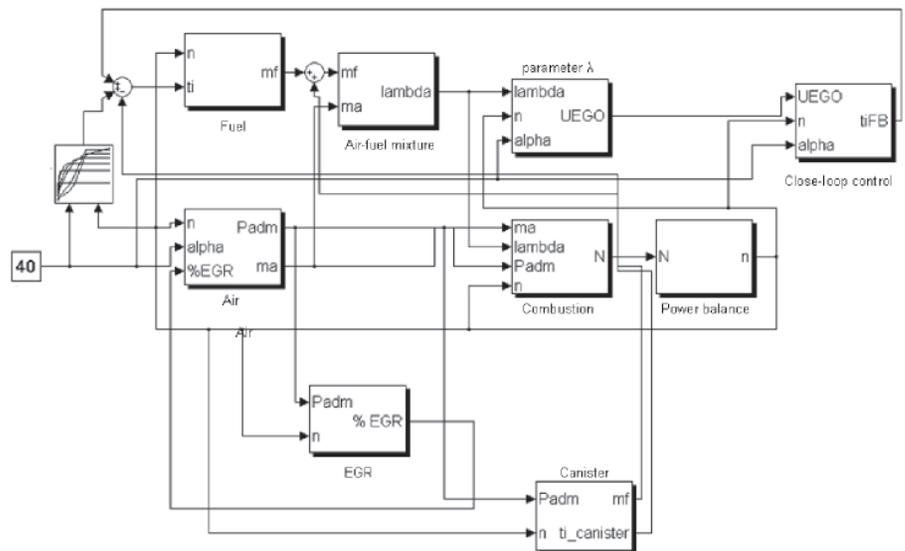


Figura 6: Diagrama de bloques del motor térmico

- Modelo de formación de la mezcla. Este bloque obtiene el valor del parámetro λ a partir de los gastos másicos de aire y combustible en la admisión.
- Modelo de combustión. El objetivo es modelar la potencia generada para así poder calcular el régimen de giro a partir de la dinámica del vehículo.

1.1.5. Baterías

Cuando se trata de modelar las baterías, éstas presentan multitud de variables hasta cierto punto inciertas. En ellas tienen lugar fenómenos como la histéresis,

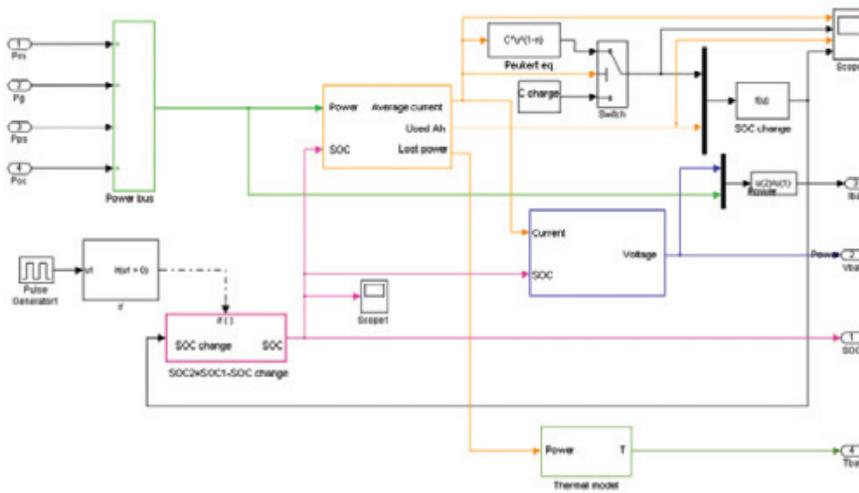


Figura 7: Modelo de simulación de baterías

donde C_n es la capacidad de la batería de acuerdo a su tasa de descarga. Para los casos donde la intensidad se extrae de las baterías, la capacidad se calcula utilizando la ecuación de Peukert, $I^n \times t = C$, donde C es un coeficiente de ajuste y n es el exponente de Peukert, dependiente del tipo de batería (Trinidad, et al. 2003). Cuando la intensidad está siendo introducida en las baterías, se utiliza un valor de $C_n = C_{\text{carga}}$, una constante que debe ser ajustada mediante ensayos. En la Figura 7 puede verse el esquema del modelo de las baterías.

variaciones de capacidad según la temperatura, variaciones en la vida útil esperada en función de la profundidad de descarga, etc. que son muy complejos de evaluar. Los objetivos para lograr una correcta simulación de cualquier batería integrada en un sistema híbrido de tracción son los que siguen (Ceraolo, 2000; Salameh, 1992):

- Dar información del estado de carga (SOC) continuamente. Los vehículos híbridos basan su estrategia de control en este parámetro para evaluar su autonomía.
- Describir la energía de la batería, su potencia, voltaje, intensidad y rendimiento en función del estado de carga durante los procesos de carga y descarga.
- Calcular los cambios en la energía almacenada como resultado de los ciclos de carga y descarga, la recuperación de la energía cinética mediante la frenada regenerativa, la tasa de autodescarga y las variaciones de temperatura.
- Determinar los límites de carga que aceptan las baterías.
- Incorporar un modelo térmico que permita estimar las variaciones en la temperatura de acuerdo a las diferentes estrategias de control.

Para evaluar el estado de carga se recurre a un balance de potencia, en el que se calcula la potencia que la batería necesita suministrar o recibir. El cálculo del SOC se calcula desde el estado de carga de la batería en el instante inmediatamente anterior hasta la medición de la intensidad entrante o saliente de la misma.

$$SOC_2 = SOC_1 - \Delta SOC \quad (1)$$

$$\Delta SOC = \frac{\int_0^t Idt}{C_n} \quad (2)$$

2. RESULTADOS

Con todos los datos anteriormente expuestos ya se está en disposición de estimar los consumos energéticos globales del vehículo en función del servicio a prestar. Una vez conocidos éstos, se procede a aplicar los dos procesos involucrados en el dimensionamiento de los equipos. Uno de dichos procesos es la frenada regenerativa, que resulta una de las grandes ventajas de los vehículos híbridos, pues permite recuperar parte de la energía cinética propia del movimiento del vehículo durante la frenada. En el momento en que se comienza a detener el vehículo, los motores de tracción comienzan a funcionar como generadores, devolviendo energía a las baterías. Este proceso tiene un determinado rendimiento, pues no se puede recuperar toda la energía. Según los ensayos realizados en el seno del proyecto para tal fin, se ha determinado que la horquilla de dicho rendimiento se encuentra aproximadamente entre un 15% y un 40%. El otro es el proceso de carga de las baterías, que viene determinado por el tiempo que se quiera que el vehículo funcione en modo eléctrico puro, la potencia del motor térmico y la capacidad de las baterías de absorber una determinada potencia sin resultar dañadas.

La información obtenida tras una simulación puede verse en la Figura 8. En ella puede observarse en primer término el ciclo de conducción utilizado para cada caso. En segundo lugar aparece la gráfica que determina la potencia instantánea. En último término, puede verse la línea ascendente que indica la energía total consumida por el vehículo, y la línea en forma de dientes de sierra que simula el comportamiento del paquete de baterías. Éste comienza a partir de un valor fijo equivalente a la capacidad de las mismas y, tras descargarse hasta una determinada profundidad – fijada también por el fabricante y el servicio a dar –, se pone en marcha el conjunto motor-generador que las recarga. La pendiente con que son cargadas es resultado del equilibrio entre la

potencia de descarga impuesta por el uso del vehículo y la potencia de carga suministrada por el generador. Así, para un determinado tiempo de funcionamiento en modo eléctrico puro se puede dimensionar el equipo de baterías y para unos requerimientos de carga o funcionamiento del motor térmico, se dimensiona éste último.

Por último, conociendo el ratio *potencia/peso* del equipo de baterías, se puede estimar el peso que supondrán en el total del vehículo, dato este último especialmente relevante para la rentabilidad cuando se trata de servicios basados en el transporte. El citado ratio es muy variable en función de la tecnología empleada en las baterías, de la profundidad de descarga que se pretenda dar a las mismas y de la vida útil que se espere del equipo. Para las baterías de Ion-litio existentes actualmente en el mercado el ratio que se utiliza es del entorno de los 120-140 Wh/kg, pero, según las pruebas realizadas para las aplicaciones objetivo del presente estudio y, contando con los equipos de refrigeración y la estructura de sujeción de la misma, es mejor utilizar un valor algo más conservador de 80 Wh/kg.

Al final de todo el proceso, para poder pre-dimensionar el paquete de baterías sólo resta determinar el tiempo de utilización en modo eléctrico puro que se requiere del vehículo. De este modo, es posible llegar a un equilibrio entre las ventajas que supone embarcar un equipo de baterías que permita un largo periodo de utilización en eléctrico – ya comentadas con anterioridad – y la pérdida de carga útil que sufre el vehículo con dicho equipo.

En la Tabla 3 puede verse una comparativa entre ambos vehículos y la simulación de los diferentes servicios que prestan. En el caso del autobús urbano de pasajeros se ha determinado una utilización de 16 h/día, por ser el dato aportado por la *Empresa Municipal de Transportes de Madrid* (EMT Madrid). En el caso del vehículo RSU, el servicio prestado es de unas 7 horas por itinerario. En función del grado de electrificación – mostrado en porcentaje del total del servicio – y del rendimiento de frenada regenerativa considerado, pueden verse los valores obtenidos para la masa del paquete de baterías según la carga del vehículo.

La carga que se ha tenido en cuenta para cada caso responde al uso de cada uno de los vehículos. Las mediciones que se han hecho sobre los autobuses urbanos

revelan que el proceso de carga y descarga de pasajeros es función de múltiples variables que se escapan de un proceso de simulación, de modo que se ha optado por establecer una horquilla con la mínima carga (la tara del vehículo) y la máxima posible (la masa máxima autorizada). En el caso del vehículo RSU, sí es posible estimar un proceso de carga típico, pues siempre parte vacío al inicio de su recorrido, para ir cargándose progresivamente a lo largo del servicio y llegar al final completamente lleno. En este último caso se ha llevado a cabo la simulación teniendo en cuenta esa masa variable en función del tiempo.

De los resultados obtenidos puede concluirse que, si bien la utilización del ciclo Europa para la simulación del servicio conduce a unos resultados conservadores que pueden servir para determinados propósitos, cuando se trata de optimizar al máximo la distribución de componentes resultan algo exagerados. Las diferencias alcanzan valores del entorno del 8-9% en el caso del autobús y del 12-14% en el caso del vehículo RSU. Conforme avanza el grado de electrificación, dichas diferencias pueden significar un peso muy considerable, que haga viable o no una determinada alternativa.

Por otro lado, se puede observar también que para el caso del autobús urbano, cada hora de funcionamiento en modo eléctrico puro significa un sobrepeso de baterías del entorno de 1000kg, mientras que, debido al mayor consumo de la bomba de compactación en el caso del vehículo RSU, esta cifra aumenta hasta 1700kg. Estas cifras pueden hacer inviable la electrificación más allá de un cierto límite de determinados vehículos, pues, por una parte aumentar la tara de los mismos supone disminuir su carga útil y, por otra, aumentar el peso de baterías implica también considerar modificaciones estructurales que pueden agravar el problema del peso.

3. DISCUSIÓN

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la electrificación completa de un vehículo de estas características, con la tecnología actual y prestando exactamente el mismo servicio, es prácticamente inviable. El peso y el volumen que ocuparían los equipos de baterías necesarios reducirían la carga útil de los vehículos a mínimos, muy lejos de su rentabilidad en explotación. Por tanto, es factible pensar en dos escenarios: o bien se tiende a diseñar vehículos híbridos con motores térmicos o bien se diseñan vehículos puramente eléctricos pero de menor autonomía (5-7 horas). Esto último implicaría un cambio en el modo de explotación de las empresas de este tipo de servicios, pero no necesariamente una disminución de su rentabilidad por este motivo. Además, el sobrepeso que implica electrificar en mayor grado, puede ser compensado en parte por la supresión del motor térmico, generador, algunos inversores y depósitos de combustible.

Por otra parte, a la luz de los resultados, cabe destacar

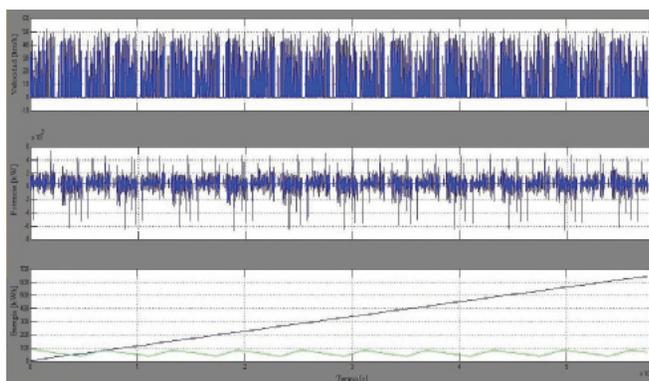


Figura 8: Ciclo de velocidad, potencia requerida y energía consumida

SERVICIO: AUTOBÚS URBANO 16 h/día																	
ELECTRIFICACIÓN	6% (1h en eléctrico)				12% (2h en eléctrico)				50% (8h en eléctrico)				100% (16h en eléctrico)				
η FRENADA	15%		40%		15%		40%		15%		40%		15%		40%		
PESO [t]	12.5	18	12.5	18	12.5	18	12.5	18	12.5	18	12.5	18	12.5	18	12.5	18	
CICLO	PERFIL	Peso estimado de baterías [kg]															
ECE-15	0%	1033	1150	1010	1108	2067	2300	2020	2216	8258	9196	8079	8864	16540	18403	16186	17740
	± 3%	1032	1143	1024	1136	2064	2286	2048	2272	8254	9141	8189	9083	16518	18292	16385	18181
Real	Real	961	1053	919	994	1923	2106	1837	1990	7685	8419	7348	7950	15387	16851	14700	15920
SERVICIO: VEHÍCULO RSU 7 h/itinerario																	
ELECTRIFICACIÓN	6% (1h en eléctrico)				12% (2h en eléctrico)				50% (3,5h en eléctrico)				100% (7h en eléctrico)				
η FRENADA	15%		40%		15%		40%		15%		40%		15%		40%		
PESO [t]	Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		Creciente de 20t a 30t		
CICLO	PERFIL	Peso estimado de baterías [kg]															
ECE-15	0%	1977	1938	3954	3877	6917	6783	13840	13572								
	± 3%	2002	1983	4004	3962	7007	6937	14015	13860								
Real	Real	1742	1691	3484	3383	6097	5918	12196	11842								

Tabla 3: Masa de baterías estimada por vehículo, carga y condiciones de funcionamiento

también que la tecnología utilizada en los medios de almacenamiento de energía eléctrica resulta crucial y que, en parte, el éxito o fracaso de algunas de estas alternativas estará condicionado por la progresión en materia de densidad energética que alcancen dichos medios.

4. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos de este artículo están incluidos en el Proyecto Singular Estratégico TECMUSA (PSE-370000-2009-009) que ha recibido financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 y ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

A la Empresa Municipal de Transportes de la ciudad de Madrid (EMT) y la empresa Fomento de Construcciones y Contratas (FCC) por poner a disposición varios de sus vehículos en los que se han realizado las mediciones.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio-Izquierdo F, Vera-Álvarez C, Díaz-López V. *Teoría de los vehículos automóviles*. 2ª Edición. Madrid: Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, 2001. ISBN: 84-7484-146-1.
- Argiri M, Birol F. "World Energy to 2020: prospects and challenges". *International Energy Agency (IEA)*. Vol. 24 p.905-918.

- Braess H, Seiffert U. *Handbook of Automotive Engineering*. Albrecht P (traductor). 1ª Edición. Warrendale: SAE International, 2005. ISBN: 0-7680-0783-6.
- Ceraolo M. "New dynamical model of lead-acid batteries". *IEEE Trans. Power Systems*. Vol.15 p. 1184-1190.
- General Motors Corp. *Well to Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle System*. North America Analysis. Executive Summary Report, 2001
- *Hydrogen and Fuel Cells. Future of Automobility*. General Motors, 2004
- Jiménez-Alonso F, López-Martínez JM, Aparicio-Izquierdo F, et al. "Comparación de tecnologías para la reducción de emisiones contaminantes en autobuses urbanos". *DYNA Ingeniería e Industria*. Vol.84 p.33-37.
- López-Martínez JM. *El Medio Ambiente y el Automóvil*. 1ª Edición. Madrid: CIE Inversiones Editoriales DOSSAT 2000. ISBN: 978-84-96437-70-8.
- Miller J. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*. 1ª Edición. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. ISBN: 0-86341-336-6.
- Papisavva S, Weber TR, Cadle SH. "Tank to Wheels Preliminary Assessment of Advanced Powertrain and Alternative Fuel Vehicles for China". *SAE International*.
- Salameh M, Casacca MA, Lynch WA. "A mathematical model for lead-acid batteries". *IEEE Trans. on Energy Conversion*. Vol.7 (1) p. 93-97.
- Trinidad F, Gimeno C, Gutiérrez J, et al. "The VRLA modular wound design for 42 V mild hybrid systems". *Journal of Power Sources*. Vol. 116 p. 128-140.
- Unnerwehr LE, Auiler JE, Foote LR, et al. "Hybrid vehicle for fuel economy". *SAE International*. 1976. n° 760121.
- Weiss, et al. "On Road in 2020: A Life Cycle Analysis of New Technologies". MIT Energy Laboratory. 2000. n° MIT-EL00-003.