



# MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

### ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO HÍBRIDO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO.

Autor: D. Carlos de Santos de la Iglesia

Tutor: D. Javier Romo García

Valladolid, Septiembre de 2016

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



# ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO HÍBRIDO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO.

## RESUMEN BREVE

Los sistemas de almacenamiento energético basados exclusivamente en baterías tienen la desventaja de que no pueden absorber mucha potencia en comparación con la energía para la cual son dimensionados. Para evitar este inconveniente, se recurre a la hibridación de sistemas de almacenamiento consistentes en un conjunto de baterías y un banco de capacitores, de tal manera que haciendo que la energía pueda fluir entre los distintos dispositivos de almacenamiento, se puede disponer de un sistema de almacenamiento eléctrico que combina alta capacidad energética y potencia de uso.

En este trabajo se presenta una forma de hibridación de sistemas de almacenamiento energético, una estrategia para su gestión, y una herramienta de cálculo. Mediante esta herramienta de cálculo, se puede conocer el desempeño del sistema híbrido presentado en base a las características del propio sistema de almacenamiento y del vehículo, utilizando como escenario distintos ciclos de conducción homologados.

## STUDY OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE

### SHORT ABSTRACT

The energy storage systems based solely on batteries have the disadvantage that they cannot absorb too much power compared to the energy for which they are dimensioned. With the aim of avoiding this drawback, a hybridization of storage systems consisting of a set of batteries and a capacitor bank can be used. Therefore, the energy can flow among different storage devices, obtaining an electrical storage system that combines high energy capacity and power use.

The present study shows a hybridization energy storage system, a strategy for its management and a calculation tool. Using this calculation tool, it is possible to know the hybrid system performance, shown over the characteristics of the storage system itself and also the vehicle, using different approved driving cycles as scenario.

# ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO HÍBRIDO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO.

## RESUMEN EJECUTIVO

La industria del automóvil se enfrenta a una continua presión por cumplir los cada vez más ajustados parámetros que se le imponen a nivel ambiental, tales como reducir el consumo o las emisiones de gases contaminantes.

Para hacer frente a tales desafíos, una de las líneas en las que se está trabajando en la actualidad es el desarrollo de sistemas de frenado regenerativo eléctrico. Tradicionalmente, la energía que se libera en el frenado del vehículo era disipada en forma de calor. Los dispositivos de frenado regenerativo eléctricos, son capaces de transformar esa energía liberada en energía eléctrica, que es fácil de manejar y almacenar.

La energía generada por los sistemas de frenado regenerativo, no es constante, sino que la mayoría de las veces se ha de almacenar una gran cantidad de energía en muy poco tiempo, el que dura la frenada.

Los sistemas de almacenamiento energético basados exclusivamente en baterías tienen la desventaja de que no pueden absorber mucha potencia en comparación con la energía para la cual son dimensionados. Para evitar este inconveniente, se recurre a la hibridación de sistemas de almacenamiento consistentes en un conjunto de baterías y un banco de capacitores, de tal manera que haciendo que la energía pueda fluir entre los distintos dispositivos de almacenamiento, se puede disponer de un sistema de almacenamiento eléctrico que combina alta capacidad energética y potencia de uso.

En este trabajo se presenta una forma de hibridación de sistemas de almacenamiento energético, una estrategia para su gestión, y una herramienta de cálculo. Mediante esta herramienta de cálculo, se puede conocer el desempeño del sistema híbrido presentado en base a las características del propio sistema de almacenamiento y del vehículo, utilizando como escenario distintos ciclos de conducción homologados.

## STUDY OF A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE

### EXECUTIVE ABSTRACT

Motor business faces continuous pressure to meet increasingly tight environmental parameters which are being imposed by legislation, such as reduce fuel consumption or contaminant gasses emissions.

To deal with those challenges, one of the current work lines is the development of electric regenerative braking systems. In the conventional systems, the energy released in vehicle braking was dissipated as heat. The electric regenerative braking systems can transform this energy in electric energy, easy to manage and storage.

The energy produced by the regenerative braking systems is not constant; most times it is necessary to storage a huge amount of energy in a short time: the time that the vehicle braking lasts.

The energy storage systems based solely on batteries have the disadvantage that they cannot absorb too much power compared to the energy for which they are dimensioned. With the aim of avoiding this drawback, a hybridization of storage systems consisting of a set of batteries and a capacitor bank can be used. Therefore, the energy can flow among different storage devices, obtaining an electrical storage system that combines high energy capacity and power use.

The present study shows a hybridization energy storage system, a strategy for its management and a calculation tool. Using this calculation tool, it is possible to know the hybrid system performance, shown over the characteristics of the storage system itself and also the vehicle, using different approved driving cycles as scenario.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Cristina, por estar siempre y hacer que todo tenga sentido.

A Pablo, por haber empezado a estar y cambiarlo todo.

## NOMENCLATURA

BJT: bipolar junction transistor

CFD: Computational Fluid Dynamics

DOD: Deep Of Discharge

EPA: Environmental Protection Agency (Estados Unidos de América)

EUDC: Extra-Urban Driving Cycle

FPT: Federal Test Procedure (Estados Unidos de América)

GTO: Gate Turn-Off Thyristor

HESS: Hybrid Energy Storage System

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

KERS: Kinetic Energy Recovery System

MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

NEDC: New European Driving Cycle

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

RAE: Real Academia Española de la lengua.

SOC: State Of Charge

UNECE: United Nations Economic Commission for Europe

WLTP: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>ESTADO DEL ARTE – INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS FÍSICOS .....</b>	<b>2</b>
2.1	DINÁMICA VEHICULAR LONGITUDINAL .....	2
2.2	FUERZAS RESISTENTES .....	2
2.2.1	Resistencia a la rodadura.....	2
2.2.2	Resistencia aerodinámica .....	4
2.2.3	Resistencia de ascenso .....	6
2.2.4	Fuerza para acelerar .....	7
2.3	FRENADO REGENERATIVO.....	7
<b>3</b>	<b>CICLOS DE CONDUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
3.1	PRINCIPALES CICLOS DE CONDUCCIÓN .....	9
3.1.1	NEW EUROPEAN DRIVING CYCLE (NECD) .....	9
3.1.2	JAPAN 10-15 .....	10
3.1.3	EPA FEDERAL TEST (FTP).....	11
3.1.4	WLTP.....	12
<b>4</b>	<b>ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO .....</b>	<b>14</b>
4.1	BATERÍAS .....	14
4.2	CAPACITORES.....	15
4.2.1	CAPACITORES.....	15
4.2.2	CAPACITORES EN PARALELO.....	17
4.2.3	CAPACITORES EN SERIE .....	17
4.2.4	SUPERCAPACITORES .....	18
4.3	HIBRIDACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS .....	18
4.4	CONVERTIDORES DC-DC .....	19
4.4.1	INTERRUPTORES DE SEMICONDUCTOR.....	20
<b>5</b>	<b>HESS .....</b>	<b>22</b>
5.1	DEFINICIÓN HESS .....	22
5.2	ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN HESS.....	23
5.2.1	CONFIGURACIONES EXISTENTES .....	23
5.2.2	CONFIGURACIÓN ESTUDIADA .....	24
5.3	GESTIÓN DEL HESS .....	29
<b>6</b>	<b>CÁLCULOS.....</b>	<b>34</b>
6.1	HIPÓTESIS Y PUNTOS DE PARTIDA.....	34
6.2	CÁLCULOS .....	35
6.2.1	CONDICIONES ESPECÍFICAS DE CADA CASO DE ESTUDIO .....	35
6.2.2	CARACTERÍSTICAS DEL HESS .....	35
6.2.3	VARIABLES .....	36
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
7.1	CICLO WLTP .....	43
7.2	CICLO NEDC.....	46
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>49</b>
8.1	CONCLUSIONES.....	49
8.2	PRINCIPALES APORTACIONES DEL AUTOR DEL TFM.....	49
8.3	SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS .....	50
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>



# 1 ESTADO DEL ARTE – INTRODUCCIÓN

En la época actual, existe una marcada y creciente preocupación por el medio ambiente. Ya en 1988, tiene lugar en la sede del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la creación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Una comisión internacional e interdisciplinar, cuya misión era el estudio de las evidencias científicas de la influencia del ser humano en el clima del planeta y de su calentamiento, así como evaluar sus efectos y realizar estudios de prospección sobre sus consecuencias. El primer informe publicado por el IPCC llegó en el año 1990, y confirmó que la amenaza del cambio climático, era real y en este momento estaba respaldado por evidencias científicas.

Desde el momento en que el consabido efecto invernadero y su principal consecuencia (el calentamiento global) quedaba demostrado, las continuas advertencias de los científicos acerca de los efectos ya observables en el mundo, está propiciando un cambio en la mentalidad global que, aunque lento, se manifiesta continuo.

La industria del automóvil se enfrenta a una continua presión por cumplir los cada vez más ajustados parámetros que se le imponen. Bien sea por legislación o simplemente por exigencias del propio mercado, cada vez más, los fabricantes de automóviles han de rebajar los consumos de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las alternativas para luchar contra la contaminación causada por la utilización de combustibles fósiles en los actuales sistemas de transporte, es la de los coches eléctricos. En ellos, aunque es verdad que la huella de carbono generada por kilómetro recorrido es prácticamente igual, si es cierto que su uso conseguiría “descentralizar” la acumulación de emisiones en los núcleos de las ciudades. Es verdad que en la actualidad, gozan de poca aceptación entre el público en general debido principalmente a la baja autonomía y a los largos tiempos que se necesitan para recargar las baterías del mismo.

Los vehículos híbridos son la alternativa mejor posicionada para intentar reducir las emisiones de gases contaminantes. Este tipo de vehículos se han introducido más en el mercado generalista, puesto que no prescinden de un motor térmico, que básicamente mantiene las características de los automóviles convencionales, y además cuentan con un motor eléctrico que abre nuevas posibilidades, que van desde la micro-hibridación (uso del start-stop), hasta híbridos enchufables, que permiten la carga de sus baterías desde la red eléctrica.

Una de las medidas que más contribuye al ahorro energético es el frenado regenerativo. Gracias a esto, es posible transformar parte de la energía utilizada para frenar el vehículo y almacenarla para su uso posterior. De esta manera, es posible reducir en gran medida el consumo del vehículo, así como aumentar la autonomía.

El siguiente paso lógico a implementar es la mejora de los sistemas de almacenamiento eléctrico de los vehículos, puesto que de nada sirve tener un dispositivo que genere una gran cantidad de energía en la frenada, si no existe un dispositivo lo suficientemente elaborado como para poder procesar y almacenar toda esa energía en condiciones óptimas.

## 2 FUNDAMENTOS FÍSICOS

### 2.1 DINÁMICA VEHICULAR LONGITUDINAL

Para determinar el comportamiento de un vehículo, es necesario conocer las interacciones que tienen lugar entre el vehículo y su entorno, a fin de clasificar y medir los efectos que ejercen las distintas fuerzas que actúan sobre él en el intervalo de tiempo estudiado.

Dada la naturaleza del estudio que se va a realizar en este trabajo, toda la fundamentación teórica sobre la dinámica vehicular se va a limitar al movimiento rectilíneo del vehículo. El objetivo del estudio es analizar la energía requerida por el vehículo para vencer la resistencia al avance en su recorrido. Por lo tanto, todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo desplazándose en línea recta, se suponen contenidas en el plano de simetría longitudinal de éste.

A continuación se muestra el diagrama de sólido libre del vehículo, donde se analizan los esfuerzos a los que éste está sometido.

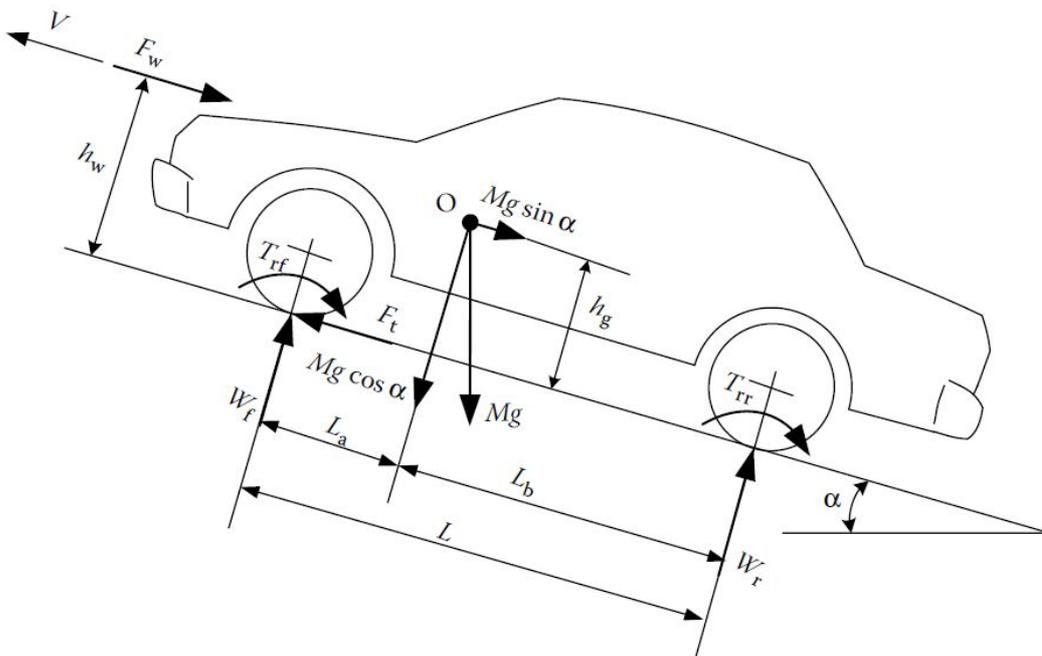


Figura 2.1: Diagrama de sólido libre de un vehículo.

### 2.2 FUERZAS RESISTENTES

#### 2.2.1 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura tiene lugar cuando el neumático del vehículo rueda por la superficie sobre la que se circula. Esta resistencia es debida principalmente al fenómeno de histéresis, que se presenta en el neumático, debido a la naturaleza visco-elástica del caucho que lo compone. Cuando una fuerza

se aplica sobre un material elástico, se produce una deformación en el cuerpo que desaparece una vez que ha cesado la fuerza aplicada. La particularidad que define el fenómeno de la histéresis, es que esa recuperación no se produce instantáneamente cuando cesa la fuerza, sino que la deformación permanece incluso cuando la fuerza ha cesado totalmente. La forma original se recupera unos instantes después.

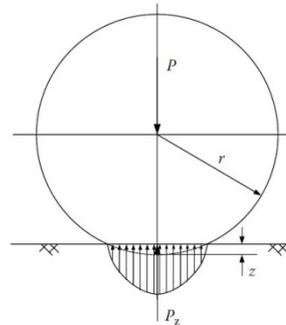


Figura 2.2: Diagrama de presiones sobre un neumático en reposo.

Cuando el vehículo se encuentra en reposo la distribución de presiones entre el neumático y la superficie de rodadura son perfectamente simétricas con respecto al eje de simetría del vehículo y su resultante es vertical.

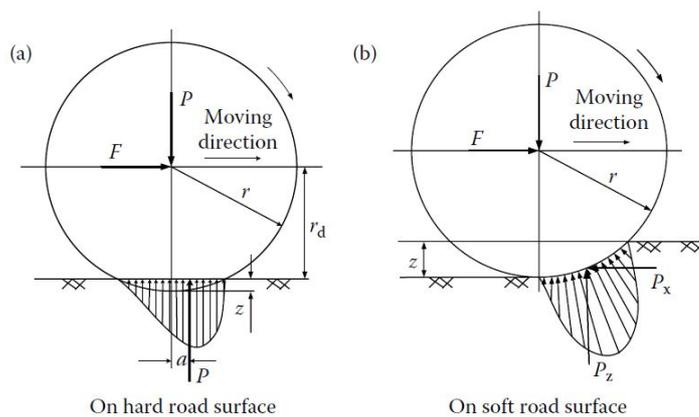


Figura 2.3: Diagrama de presiones sobre un neumático en movimiento.

Pero cuando el neumático comienza a rodar y conforme va adquiriendo velocidad, el fenómeno de la histéresis produce un desfase entre el cese de la fuerza y la recuperación de la deformación. Esto hace que la de la energía que se emplea en la deformación no sea recuperada, al no volver el caucho instantáneamente a su forma cuando cesa la fuerza, como por ejemplo si ocurre en un choque totalmente elástico. Este efecto hace que la distribución de presiones se desplace hacia el lado de la marcha del vehículo, haciendo aparecer una fuerza resultante que se opone al movimiento de avance.

La resistencia a la rodadura del neumático no está causada por la fricción de éste sobre la superficie de circulación, de hecho, la fricción representa entre un 2 y un 10% de la resistencia a la rodadura, mientras que la histéresis supone entre un 90 y un 95% de la resistencia a la rodadura.

La fuerza de fricción es tangencial a la superficie de contacto, mientras que la fuerza de rodadura, presenta una resultante vertical, con la particularidad de que esta resultante, no pasa por el centro de la rueda. Como consecuencia de esto, la resultante crea un par en la rueda que ha de ser vencido con la fuerza del motor.

## 2.2.2 Resistencia aerodinámica

Cuando interactúan dos sólidos, las fuerzas se transmiten a través del punto de contacto de dichos sólidos. Cuando la interacción se produce entre un sólido y un fluido gaseoso (en este caso el aire), en las moléculas del fluido próximas a la superficie del vehículo se produce una distorsión y estas empiezan a moverse alrededor del sólido. La forma en la que dichas moléculas se mueven en el entorno cercano del vehículo requeriría de un amplio estudio aerodinámico que queda fuera del alcance de este trabajo pero en resumen, se puede decir que el punto de contacto de las fuerzas aerodinámicas entre un sólido y un fluido son todos y cada uno de los puntos de la superficie del sólido.

Sobre cada punto de la superficie del automóvil en movimiento existen dos componentes actuando simultáneamente, la componente de presión y la componente de fricción (rozamiento), las cuales generan sendas fuerzas:

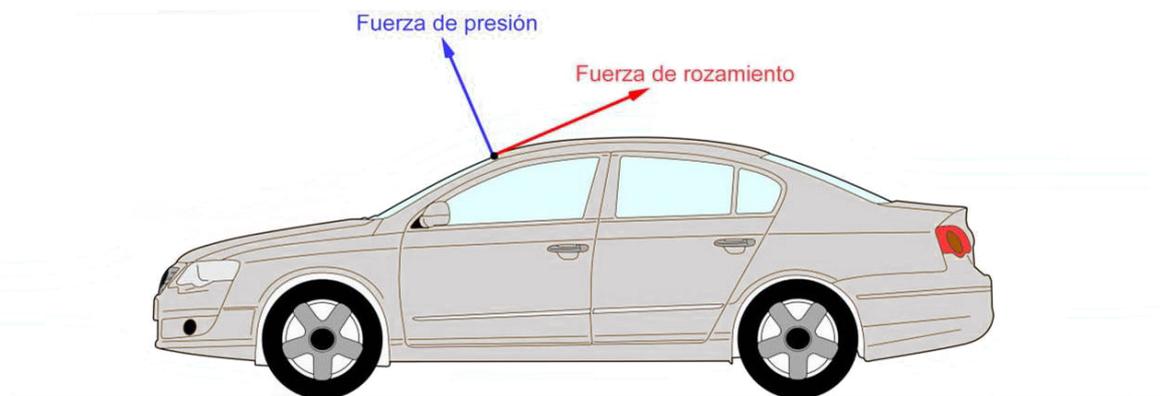


Figura 2.4: Fuerzas aerodinámicas sobre un vehículo.

Por un lado está presente la componente de fricción, tangente a la superficie del cuerpo, y que es debida a los esfuerzos viscosos sobre la superficie del cuerpo.

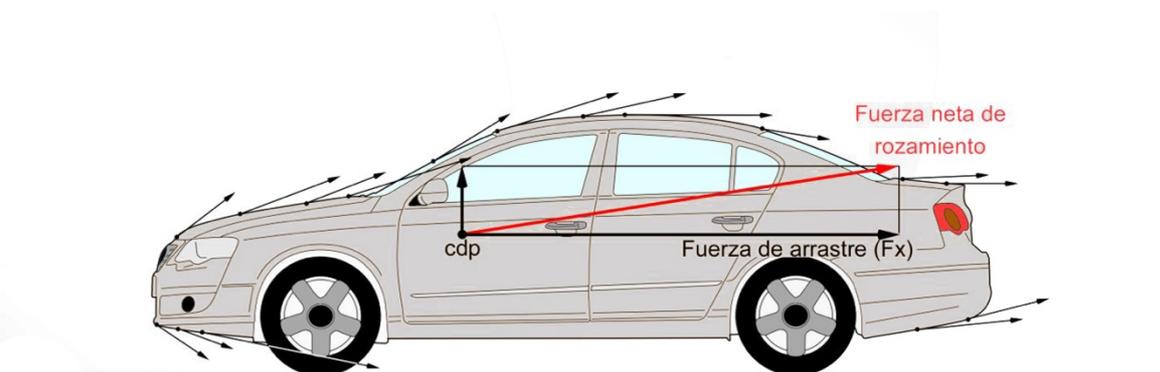


Figura 2.5: Fuerzas de fricción sobre un vehículo.

Por otro lado, también existe la componente de presión, que es normal a la superficie del vehículo y que tiene lugar debido a la velocidad relativa entre vehículo y fluido

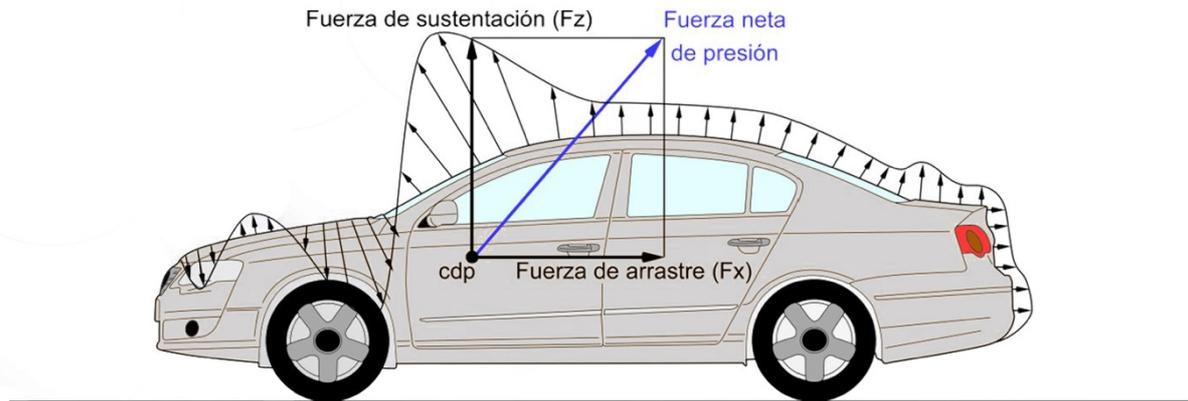


Figura 2.6: Fuerzas de presión sobre un vehículo.

Según el *principio de Bernoulli*, en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante, esto permite establecer una relación entre una distribución de velocidades y una distribución de presiones. Sumando todas las fuerzas de presión que actúan sobre los diferentes puntos a lo largo de la superficie del vehículo, se puede obtener una fuerza resultante neta total, que estará aplicada sobre un punto imaginario, llamado *centro de presiones (cdp)*. Si se descompone dicha resultante en dos componentes (una en la dirección del movimiento del fluido y otra en la dirección perpendicular a éste), se obtiene en la primera componente, la llamada fuerza de arrastre, que se opone al avance del vehículo, mientras que la segunda componente corresponde a la fuerza de adherencia o de sustentación. En aviación se diseñan las superficies para que esta fuerza sea positiva y eleve el avión hacia arriba, mientras que en automoción lo que se busca es que esta fuerza sea de sentido contrario y empuje el vehículo contra la superficie, para conseguir mayor *downforce*. Al maximizar esta fuerza se consigue que la normal del vehículo sea mayor, permitiendo una mayor adherencia del neumático a la superficie y pudiéndose aumentar, por ejemplo, la velocidad del paso por curva sin que aparezca deslizamiento en el neumático.

Debido al comportamiento caótico de los fluidos, en multitud de ocasiones se recurre a los coeficientes, que son números adimensionales que definen de una manera sencilla la multitud de efectos que se dan en la mecánica de fluidos en general y en la aerodinámica sobre el vehículo en particular. Estos coeficientes se determinan de forma experimental, bien en el túnel de viento o bien mediante software CFD, haciendo que se puedan predecir el comportamiento del vehículo conociendo dichos coeficientes.

Los coeficientes aerodinámicos más importantes en el campo de la automoción son el coeficiente de arrastre  $c_x$  y el coeficiente de sustentación  $c_z$ .

A continuación se detallan la distribución de presiones junto con los coeficientes de arrastre y de sustentación que se dan en cuatro tipo de carrocerías diferentes.

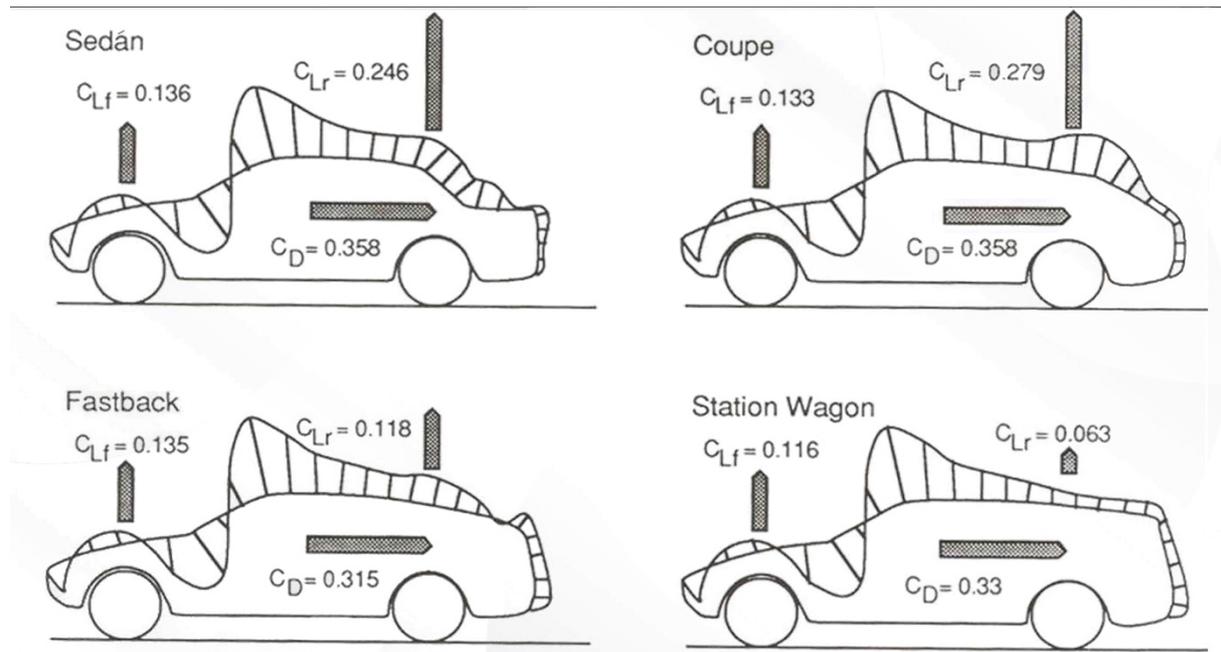


Figura 2.7: Distribución de las presiones en función del tipo de carrocería.

Gracias a estos coeficientes, podemos obtener la expresión de la resistencia aerodinámica de un vehículo, que es de la siguiente forma:

$$F_{AERO} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot A \cdot v^2 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

$F_{AERO}$  es fuerza de resistencia aerodinámica, expresada en newtons (N).

$\rho$  es la densidad del aire. Está medida en  $\text{kg/m}^3$ .

$A$  es el área frontal del vehículo, expresado en metros cuadrados.

$v$  es la velocidad del vehículo expresada en m/s.

### 2.2.3 Resistencia de ascenso

Cuando un vehículo se desplaza a lo largo de una pendiente, aparece una componente de la fuerza de la gravedad en la dirección de desplazamiento que aumenta de forma directamente proporcional con el ángulo de la pendiente.

$$F_g = M \cdot g \cdot \text{sen } \alpha \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

$F_g$  es fuerza de ascenso o de gradiente, expresada en newtons (N).

$g$  es la aceleración terrestre, en este caso se toma  $g=9,81 \text{ m}^2/\text{s}$

$\alpha$  es el ángulo que el plano inclinado forma con la horizontal, medido en radianes.

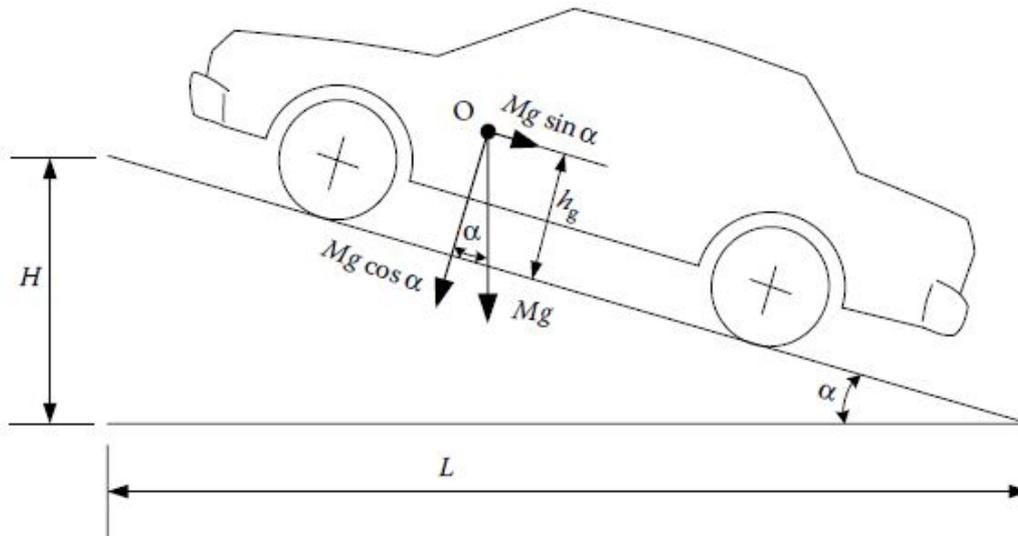


Figura 2.8: Descomposición de la fuerza gravitatoria sobre un vehículo

## 2.2.4 Fuerza para acelerar

La fuerza para acelerar el vehículo no es estrictamente una fuerza que el vehículo ha de vencer para avanzar. Cuando el motor del vehículo está aportando exactamente la fuerza necesaria para vencer todas las resistencias anteriores, el vehículo circulará en régimen estacionario y manteniendo una velocidad constante. En estas condiciones, si el vehículo aumenta su velocidad lineal, será a costa de aportar una fuerza más grande que la suma de las resistencias. La diferencia que hay entre la fuerza aplicada y las fuerzas resistentes, se empleará para acelerar el vehículo, tal y como indica la segunda ley de Newton:

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad \text{Ec. 2.3}$$

A los efectos de este estudio, la fuerza para acelerar, será tomada en cuenta como una sollicitación más a las que el motor y consecuentemente el sistema de almacenamiento energético tiene que hacer frente.

Tanto la fuerza aerodinámica como la de rodadura siempre se oponen al movimiento del vehículo, mientras que en el caso de la fuerza gradiente, podrá ser en contra del movimiento del vehículo (en ascenso), o a favor del movimiento del vehículo (en descenso). Lo mismo ocurre con la fuerza necesaria para acelerar. El sistema tendrá que aportar más energía cuando el vehículo aumente la velocidad, pero se requerirá un menor aporte de energía cuando el vehículo disminuya su velocidad.

## 2.3 FRENADO REGENERATIVO

El frenado regenerativo es aquel que se produce por medio de un dispositivo o conjunto de ellos, capaz de transformar la energía cinética que posee un vehículo en movimiento, en energía susceptible de ser manejada y almacenada.

El mecanismo de funcionamiento de los frenos tradicionales o reostáticos, es transformar la energía cinética del vehículo, en energía térmica, por medio de mecanismos de fricción. Esta energía térmica desprendida en el frenado es muy difícilmente aprovechable, en la práctica imposible y en cualquier caso ineficiente.

La potencia disipada por los frenos tradicionales, no es en absoluto despreciable, de hecho, detener un vehículo de 1200 kilogramos circulando a 120 kilómetros por hora, disipa una energía de 0,185 kWh.

Este concepto es conocido por su acrónimo en el idioma anglosajón como KERS (Kinetic Energy Recovery System), y los dos tipos más importantes son el mecánico, y el eléctrico.

El sistema que utiliza el frenado regenerativo mecánico, es básicamente un volante de inercia, que puede llegar a girar alrededor de 100,000 rpm, cuanto mas velocidad angular tenga, más energía cinética es capaz de almacenar

La idea fundamental del frenado regenerativo eléctrico, es utilizar el motor eléctrico como un generador. De esta manera, al hacer girar el motor se crean unas fuerzas inducidas que generan una corriente eléctrica que se almacena en baterías o capacitores generalmente.

En la práctica totalidad de los automóviles, la potencia de frenado necesaria se encuentra en un rango muy por encima de la potencia disponible para acelerar. No importa cuanto se ascienda en la búsqueda de modelos potentes. A mayor potencia "convencional" del vehículo, la potencia de frenado siempre será mucho mayor. Por lo tanto, si se utiliza el motor eléctrico del vehículo como generador, siempre va a existir una carencia en la potencia de frenado.

No obstante a lo anterior, el freno regenerativo no exime a los vehículos de la necesidad de portar frenos convencionales, puesto que el freno regenerativo no cumpliría los requisitos de seguridad que se le exigen a los frenos en todas las circunstancias. Cuando, por ejemplo, la batería se encontrara llena, no habría lugar en el que almacenar la energía absorbida del freno. Tampoco funciona bien el frenado regenerativo a bajas velocidades, puesto que las inducciones que se crean en el generador a velocidades reducidas no son suficientes para detener el vehículo.

Aunque no se pueda eliminar completamente el sistema de frenos convencionales de un vehículo, bien es verdad que el uso al que se verían sometidos éstos sería mucho menor si estuvieran apoyados por un sistema de freno regenerativo. El caballo de batalla de este sistema está en conseguir una recuperación de energía óptima sin comprometer en ningún momento la seguridad de los pasajeros, implementando para ello sistemas de control que estimen la potencia de frenado demandada por el conductor para poder adecuar la proporción en la que actúan los distintos sistemas de frenado.

### 3 CICLOS DE CONDUCCIÓN

El consumo específico de los vehículos obedece a múltiples y variados factores. Desde factores ambientales como temperatura o humedad; específicos del vehículo como aerodinámica, neumáticos; relacionados con la conducción como velocidad o aceleración o incluso relativos al conductor como estado de ánimo del conductor.

En general, a la hora de comparar, hay que hacerlo en igualdad de condiciones, y en el caso de comparar el consumo de dos vehículos, existe todo un abanico de factores que determinan el consumo último de éste. Por esta razón, y para poder homologar los consumos específicos de cada vehículo, se crean los llamados ciclos de conducción.

Los ciclos de conducción son creados por países y organizaciones para poder analizar el rendimiento de los vehículos en diferentes aspectos de funcionamiento, tales como el consumo y las emisiones. Un ciclo de conducción es una pauta de funcionamiento del vehículo por medio de la cual se relacionan una serie de valores de tiempo, frente a la velocidad del vehículo.

#### 3.1 PRINCIPALES CICLOS DE CONDUCCIÓN

A continuación se detallan los principales ciclos de conducción y sus principales características:

##### 3.1.1 NEW EUROPEAN DRIVING CYCLE (NECD)

El llamado ciclo Europa es el ciclo de homologación obligatorio que han de superar todos los automóviles para poder ser comercializados en la Unión Europea.

El *New European Driving Cycle (NEDC)*, es un ciclo de conducción compuesto de cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos (que representa una conducción urbana), y un ciclo de conducción extraurbano, representado por el ciclo *Extra-Urban Driving Cycle (EUDC)*.

Estas pruebas se realizan en laboratorios independientes, y de ellas se obtienen los consumos y emisiones de los vehículos. Son realizadas en condiciones controladas, en el interior de naves donde la temperatura se encuentra entre los 20 y los 24 grados centígrados y con el vehículo montado sobre rodillos. Antes de comenzar el test el vehículo debe haber estado por lo menos 6 horas y media sin funcionar. Esto se hace para simular que el coche ha estado toda la noche sin funcionar y se arranca por la mañana.

Las dos partes de las que consta este ciclo son:

##### Parte urbana:

El ciclo está formado básicamente de aceleraciones, frenadas, velocidades mantenidas y estados de reposo (ralentí). Todo ello pretende simular una conducción en ciudad compuesta de frecuentes arrancadas y paradas. La velocidad máxima que se alcanza es de 50 km/h y se recorren aproximadamente 4 kilómetros en cuatro ciclos de poco más de 3 minutos cada uno.

##### Parte extraurbana:

Esta parte del ciclo se realiza inmediatamente después del ciclo urbano y consta principalmente de periodos a velocidad mantenida (50 km/h, 70 km/h, 100 km/h y 120 km/h). La velocidad máxima son 120 km/h y se recorre una distancia de unos 7 km en apenas 6 minutos.

El resultado de la prueba se obtiene de una combinación ponderada de los resultados de los distintos ciclos.

### Ciclo de conducción NEDC

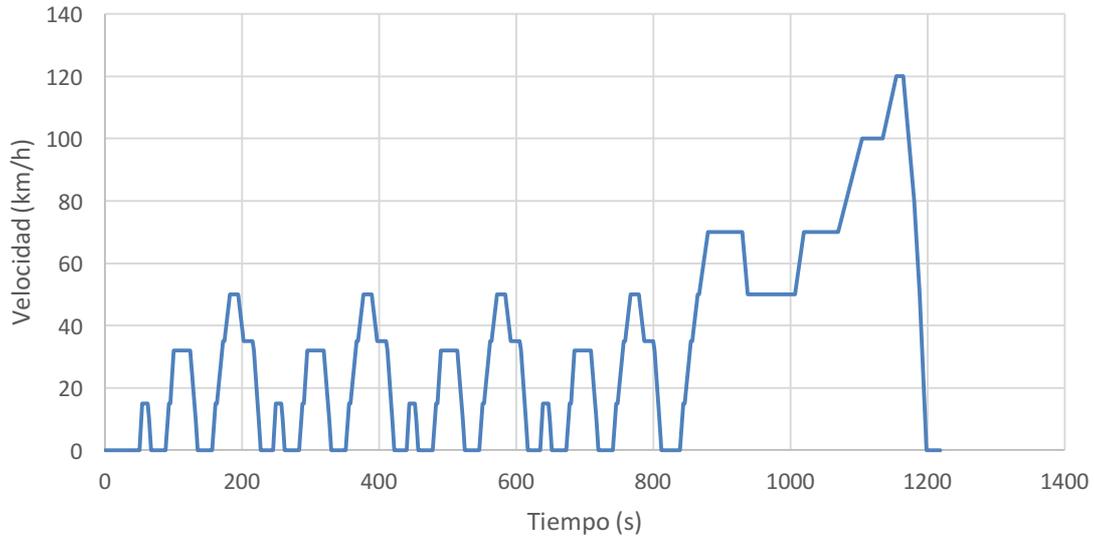


Figura 3.1: Gráfico tiempo-velocidad para el ciclo de conducción NEDC.

#### 3.1.2 JAPAN 10-15

Al igual que el ciclo Europa, el ciclo de conducción 10-15 japonés se compone de una primera parte de bajas velocidades y frecuentes paradas que simula un entorno urbano y una segunda parte con velocidades más altas y mantenidas por más tiempo en la que se simula una conducción extra-urbana.

Esta prueba también se ejecuta en un entorno cerrado, haciendo funcionar al vehículo sobre rodillos a fin de controlar distintos aspectos exteriores tales como temperatura, peso, etc.

##### Parte urbana (ciclo 10):

Consta de una serie de aceleraciones y frenadas, alternadas por periodos de velocidad constante mantenida a 20 km/h y 40 km/h. La velocidad máxima que se alcanza en este ciclo es de 40 km/h, y dura poco más de 2 minutos.

##### Parte extraurbana (ciclo 15):

En esta parte, los vehículos son sometidos a aceleraciones y frenadas menos frecuentes y a velocidades mantenidas situadas entre los 40 km/h y los 70 km/h. Se realiza en un tiempo de entorno a 4 minutos.

En este caso, antes de comenzar las mediciones, se somete al vehículo a un ciclo extra-urbano, donde no se extraen mediciones y que sirve para calentar el motor. Una vez realizado este ciclo, se deja el motor al ralentí y se procede a la toma de datos. El proceso de adquisición de datos comienza con la ejecución de un ciclo 10 (que se repite 3 veces), seguido de un ciclo 15. Los resultados se obtienen ponderando los datos obtenidos en el ciclo 15 y los tres ciclos 10.

### Ciclo de conducción JAPAN 10-15

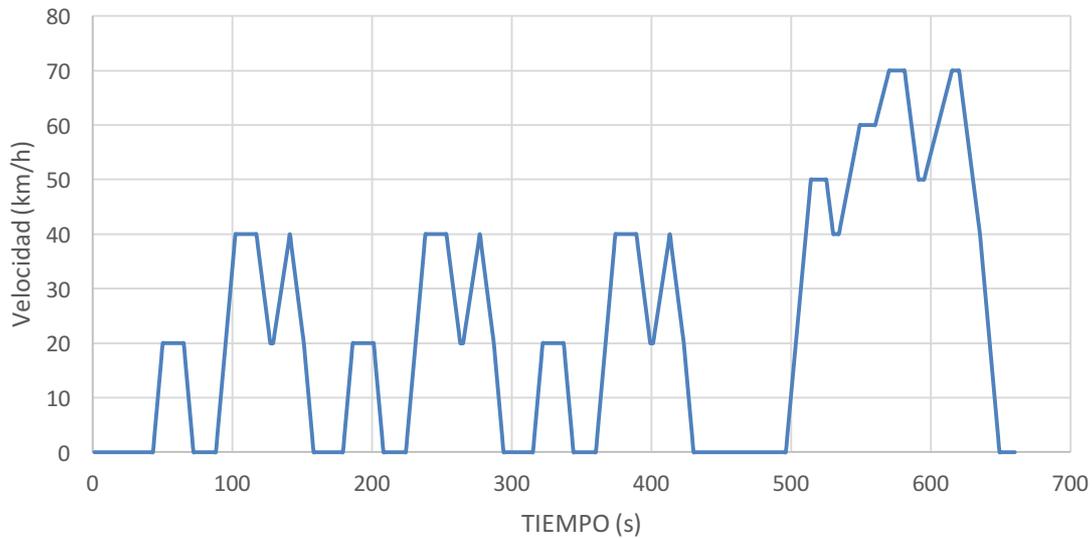


Figura 3.2: Gráfico tiempo-velocidad para el ciclo de conducción Japan 10-15.

#### 3.1.3 EPA FEDERAL TEST (FTP)

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés, EPA), es la encargada de la regulación de los procedimientos de homologación de consumos, y el FTP-75 es el ciclo de conducción utilizado en ese país en la actualidad.

Tiene similitudes con los ciclos europeo y japonés, en cuanto a que tiene dos sub-ciclos (urbano y extra-urbano), pero también tiene diferencias con los primeros en cuanto a la distribución de estos ciclos dentro del procedimiento. En este caso después del ciclo urbano y del extra-urbano, aparece una tercera fase. De nuevo un ciclo urbano, pero con la cualidad de que este ciclo urbano repetido, se realiza con el motor de automóvil ya en rangos óptimos de temperatura de funcionamiento. Esta repetición de la parte urbana beneficia la eficiencia, tanto en emisiones como en consumo, puesto que hace que mejoren estos resultados al evaluar una parte en rangos óptimos de funcionamiento del motor.

##### Parte urbana:

La parte urbana se divide en tres fases, arranque en frío, fase transitoria y arranque en caliente. Comprende una distancia en millas equivalente a 17,77 km, que se realizan en aproximadamente 31 minutos, con una velocidad máxima de 88 km/h.

##### Parte extraurbana:

En esta parte del ciclo de conducción se producen aceleraciones y frenadas junto con intervalos de tiempo de velocidades mantenidas por debajo de un máximo de 95 km/h, para simular una conducción en vías interurbanas y autopistas.

### Ciclo de conducción FTP-75

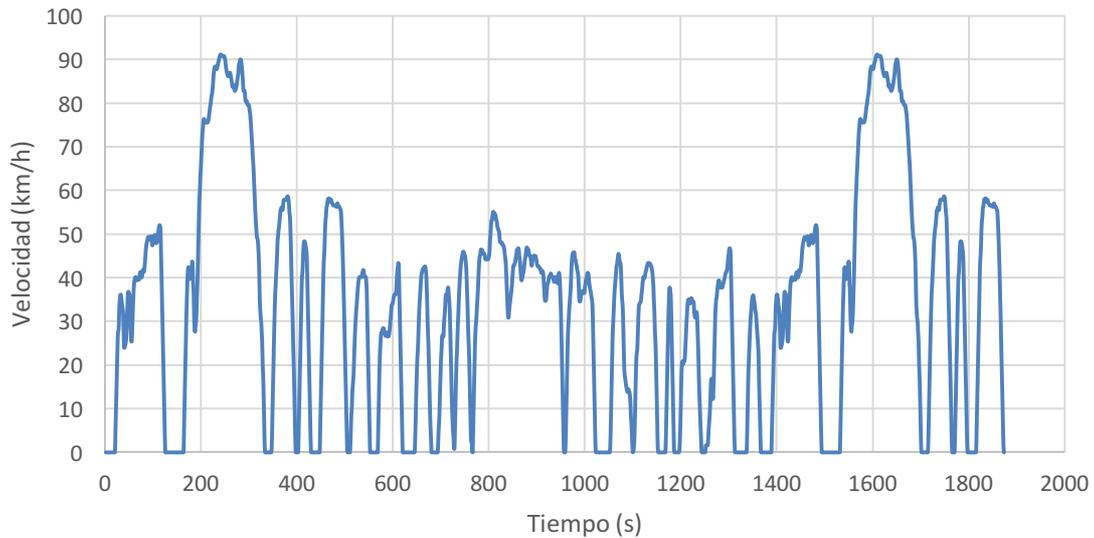


Figura 3.3: Gráfico tiempo-velocidad para el ciclo de conducción FTP-75.

#### 3.1.4 WLTP

Desde hace tiempo, el ciclo Europa lleva siendo objeto de muchas críticas, debido al carácter excesivamente teórico de su conducción. También se le critica por el alejamiento que existe entre los datos de consumo ofrecidos a través de este método y los resultados obtenidos en una conducción normal, en la mayoría de los casos mucho mayores. En verdad, este ciclo de conducción está muy lejos de los resultados obtenidos por un usuario en condiciones normales, haciendo que diste mucho de ser representativo.

Por todo esto, los estados miembro de la Unión Europea, más Japón, EE.UU., China, Rusia e India, sentaron las bases para el desarrollo de un nuevo procedimiento de homologación, mediante la firma del tratado de la UNECE, de 1998.

El nuevo procedimiento debía ser lo suficientemente representativo de los distintos modos de conducción en las diferentes partes del mundo. Como resultado de estas premisas, aparece el *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures – WLTP* (Procedimiento mundial de prueba de vehículos ligeros armonizado). Este procedimiento nace a partir de la base de datos de conducción procedente de todas partes del mundo y cubriendo todas las realidades posibles que se dan en el uso del automóvil.

El nuevo procedimiento, resulta más dinámico que el ciclo NEDC, al contar con muchos más ciclos de mayores aceleraciones y frenadas. Además el nuevo ciclo de conducción WLTP, está adaptado a las nuevas tecnologías, ofreciendo regulación para los vehículos eléctricos e híbridos.

Este ciclo de conducción no distingue entre urbano y extra-urbanos, sino que existen 4 clases de ciclos de conducción: *Low, Medium, High* y *Extra High*.

##### Parte Low:

Esta parte del ciclo tiene una duración de 589 segundos, en los que se recorren poco más de 3 kilómetros, con una velocidad máxima de 56,5 km/h y aceleraciones comprendidas entre -1,5 y 1,5 m/s<sup>2</sup>.

##### Parte Medium:

La duración de esta parte del ciclo es de 433 segundos, en los que se recorren 4,7 kilómetros, con una velocidad máxima de 76,6 km/h. Las aceleraciones están acotadas entre -1,5 y 1,6 m/s<sup>2</sup>.

#### Parte High:

Esta parte del ciclo dura 455 segundos. En este tiempo el vehículo recorre una distancia de poco más de 7 kilómetros, sin sobrepasar los 97,4 km/h de velocidad. Las aceleraciones que tienen lugar en esta parte del ciclo, están comprendidas entre los mismos límites que en el apartado anterior.

#### Parte Extra High:

Es la parte de menor duración del ciclo y en la que más distancia se recorre, al realizarse a una mayor velocidad media. En este caso el vehículo ha de recorrer 8,2 kilómetros en 323 segundos, a una velocidad máxima de 131,3. Siendo sometido a menores aceleraciones (entre -1,2 y 1 m/s<sup>2</sup>).

Dependiendo de la clase de vehículo, y más concretamente del ratio potencia-peso de éste, se configuran los cuatro tipos de conducción. Las clases de vehículos existentes son:

- Clase 1: Vehículos con una relación de potencia-peso menor de 22 kW/Tm. Realizan únicamente y en este orden, la parte *Low* y la parte *Medium*
- Clase 2: Vehículos con una relación de potencia-peso entre 22 kW/Tm y 34 kW/Tm. Realizan la parte *Low*, *Medium* y *High*
- Clase 3: Vehículos con una relación de potencia-peso mayor de 34 kW/Tm. Realizan las cuatro partes del ciclo de conducción.

Si la velocidad máxima del vehículo fuera en algún caso inferior a la velocidad máxima de alguna parte del ciclo de conducción, se sustituiría esa parte por la parte inmediatamente inferior. De esta manera si la velocidad máxima de un vehículo de clase 3 fuera menor de 131,3 km/h, la secuencia que tendría que realizar sería la siguiente: *Low*, *Medium*, *High*, *High*.

### Ciclo de conducción WLTP Clase 3

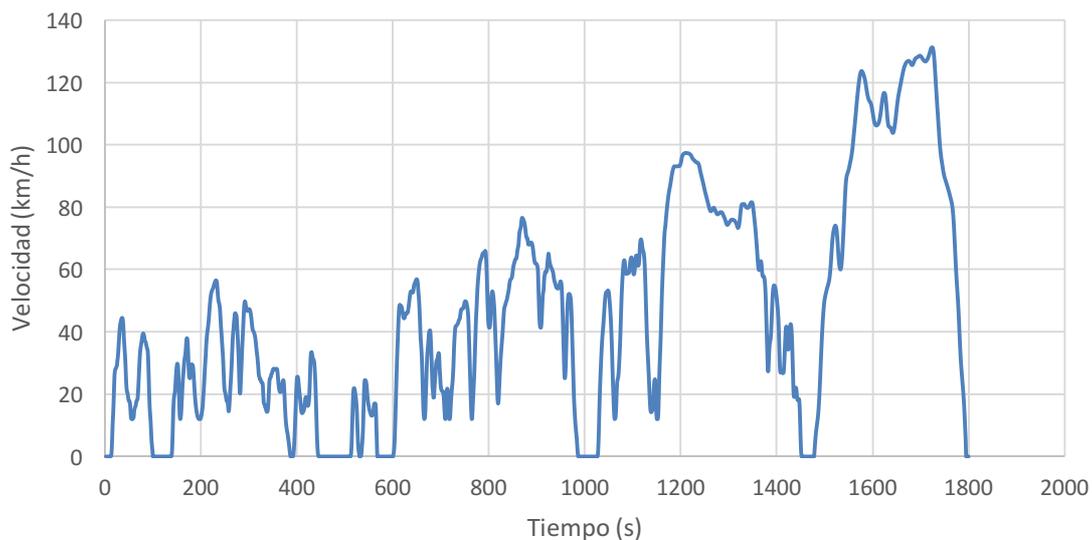


Figura 3.4: Gráfico tiempo-velocidad para el ciclo de conducción WLTP Clase 3.

## 4 ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO

Se entiende por almacenamiento energético todo aquel dispositivo que almacena energía, y que además es capaz de proporcionar energía a un sistema (descarga), y de aceptar energía de este sistema (carga). Dentro de este concepto tienen cabida distintas formas de almacenamiento en el entorno de la automoción y del vehículo eléctrico e híbrido. Tales formas de almacenamiento son las baterías, los condensadores, las pilas de combustible (que son esencialmente una forma de almacenar y convertir energía), y los sistemas de almacenamiento de energía mecánica, como son los llamados KERS o volantes de inercia.

El alcance de este trabajo abarca las baterías (en particular las de litio), y los condensadores (particularmente los llamados supercaps).

### 4.1 BATERÍAS

Las baterías son dispositivos, capaces de transformar mediante reacciones químicas, la energía eléctrica en potencial químico, susceptible de ser almacenado para, posteriormente, transformar ese potencial químico en energía eléctrica que se devuelve al circuito durante la descarga.

Las baterías están formadas por celdas, que es la unidad funcional independiente más pequeña de las baterías. Básicamente está formada por tres elementos que pueden ser muy diversos: ánodo, cátodo y electrolito. El electrolito puede ser húmedo, como en las baterías tradicionales compuestas por placas de plomo inmersas en una solución ácida. También puede ser seco, una especie de pasta, como en las baterías de litio. Menos común son los electrolitos de sales fundidas, como en las baterías basadas en sodio y que deben trabajar a muy altas temperaturas muy bien aisladas.

El funcionamiento de una celda electroquímica, consiste en una reacción química, en la cual, en uno de los electrodos se produce una reacción de oxidación en la que se ceden electrones, y en el otro una reacción de reducción, que absorbe electrones. A través del electrolito, se produce un intercambio de iones que equilibra la reacción.

La tensión de funcionamiento de una celda, depende de la química usada, y de los diferentes materiales utilizados para los electrodos. Cada combinación de materiales utilizada implica un potencial de celda diferente, de acuerdo con el par galvánico generado por esa combinación. La tensión entre electrodos, no es constante, sino que varía con respecto a su nivel de carga. Cuando se dice que una batería tiene una tensión determinada, se está hablando de su tensión nominal puesto que ésta varía dependiendo del estado de carga de la batería. Cuando la batería está cargada al 100%, es cuando proporciona los valores máximos de tensión, que se ven reducidos conforme la carga de la batería va reduciéndose. En el caso particular de las baterías de litio, el voltaje decrece proporcionalmente al estado de carga de una forma que tiende a la linealidad.

En cuanto a la capacidad de una batería, no es una característica fija e inamovible, sino que depende ligeramente en función de la intensidad de descarga, de tal manera que es posible extraer un poco más de energía de una batería a la cual se le somete a una descarga lenta que de una batería idéntica descargada rápidamente. Para tratar de clarificar este hecho, se tiende a definir la corriente nominal, que se trata de una cifra que expresa el la capacidad de la batería ante un determinado ritmo de descarga. Es la corriente que tiene que proporcionar la batería para descargarse en una hora.

Sobre la potencia de la batería, en principio no hay mayor dificultad para calcularla, puesto que se trata de multiplicar la tensión por la intensidad de la corriente. Profundizando un poco en la materia, se dan limitaciones como la velocidad de las reacciones químicas o el movimiento de los iones, que tienen lugar en el interior de las baterías. Conforme se va solicitando más corriente a la batería, ésta se va aproximando a un punto en el que la reacción química decae y no ocurre a la suficiente rapidez, además se producirá un calentamiento que puede finalmente conducir al desfallecimiento de la celda.

Un ejemplo que ilustra este concepto, es el de las baterías de plomo contra las de zinc-aire. Mientras las primeras poseen una gran potencia pese a su escasa capacidad, las segundas poseen una excelente capacidad, pero una potencia muy baja, debido a las condiciones antes mencionadas. A continuación se muestra un gráfico que ilustra las capacidades de energía y potencia específica de diferentes tipos de baterías.

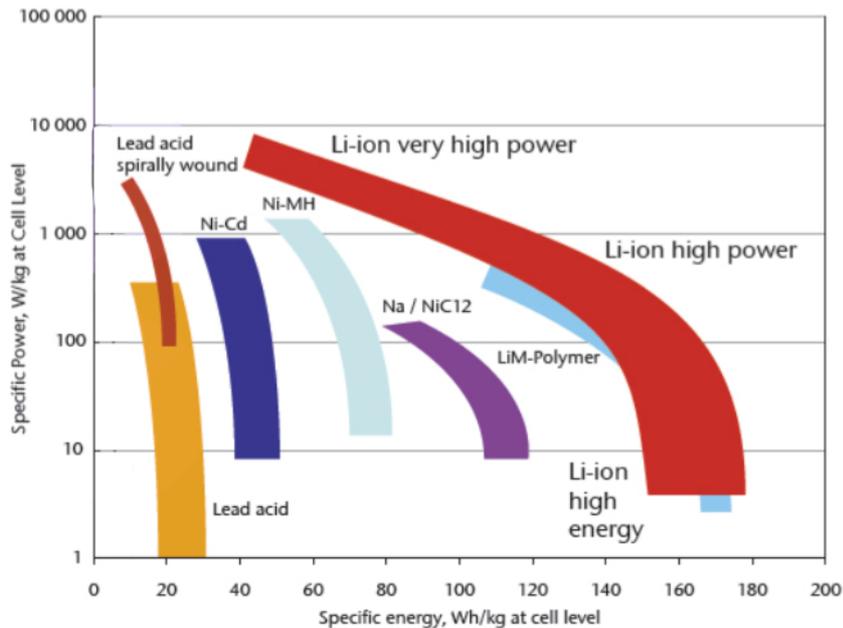


Figura 4.1: Distintos tipos de baterías en función de su energía y potencia específicas.

## 4.2 CAPACITORES

### 4.2.1 CAPACITORES

Un condensador es un elemento eléctrico pasivo diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica mediante un campo eléctrico. Este componente también es conocido con su anglicismo *capacitor*, que aún sin estar recogido en el diccionario de la RAE, cada vez es más común su uso y presencia en distintos textos académicos y técnicos.

Los capacitores son junto con las resistencias (o resistores), los elementos eléctricos más comunes y son empleados por ejemplo, en los circuitos sintonizadores de radiorreceptores y como elementos de memoria dinámica en sistemas de computación.

Un capacitor está compuesto por dos placas de un material conductor separadas por un material aislante (dieléctrico). Las láminas conductoras suelen ser de aluminio, mientras que el dieléctrico puede ser aire, cerámica, papel, mica o incluso el cuerpo humano (como es el caso de sensores táctiles capacitivos que se encuentran en muchos dispositivos de pantalla táctil).

Cuando se conecta un capacitor a una fuente de tensión, empieza a depositarse una carga positiva  $q$  en una placa, y la misma carga pero de signo contrario  $-q$  en la otra. El capacitor está almacenando una carga eléctrica, representada por  $q$ , que es directamente proporcional a la tensión que se le aplica  $v$ . La carga eléctrica almacenada por el capacitor, queda definida por:

$$q = C \cdot v \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde  $C$  representa la constante de proporcionalidad conocida como capacitancia del capacitor. La capacitancia es medida en faradios (F) en honor al físico inglés Michael Faraday (1791-1897), y se puede definir como la proporción entre la carga en una placa de un capacitor y la diferencia de tensión entre las dos placas. Los capacitores se fabrican normalmente con un un rango que oscila entre el picofarad ( $\rho\text{F}$ ) y el microfarad ( $\mu\text{F}$ ).

La capacitancia, únicamente depende de las dimensiones físicas del capacitor, por ejemplo, en un capacitor estándar de placas paralelas, la capacitancia está definida por:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde  $A$  representa el área superficial de cada placa,  $d$  la distancia entre las placas, y  $\epsilon$  la permitividad del dieléctrico entre las placas. En general, y para todos los capacitores, son tres los factores que determinan la capacitancia:

- El área superficial de las placas: a mayor área, mayor capacitancia.
- El espacio entre las placas: a menor espacio, mayor capacitancia.
- La permitividad del dieléctrico: a mayor permitividad, mayor capacitancia.

Se puede obtener la relación entre la corriente y la tensión del capacitor, tomando la derivada de ambos miembros de la ecuación 4.1 y obteniendo:

$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Dado que

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Se obtiene:

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec. 4.5}$$

La ecuación 4.5 muestra la relación entre corriente y tensión de un capacitor suponiendo un criterio de signos pasivo (en el cual si  $v > 0$  e  $i > 0$  o  $v < 0$  e  $i < 0$ , el capacitor se está cargando y si  $v \cdot i < 0$ , se está descargando).

Los capacitores que se rigen por la ecuación 4.5 son llamados lineales (dado que la capacitancia es independiente de la tensión). Aunque existen capacitores no lineales en los cuales la gráfica de su relación corriente-tensión no es una línea recta, en este trabajo se supondrá que los capacitores son lineales.

Integrando a ambos lados de la ecuación 4.5 se obtiene:

$$v = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt \quad \text{Ec. 4.6}$$

Lo que es igual a:

$$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt + v(t_0) \quad \text{Ec. 4.7}$$

De la ecuación 4.7 se puede deducir que la tensión del capacitor depende de lo acontecido en el pasado (en el intervalo de tiempo que va desde  $t=0$  hasta el instante actual  $t$ ). Por esta razón se dice que el capacitor tiene memoria, propiedad que se explota con frecuencia.

Partiendo de la expresión:

$$p = v \cdot i \quad \text{Ec. 4.8}$$

Y de la ecuación 4.5, se obtiene la potencia instantánea suministrada al capacitor, que es de la forma:

$$p = C \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec. 4.9}$$

Y la energía almacenada en el capacitor en el instante  $t$  es:

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = C \int_{-\infty}^t v \frac{dv}{dt} dt = C \int_{-\infty}^t v dv = \frac{1}{2} C v^2 \Big|_{t=-\infty}^t \quad \text{Ec. 4.10}$$

Como  $v(-\infty)=0$ , dado que el capacitor estaba completamente descargado en  $t=-\infty$ :

$$w = \frac{1}{2} C v^2 \quad \text{Ec. 4.11}$$

Despejando  $v$  de la ecuación 4.1 y sustituyendo en 4.11 obtenemos:

$$w = \frac{q^2}{2C} \quad \text{Ec. 4.12}$$

La energía almacenada en un capacitor ideal no se disipa con el tiempo. El capacitor absorbe potencia del circuito que almacena en forma de energía, y devuelve la misma energía al circuito cuando éste suministra potencia al circuito. En el caso de un capacitor real, siempre existe una corriente de fuga, que hace que el capacitor se descargue con el tiempo. Esta corriente de fuga, se modela como una resistencia de fuga dispuesta en paralelo con el condensador. La resistencia de fuga, que puede llegar a ser de 100 MΩ, se desprecia en este trabajo de igual manera que se hace en la mayoría de aplicaciones prácticas.

## 4.2.2 CAPACITORES EN PARALELO

Para calcular el capacitor equivalente de  $N$  capacitores colocados en paralelo, donde todos los capacitores están sometidos a una misma tensión  $v$ , se procede aplicando las Leyes de Kirchhoff:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_N \quad \text{Ec. 4.13}$$

Si se sustituye la ecuación 4.5 en cada término de la suma anterior:

$$i = C_1 \frac{dv}{dt} + C_2 \frac{dv}{dt} + C_3 \frac{dv}{dt} + \dots + C_N \frac{dv}{dt} = \left( \sum_{k=1}^N C_k \right) \frac{dv}{dt} = C_{eq} \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Donde:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N \quad \text{Ec. 4.15}$$

## 4.2.3 CAPACITORES EN SERIE

Para calcular el capacitor equivalente de  $N$  capacitores colocados en serie se procede de forma similar. Dada la nueva disposición, ahora circula la misma corriente  $i$  por todos los capacitores. Aplicando de la misma manera que en el apartado anterior las leyes de Kirchhoff para el lazo dado:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_N \quad \text{Ec. 4.16}$$

Sustituyendo la ecuación 4.7 en cada sumando de la expresión anterior, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_1(t_0) + \frac{1}{C_2} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_2(t_0) + \frac{1}{C_3} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_3(t_0) \\
 &+ \dots + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_N(t_0) = \\
 &= \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N} \right) \int_{t_0}^t i(t) dt + v_1(t_0) + v_2(t_0) \\
 &+ v_3(t_0) + \dots + v_N(t_0) = \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i(t) dt + v(t_0)
 \end{aligned}$$

Ec. 4.17

Donde:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

Ec. 4.18

#### 4.2.4 SUPERCAPACITORES

Si siguiendo los mismos principios teóricos explicados anteriormente, pero suponiendo un salto cualitativo con respecto a los capacitores habituales se encuentran los denominados súper-capacitores, o comúnmente llamados, *supercaps*. Lo que confiere a estos elementos sus características especiales es el llamado principio de capacitor de doble capa, consistente en unas placas inmersas en una fina solución de ácido sulfúrico (electrolito). Cuando la diferencia de potencial entre las varillas se sitúa en torno a un voltio (en torno a la tensión de descomposición del agua), se crea en las inmediaciones de las varillas una doble capa eléctrica, mediante la cual el electrolito, permite la movilidad de iones. El almacenamiento de la carga eléctrica en este tipo de capacitores, se produce mediante la concentración de iones del electrolito, junto a los electrones de la superficie interna de las placas. La principal ventaja de esta doble capa es que actúa como un aislante por debajo de la tensión de descomposición.

Por lo expuesto anteriormente, la tensión admisible por este tipo de capacitores se sitúa en torno a 0,9 voltios por celda, mientras que los capacitores estándar pueden oscilar entre los 2,3 y los 3,3 voltios por celda.

La sustitución del dieléctrico tradicional de plástico o de óxido de aluminio por una doble capa eléctrica, supone una gran ventaja a favor de los supercaps con respecto a los capacitores tradicionales. Pese a esta ventaja, además, los electrodos de los supercaps, están compuestos por materiales especiales como los carbonos activados, que poseen una gran superficie en relación a su peso. Este tipo de materiales pueden poseer superficies de entre uno y tres metros cuadrados por gramo, permitiendo de una forma relativamente fácil, conseguir 25 Faradios por gramo en la construcción de supercaps.

En cualquier caso, la energía específica de los supercaps (en torno a 2 Wh/kg), es muy baja aún, en relación a otros tipos de almacenaje energético, como por ejemplo las baterías de ácido, cuya capacidad energética se sitúa en unos niveles 20 veces mayor (unos 40 Wh/kg).

#### 4.3 HIBRIDACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Lo ideal es que en un sistema de almacenamiento energético estuvieran presentes todas las características buscadas, alta capacidad de almacenamiento, mucha potencia, muy eficiente, y además, con unos costes reducidos. La realidad es que cada sistema de almacenamiento, tiene sus propias características y como en gran cantidad de situaciones, es necesario llegar a una solución de compromiso.

En un automóvil eléctrico, la principal consideración es la capacidad energética específica, pues de ella depende la autonomía del vehículo. También es importante la potencia específica del sistema de almacenamiento, pues de ella dependerán las características del vehículo en cuanto a aceleración, y la capacidad de ascenso de pendientes. También de la potencia específica depende (y esto es de gran importancia) el rendimiento del sistema de frenado regenerativo del vehículo.

Las requerimientos principales de un acumulador son una gran densidad de energía (capacidad de almacenar mucha energía en poco tamaño o peso) y una gran densidad de potencia (capacidad de generar o absorber gran cantidad de energía eléctrica en poco tiempo y poco peso). La densidad energética, pues de ella depende la autonomía del vehículo, mientras que la densidad de potencia establece la aceleración del vehículo, la velocidad máxima, la capacidad de ascender pendientes, y la capacidad de recuperación de energía de frenado de éste.

La situación ideal es que en un sistema de almacenamiento energético estuvieran presentes todas las características buscadas, alta capacidad de almacenamiento, mucha potencia, muy eficiente, y además, con unos costes reducidos. La realidad es que cada sistema de almacenamiento, tiene sus propias características. *Grosso modo*, las baterías poseen mucha capacidad de almacenamiento de energía y poca potencia y los supercapacitores tienen poca capacidad de almacenamiento de energía y mucha potencia.

Para poder disponer de una alta capacidad de almacenamiento energético y una gran cantidad de potencia, se recurre a la hibridación de sistemas de almacenamiento energético. Esta hibridación permite utilizar los dos tipos de almacenamiento anteriormente explicados y, mediante una correcta gestión de éstos, contar simultáneamente con las ventajas de ambos sistemas de almacenamiento energético.

La premisa básica utilizada en la hibridación de sistemas energéticos, es la capacidad de manejar la energía de forma que sea aprovechada de la forma más eficiente posible. Para ello se ha de permitir que la energía fluya entre el motor y el sistema de almacenamiento, y además entre los distintos tipos de almacenamiento. Con esto se consigue tanto que se pueda ir cargando poco a poco el banco de capacitores para vaciarlo rápidamente cuando sea necesario, como cargar rápidamente el banco de condensadores para captar la mayor energía posible cuando se produzca (generalmente en el frenado) y luego poder ir llenando poco a poco el banco de baterías. Para conseguir llevar energía de un sistema de almacenamiento a otro, es necesario recurrir a sistemas de conversión de energía.

#### **4.4 CONVERTIDORES DC-DC**

En determinados sistemas de potencia de corriente continua, existe la necesidad de transformar potencia desde un nivel de voltaje a otro, bien sea más alto o más bajo. En sistemas de potencia de corriente alterna, la modificación del voltaje es relativamente fácil de conseguir mediante el uso de transformadores, pero en los sistemas de corriente continua se ha de usar otro método diferente.

Los convertidores DC-DC, son circuitos electrónicos que además de realizar la conversión de una tensión continua en otro nivel de tensión, normalmente proporcionan una salida de tensión regulada. Estos circuitos se clasifican en convertidores lineales y conmutados.

Los convertidores lineales se basan en el uso de un transistor a modo de resistencia variable de tal manera que, regulando la corriente base del transistor, se puede controlar la tensión de salida compensando las variaciones de la tensión de alimentación o las variaciones de carga. Operando de esta manera en la región lineal del transistor, en vez de en la zona de corte, se consigue regular la salida de tensión.

Aunque el uso de convertidores lineales es una forma sencilla de reducir la tensión de un circuito de potencia, la ineficiencia de este método supone una desventaja importante para su aplicación en el

campo de la electrónica de potencia. En este tipo de convertidores, toda la potencia que no es utilizada como potencia de salida, es disipada por el transistor, de forma que por ejemplo, si la tensión se reduce en un 25%, se pierde el 75% de la potencia.

Otro tipo de convertidores de tensión son los convertidores conmutados. En este caso, se hace trabajar al semiconductor (generalmente transistor) en la zona de saturación o de corte. En esta zona de trabajo, el transistor hace la función de un interruptor electrónico, al estar completamente abierto, o completamente cerrado. La frecuencia de conmutación a la que trabajan estos semiconductores es mucho mayor que la de la variación de las formas de onda de entrada y salida del conversor, permitiendo utilizar filtros pasa-bajos, que eliminan los armónicos no deseados.

#### 4.4.1 INTERRUPTORES DE SEMICONDUCTOR

##### Tiristor

El tiristor es un interruptor electrónico, similar a un diodo, pero en el que puede ser controlado el instante de conducción. El tiristor posee ánodo y cátodo, además de un tercer terminal, llamado compuerta y que es la clave para el control de la conducción. Si la compuerta está conectada al cátodo, el tiristor no conduce la corriente eléctrica, para cambiar de estado se ha de cumplir dos condiciones: el ánodo ha de ser positivo y la corriente debe fluir hacia la compuerta durante un periodo de tiempo de microsegundos.

El tiristor no puede cortar la corriente, sólo se puede actuar sobre la corriente eligiendo el momento de inicio de la conducción, pero para que la conducción se detenga, la corriente en el ánodo ha de ser igual a cero, momento en el que la compuerta vuelve a tomar el control.

##### GTOs

Los llamados GTOs son muy similares a los tiristores ordinarios, con la importante característica de que pueden desactivar la compuerta. Esto significa que no solo se puede elegir cuando iniciar la conducción, sino que también se puede detener esta en un instante deseado.

Al igual que en los tiristores, para iniciar la conducción en un interruptor tipo GTO, es necesario inyectar un pulso de corriente positiva en la compuerta. Para mantener el estado de conducción, es necesario que la corriente en el ánodo permanezca por encima de la corriente de retención del GTO. No obstante a lo anterior, en un interruptor GTO, se puede interrumpir la conducción inyectando una intensa corriente negativa en la base.

Estos interruptores son dispositivos de gran potencia, capaces de aguantar en algunos casos corrientes de varios miles de amperios a voltajes de hasta 4000 V.

##### BJTs

Este interruptor eléctrico, es un transistor de unión bipolar (*bipolar junction transistor – BJT*, por sus siglas en inglés) consistente en dos uniones PN. Los tipos P y N son distintas configuraciones atómicas que se les da a los semiconductores en cuanto a su dopaje).

En este interruptor electrónico, la conducción tiene lugar debido al desplazamiento de portadores de dos polaridades (electrones y huecos dentro del dispositivo). El transistor tiene tres terminales llamados colector, emisor y base.

El BJT actúa como interruptor, dejando pasar la corriente, cuando la corriente en la base es lo suficientemente grande como para saturar el dispositivo. La conducción desaparece cuando cesa la corriente en la base.

Los transistores de potencia pueden conducir corrientes de varios cientos de amperios con voltajes que se sitúan en torno a los 1000 voltios.

### MOSFET

El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* – *MOSFET*, por sus siglas en inglés), es un transistor empleado para conmutar o amplificar señales electrónicas. Actualmente, es el más utilizado en la industria microelectrónica en detrimento del BJT, y la práctica totalidad de los procesadores comerciales están basados en este tipo de transistor.

Posee tres terminales controlados por voltaje, llamados drenaje, fuente y compuerta. La corriente de drenaje se inicia cuando entre la compuerta a la fuente se establece una diferencia de potencial de aproximadamente 12 V. La corriente se mantiene hasta que el voltaje entre la compuerta y la fuente baja del límite umbral (en torno a 1V), momento en el cual se produce la interrupción.

La ventaja de este interruptor, es que las corrientes de activación son muy pequeñas, permitiendo de esta manera que el dispositivo se active con muy poca potencia.

Los MOSFET de potencia, pueden conducir corrientes de una centena de amperios, y soportar voltajes que rondan los 500 voltios.

### IGBT

Los *IGBT* - *Insulated Gate Bipolar Transistor*, son transistores bipolares de puerta aislada, que se utilizan como interruptores controlados por voltaje, en aplicaciones de electrónica de potencia. Sus terminaciones son iguales que las de cualquier transistor: colector, emisor y base.

Este tipo de transistores posee la capacidad de manejar una alta corriente, con un bajo voltaje de saturación.

La diferencia principal entre el MOSFET y el IGBT, es que la corriente de colector en el segundo es mucho más alta, por lo que el IGBT puede manejar más potencia que el MOSFET.

Una importante característica de los IGBTs, son sus rápidos tiempos de activación y desactivación, hecho que permite que sean utilizados a frecuencias mucho más altas. Esto permite que los transformadores, inductores y/o capacitores asociados puedan ser mucho más pequeños y baratos. Además, la conmutación a altas velocidades, es que se pueden generar voltajes y corrientes de baja frecuencia cuyas formas de onda se pueden diseñar para cubrir un gran abanico de requerimientos.

## 5 HESS

### 5.1 DEFINICIÓN HESS

Como se ha analizado en el 4.3, lo ideal es que en el sistema de almacenamiento eléctrico estén presentes todas las características deseables, tales como gran capacidad de almacenamiento, y una gran potencia. A día de hoy es inviable la presencia simultánea de estas dos características en un sistema de almacenamiento energético, aunque las baterías tienen una gran densidad energética, si se dimensiona el sistema de almacenamiento en base a la potencia necesaria y la potencia específica de las baterías, el resultado sería una capacidad energética mucho más grande de lo necesario, redundando en unos costes claramente excesivos. Esta inviabilidad económica, supone un obstáculo para el desarrollo de sistemas de almacenamiento capaces de satisfacer los requerimientos de diseño de vehículos eléctricos.

Un sistema de almacenamiento híbrido (*Hybrid Energy Storage System – HESS*, por sus siglas en inglés), consigue salvar la inviabilidad económica, al permitir dimensionar por separado la capacidad de almacenamiento energético y la potencia. Este sistema consiste en la combinación de dos métodos diferentes de almacenamiento energético. Por un lado, aparecen las baterías, capaces de almacenar gran cantidad de energía, pero con una potencia insuficiente tanto para acelerar el vehículo, como para absorber la energía susceptible de ser aprovechada en el escaso tiempo que dura el momento del frenado. Por otro lado, se utilizan supercaps. Estos capacitores de gran capacidad, son capaces tanto de suplir como de absorber una gran cantidad de energía en un tiempo muy pequeño (gran potencia), pero su capacidad de almacenamiento es muy reducida en comparación con las baterías. La inclusión de cada una de las formas de almacenamiento energético, suple las carencias de la parte contraria, de esta forma se obtiene una gran capacidad de almacenamiento energético, con una potencia acorde a las demandas de la conducción.

## 5.2 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN HESS

Es posible configurar un sistema de almacenamiento energético de diversas formas, a continuación se proponen algunas de ellas:

### 5.2.1 CONFIGURACIONES EXISTENTES

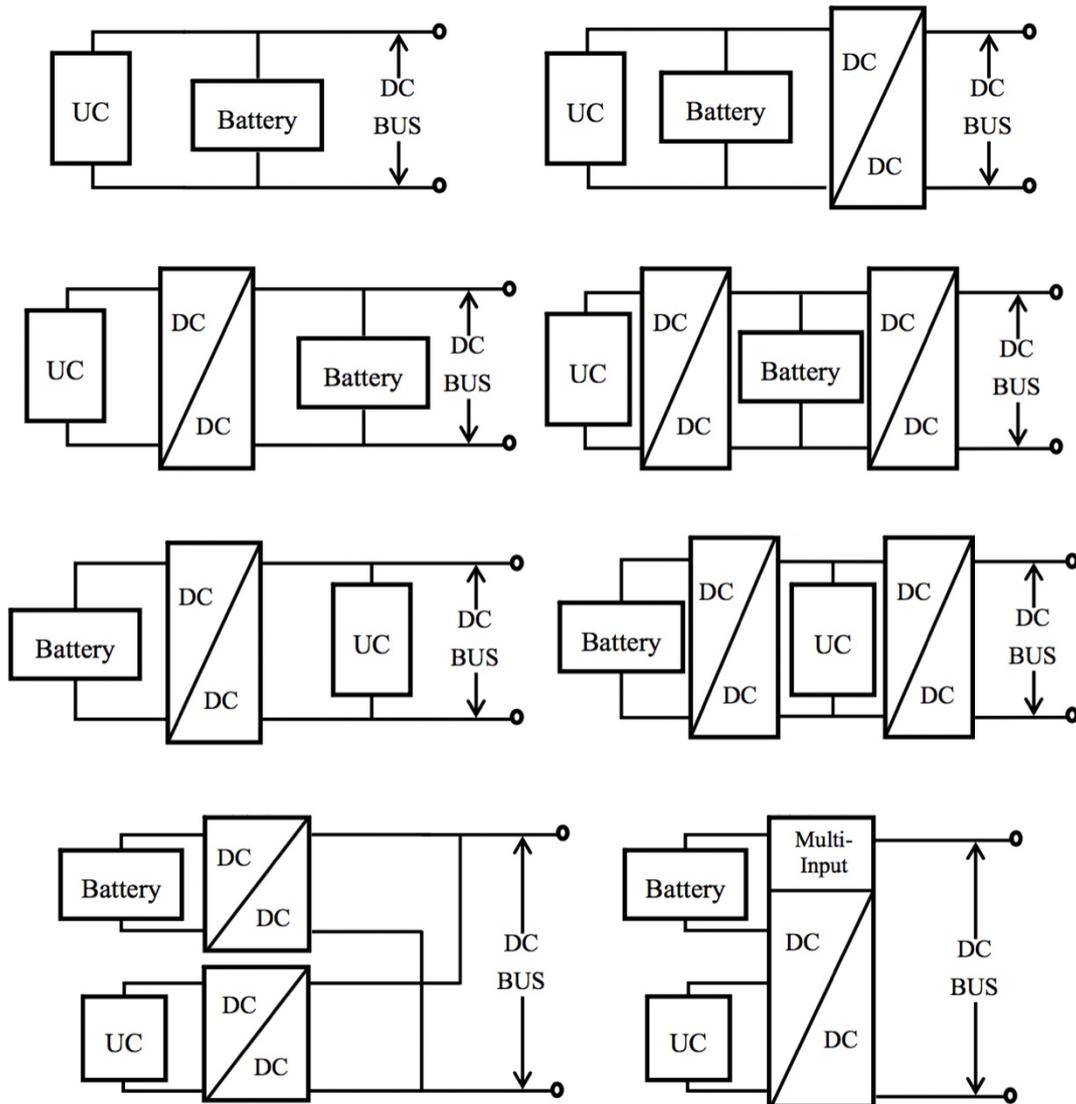


Figura 5.1: Diferentes tipos de configuraciones para un sistema de almacenamiento híbrido.

En la configuración más sencilla (a) se muestran los dos componentes principales del HESS (Unidad de capacitores y la batería). En esta configuración ambos sistemas de almacenamiento están conectados en paralelo y directamente al bus de potencia. En la configuración (b), se observa la misma configuración en la que la batería y la unidad de capacitores están conectados en paralelo, pero en esta ocasión se le intercala un convertidor de potencia entre ellos y el bus de potencia. Tanto en la configuración (a) como en la (b), es imposible controlar la forma en la que la potencia se distribuye en el HESS, por esta razón son llamados sistemas pasivos.

Para poder controlar la distribución de potencia en el HESS, se dan otras configuraciones como las de los llamados sistemas de almacenamiento activos (configuraciones c – h). Al intercalar un convertidor

de potencia entre la unidad de capacitores y la batería, se puede transferir cierta potencia entre batería y unidad de capacitores, tanta como la potencia del convertidor.

En las configuraciones (c) y (d), el voltaje de la unidad de capacitores no ha de ser igual al de la batería y el bus de potencia, por lo que la unidad de capacitores puede trabajar de forma más eficiente, al no tener que cumplir el rango de voltajes impuesto por la batería.

Las configuraciones (e) y (f), son exactamente las mismas que (c) y (d), pero permutando la unidad de capacitores y la batería. En la configuración (e), la unidad de capacitores puede ser usada más eficientemente, pero el voltaje del bus de potencia, variará en un rango muy amplio (el rango de trabajo de la unidad de capacitores).

Comparando las configuraciones (a, b), (c, d) y (e, f), se puede apreciar que las segundas son iguales que las primeras, pero intercalando un conversor de potencia entre el bus de potencia y el sistema de almacenamiento propiamente dicho. Esto proporciona una estabilidad del voltaje del bus de potencia, y protege los elementos de almacenamiento de la exposición directa a las tensiones del bus, en cambio, esto produce menor eficiencia, puesto que toda la energía eléctrica es obligada a atravesar el convertidor de potencia. Además, al incrementar los dispositivos electrónicos, se produce un incremento del peso, el volumen, el precio, lo que no lo hace precisamente ventajoso.

En la configuración (g), tanto la batería como la unidad de capacitores están directamente conectadas al bus de potencia a través de su respectivo convertidor de potencia, teniendo que utilizar también en este caso dos convertidores, con las desventajas indicadas en el párrafo anterior. En la configuración (h) se utiliza un convertidor de potencia multi-entrada de reciente desarrollo, mediante el cual se puede controlar la distribución de potencia, entre la unidad de capacitores y las baterías, además de estabilizar el voltaje. La desventaja es que las estrategias de control de este tipo de configuración se hacen mucho más complejas y en consecuencia, el coste de implementar dicha configuración también aumenta de forma notable.

En la actualidad, el tipo de configuración más usado es la configuración (c), pero presenta el inconveniente de que es necesario un convertidor de potencia muy grande para los momentos en los que la unidad de capacitores supe o absorbe energía eléctrica.

## 5.2.2 CONFIGURACIÓN ESTUDIADA

El tipo de configuración propuesta para este estudio, es una variación de la configuración (c), en la que se pretenden resolver los inconvenientes inherentes presentados anteriormente.

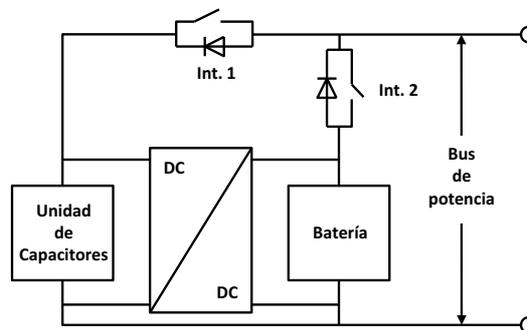


Figura 5.2: Configuración del sistema de almacenamiento estudiado.

En este tipo de configuración tanto la unidad de capacitores como la batería se presentan conectadas al bus de potencia mediante interruptores con un diodo en paralelo. Los interruptores servirán para hacer la gestión del sistema de almacenamiento, y pueden ser tipo MOSFETs, IGBTs, o cualquier otro tipo de interruptor electrónico que cumpla con las solicitaciones del sistema. En cuanto a los diodos, son utilizados para evitar que la corriente eléctrica vaya de la unidad de capacitores hacia la batería.

Por la configuración del sistema de almacenamiento, que se desarrollará más adelante, el voltaje de la unidad de capacitores siempre será igual o mayor que el voltaje de la batería.

El sistema de almacenamiento propuesto trabajará en tres niveles de potencia: Bajo, Medio y Alto. Estos niveles dependen de las características de los sistemas de almacenamiento y son gestionados mediante los interruptores del circuito. El rango bajo de potencia es aquel en el que la potencia demandada o recogida es inferior a la potencia máxima de la batería. El rango medio es aquel en el cual la potencia en el bus de potencia está por encima de la potencia máxima de la batería y por debajo de la suma de la potencia máxima de la batería más la potencia máxima del convertidor de potencia. Por último, el nivel alto de potencia, se da cuando ésta es mayor que la suma de la potencia máxima de la batería más la del convertidor de potencia. Aunque cada modo está pensado para trabajar en el nivel de potencia eléctrica específico, cada modo puede trabajar en todos los niveles de potencia inferiores a su rango de trabajo. A continuación se detalla cada modo de funcionamiento según la posición de los interruptores que gestionan el sistema de almacenamiento.

Modo	Int. 1	Int. 2	Nivel
I	1	0	Alto
II	0	1	Medio
III	1	1	Bajo
IV	0	0	Reposo

Tabla 5-1: Modos de funcionamiento del HESS

Cada uno de los modos I, II y III, trabaja de la misma manera en los dos sentidos diferentes, es decir, el esquema es el mismo tanto cuando el sistema suporta energía al bus de potencia, como cuando es el sistema el que absorbe la energía procedente del frenado regenerativo, desde el bus. El modo IV, es un modo de funcionamiento especial, en el que el HESS no está conectado al bus de potencia.

En la representación de cada uno de los modos y los sub-modos, se ha representado con flecha roja el camino de la corriente cuando el HESS suporta potencia al bus y con flecha verde el camino recorrido por la corriente cuando el HESS absorbe potencia desde el bus.

### Modo I

En este modo de funcionamiento, el interruptor 1 se encuentra cerrado y el interruptor 2 se encuentra abierto. Con esta disposición, toda la energía eléctrica pasa del bus de potencia a la unidad de capacitores o viceversa. Puesto que los capacitores es el sistema de almacenamiento de mayor potencia, este es el modo de mayor potencia del sistema de almacenamiento híbrido. Dentro de este modo, se pueden distinguir dos diferentes "sub-modos".

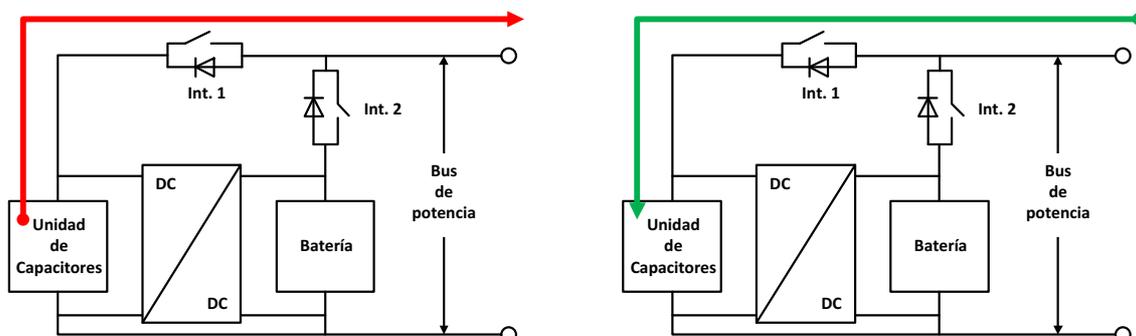


Figura 5.3: HESS en Modo 1A. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

En el modo 1A y cuando el HESS absorbe energía, todo el flujo eléctrico llega a la unidad de condensadores.

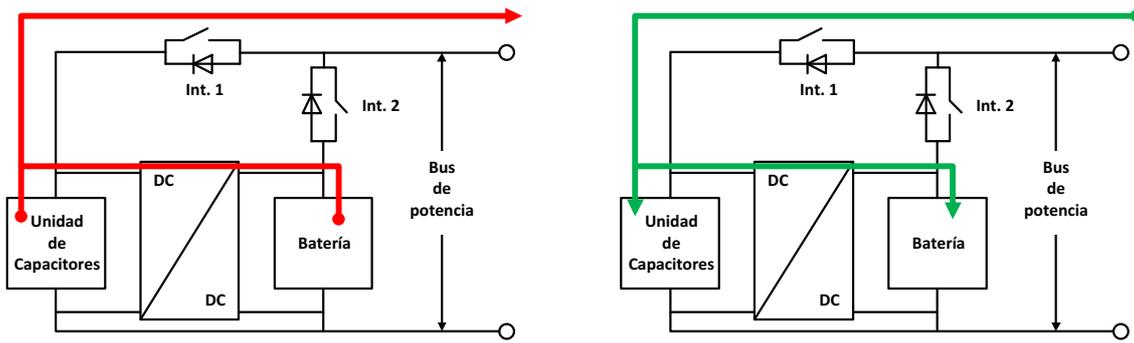


Figura 5.4: HESS en Modo 1B. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

En el modo 1B, parte del flujo eléctrico, se desvía hacia la batería, atravesando el convertidor de potencia. Estos mismos recorridos pero en sentido contrario son los que sigue la corriente eléctrica cuando se demanda potencia en el bus. En este modo se puede decir que la unidad de capacitores es el almacenamiento principal, mientras que la batería ejerce un papel de respaldo como almacenamiento secundario.

## Modo II

El modo II es el modo de funcionamiento medio. Para que el sistema trabaje en este modo, el interruptor 1 ha de estar cerrado, y el interruptor 2 encontrarse abierto.

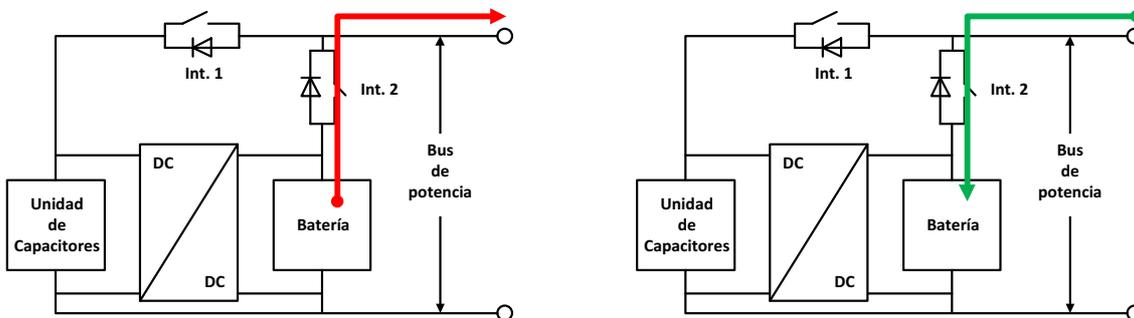


Figura 5.5: HESS en Modo 2A. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

Con esta configuración, toda la corriente eléctrica se dirige hacia la batería, puesto que el camino directo hacia la unidad de capacitores se encuentra interrumpido. De esta manera es la batería la que absorbe o supe de energía al bus de potencia.

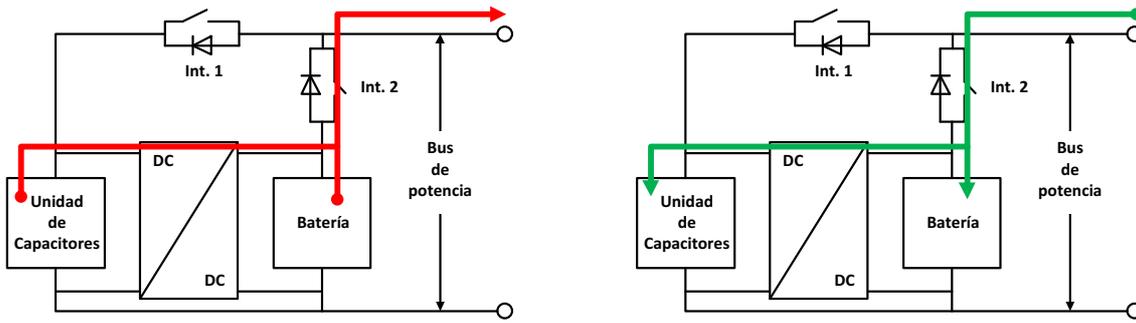


Figura 5.6: HESS en Modo 2B. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

Quando la potencia del bus es mayor que la de la batería, entra en funcionamiento el convertidor DC-DC, que ayuda a la batería en la tarea de dar o absorber energía. En este caso, la batería está actuando como almacenamiento principal, mientras que la unidad de capacitores, en su papel de almacenamiento secundario, suplente las carencias de la batería.

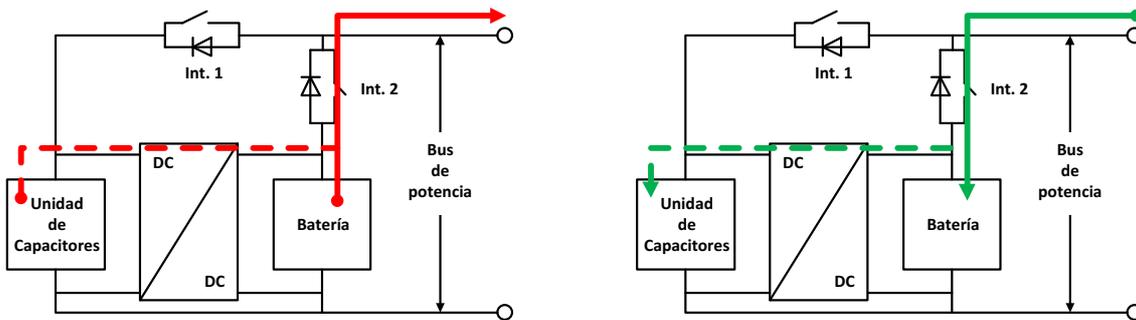


Figura 5.7: HESS en Modo 2C. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

Quando el valor de la potencia del bus se encuentra entre el valor de la potencia máxima de la batería y el valor de la potencia máxima de la batería más la del convertidor de potencia el HESS entra en el estado 2C. Este estado es una situación particular de la configuración 2B, puesto que es exactamente igual que ésta salvo por el hecho de que el convertidor de potencia no está trabajando a su máxima potencia, sino a la potencia que no es capaz de absorber o suplir la batería.

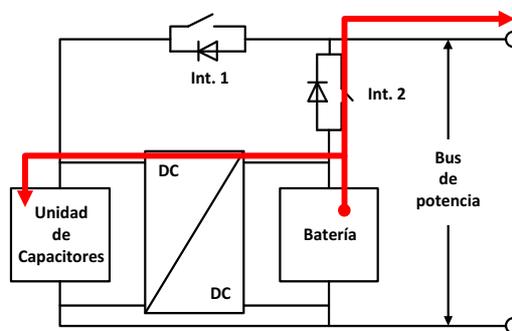


Figura 5.8: HESS en Modo 2D.

Un caso particular dentro del modo 2 de funcionamiento, es el llamado 2D. Este caso solo se da cuando el HESS está supliendo de energía al bus de potencia. Cuando, se da la condición de que la

potencia máxima de la batería es mayor que la potencia solicitada por el bus de potencia, la potencia sobrante de la batería se desvía hacia la unidad de capacitores, para poder cargar ésta en caso de que sea necesario. La necesidad o no de este modo de funcionamiento viene marcado por otras premisas que se desarrollan más adelante.

### Modo III

El tercer modo de funcionamiento, es el de menor potencia. Cuando la potencia del bus es menor que la potencia máxima de la batería y cuando la tensión de la unidad de capacitores es igual que la de la batería, puede entrar en funcionamiento este modo.

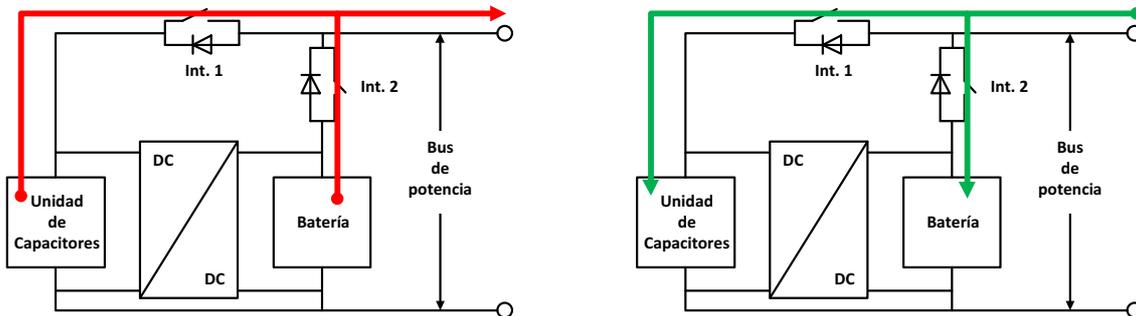


Figura 5.9: HESS en Modo 3A. Aportando energía (izqda) y absorbiendo energía (dcha).

En él, ambos interruptores están cerrados, por lo que batería y unidad de capacitores están conectados en paralelo con el bus de potencia. Este modo de funcionamiento no es muy útil en términos de funcionamiento del HESS, puesto que trabajando de esta manera, la unidad de capacitores se comporta como un mero filtro pasa-bajo. Además, como se verá más adelante, es muy difícil que el sistema entre en este modo, porque para ello, las tensiones de batería y unidad de capacitores han de estar parejas, y esto solo ocurre cuando los capacitores se encuentran en la parte más baja de su rango de funcionamiento, es decir, se encuentran prácticamente descargados.

### Modo IV

Cuando no existe corriente eléctrica entre el bus de potencia y el HESS, se activa el modo IV.

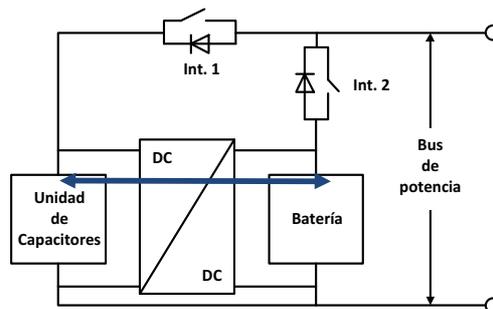


Figura 5.10: HESS en Modo 4.

En este modo, al estar abiertos los dos interruptores, el sistema se desconecta del bus, por lo que lo único que puede hacer es transferir energía entre la unidad de condensadores y la batería o viceversa. Este modo se puede considerar un caso especial incluido dentro del modo I o del modo II.

### 5.3 GESTIÓN DEL HESS

La premisa principal para el control del HESS es que los cambios de modo, han de realizarse sin que en el momento del cambio exista un salto en el voltaje, lo cual podría ocasionar desperfectos en los sistemas de almacenamiento energético. Por lo tanto, los interruptores solo pueden cerrarse cuando las tensiones de la unidad de capacitores y la batería sean iguales.

El objetivo principal que tiene que cumplir la gestión del HESS, es la de distribuir la potencia entre los dos modos de almacenamiento, manteniendo en rango los niveles de funcionamiento de los dos sistemas, mientras cumple de la mejor manera posible las solicitudes de potencia del bus.

La estrategia de control, elige en cada momento la opción más adecuada de funcionamiento basándose en datos recabados en el instante inmediatamente anterior. Como los datos de los ciclos de conducción están suministrados por segundo, se podría decir que la frecuencia de muestreo y cálculo del sistema es de una vez por segundo.

En las figuras, se muestra al final de cada itinerario sendos códigos, el primero (en negro) muestra un número de función exclusivo y específico para cada itinerario. El segundo código (en rojo) hace referencia al modo de funcionamiento del HESS que corresponde. La adopción de este método queda explicada por la ventaja que supone tener una referencia unívoca para cada camino.

#### Modo I

A continuación se representa el diagrama de proceso de decisión que sigue la estrategia de gestión del HESS estudiado.

Partiendo de la base de que en el anterior intervalo de estudio, el HESS se encontraba en Modo I, se tienen las siguientes circunstancias.

Para el caso de absorción de energía por parte del sistema, éste comprueba si el voltaje de la unidad de capacitores es igual al de la batería. Esta condición es fundamental puesto que solamente si ésta se cumple, el sistema podrá cambiar de modo. En caso contrario, al no permitirse saltos de voltaje en los cambios, el sistema permanecerá en el Modo I.

Suponiendo que el voltaje de la batería y el de los capacitores sea igual, en caso de que la potencia a absorber desde el bus de potencia sea menor que la que la batería puede absorber, el sistema cambia a Modo III, conectando simultáneamente la unidad de capacitores con la batería. Si la potencia a absorber desde el bus es mayor de la que la batería es capaz de aguantar, el sistema permanecerá en Modo I, con el capacitor absorbiendo toda la potencia que llega desde el bus. Dependiendo de si el nivel de voltaje de los capacitores está por encima de su máximo y el SOC de la batería por debajo de su mínimo, se derivará potencia desde el capacitor hacia las baterías a través del convertidor DC-DC del sistema de almacenamiento.

En caso de no ser los voltajes de la batería y de la unidad de condensadores iguales, no se podría producir el cambio de modo, y el sistema permanecería en Modo I, recogiendo los capacitores la potencia procedente del bus y derivándola excepcionalmente hacia la batería siguiendo los mismos criterios que explicados en el párrafo anterior.

Cuando existe demanda de potencia en el bus de potencia, necesaria para alimentar el motor eléctrico, el procedimiento para la toma de decisión del sistema sigue un razonamiento similar. En caso de que el

voltaje de las baterías y la unidad de capacitores sea igual, el sistema pasa a Modo III. Si los voltajes difieren, el sistema permanece en Modo I, con la unidad de capacitores alimentando el bus de potencia. Si el voltaje de la unidad de capacitores es mayor del máximo, y el SOC de la batería es menor del mínimo, es la unidad de capacitores la que alimenta el bus de potencia, mientras que si se incumple alguna o las dos condiciones anteriores, la unidad de capacitores, además de suministrar potencia al bus, derivara parte de esa potencia hacia las baterías, para sacarlas del nivel de carga mínimo.

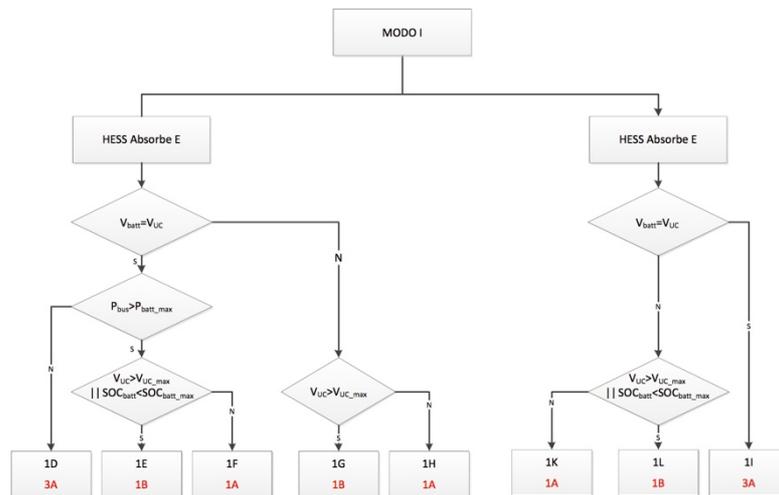


Figura 5.11: Árbol de decisión para el Modo I.

## Modo II

Cuando el sistema de almacenamiento energético híbrido (HESS) está trabajando en el modo II, el bus de potencia se encuentra conectado con la unidad de baterías, por lo tanto, y empezando por la opción de que el sistema esté absorbiendo energía se establecen los siguientes patrones de comportamiento.

La primera disyuntiva es si el voltaje de la batería es igual al voltaje de la unidad de capacitores. Es caso afirmativo, el sistema se podrá plantear la posibilidad de cambiar de modo. En caso contrario, el sistema tendrá que permanecer en cualquier modalidad de funcionamiento del modo II, puesto que no se permiten saltos de potencial en los cambios de modo de funcionamiento. Si como se expone los voltajes son iguales, el sistema compara la potencia procedente del bus, con la potencia máxima que es capaz de absorber la batería. En el caso de que la potencia del bus sea menor que la potencia máxima que puede absorber la batería, el sistema pasará al modo III de funcionamiento (el modo de menor potencia). En caso de que la potencia del bus sea mayor que la potencia máxima de la batería, el sistema procederá a cambiar su modo de funcionamiento al modo I. En el modo I, toda la potencia del bus es absorbida por la unidad de capacitores. En el caso de que se cumpla que el voltaje de la unidad de capacitores es mayor que su voltaje máximo, mientras que el SOC de la batería esté por debajo de su mínimo, el convertidor DC-DC, entrará en funcionamiento, haciendo que el banco de baterías actúe como almacenamiento secundario.

Cuando el voltaje de las baterías y de la unidad de capacitores es diferente entre ellos, el sistema sopesará una serie de valores y condiciones para tomar una decisión, pero esta decisión será siempre un sub-modo de funcionamiento incluido dentro del modo II.

En el caso de que la potencia del bus sea mayor que la suma de las potencias máximas de la batería y del convertidor de potencia continua (DC-DC), el sistema absorberá energía en el modo II, con el convertidor de potencia derivando energía desde el bus hacia el capacitor, colaborando con la batería a absorber potencia, como almacenamiento secundario. Si por el contrario la potencia del bus se encuentra entre el valor de la suma de potencias máximas de la batería y el convertidor de potencia, y el valor de la potencia máxima de la batería en solitario, el modo de funcionamiento será modo II, pero con el convertidor trabajando a una potencia determinada por debajo de su máximo, que será igual a la diferencia entre la potencia en el bus menos la potencia máxima de la batería. En otras palabras, el convertidor DC-DC llevará hasta el capacitor la potencia “que le sobra” a la batería.

Cuando la potencia en el bus es inferior a la potencia máxima de la batería toda la potencia se canaliza directamente hacia ésta, a no ser que el capacitor se encuentre por debajo del mínimo voltaje de funcionamiento y la batería se encuentre por encima de su estado de carga mínimo. En este caso, una parte de la potencia (la máxima capacidad del convertidor) se destina a cargar el capacitor, mientras que la potencia restante, se utiliza para cargar la batería.

Se ha desarrollado la estrategia de gestión del HESS para el modo II, cuando éste se encuentra en el modo de absorber energía. Cuando es el sistema el que está aportando la energía hacia el bus de potencia, se gestiona de la siguiente manera.

Al igual que cuando el HESS absorbe energía, la primera comprobación que se hace cuando se está supliendo energía es comparar los voltajes del banco de baterías y de la unidad de capacitores, puesto que esto condiciona el cambio intermodal.

En el caso de que los voltajes sean iguales, el sistema pasa al modo de funcionamiento III, en el cual batería y capacitor están conectado simultáneamente con el bus de potencia. En caso contrario, el sistema permanecerá en uno u otro sub-modo de funcionamiento del modo II. El sistema compara la potencia demandada por el bus con respecto a la potencia máxima de la batería. Si la potencia del bus es menor que la de la batería, será exclusivamente la batería la que aporte toda la potencia requerida por el bus, a no ser que el SOC de ésta, se encuentre por debajo del mínimo, y el voltaje del capacitor por encima del máximo, en cuyo caso, una parte de la energía será suministrada por el capacitor a través del convertidor DC-DC.

Si la potencia del bus es mayor que la de la batería y además es mayor que la suma de las potencias de la batería y del convertidor, el sistema trabajara en modo II, con el convertidor actuando a plena potencia para que el capacitor colabore con la batería a suministrar energía al bus. Si la potencia requerida esta entre la suma de las potencias de batería y convertidor y la potencia de la batería, el sistema trabajará proporcionando potencia desde la batería y desde el convertidor, trabajando este último a una potencia igual a potencia demandada menos la potencia de la batería, es decir, suministrando la potencia que “le falta” a la batería.

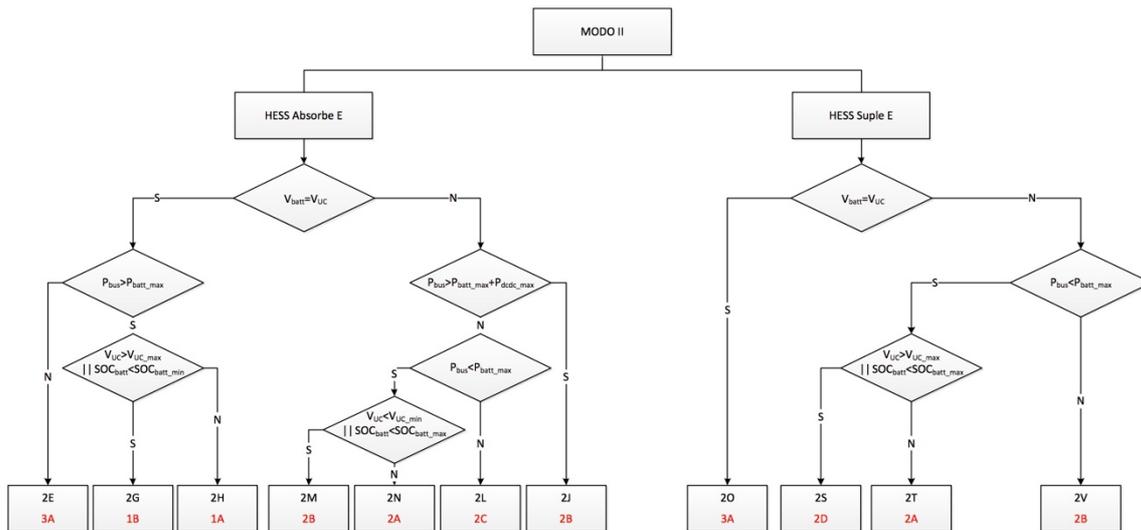


Figura 5.12: Árbol de decisión para el Modo II.

### Modo III

En el caso del modo III, la batería y el la unidad de capacitores están conectadas simultáneamente y en paralelo con el bus de potencia. Desde este modo, se puede cambiar en cualquier momento a cualquiera de los otros dos modos sin que exista un salto de potencia.

Cuando el sistema se encuentra absorbiendo potencia en el modo III, la primera disyuntiva que se plantea es si el HESS se puede permitir seguir operando en el mismo modo. Para ello analiza la potencia proveniente del bus. Si ésta es menor que la potencia máxima de la batería, el sistema permanecerá en el modo III, el de menor potencia.

Si la potencia que proviene del bus es menor que la suma de las potencias de la batería y el convertidor de potencia de corriente continua, el sistema pasará al modo de funcionamiento II, donde la batería es el almacenamiento principal y el capacitor el almacenamiento secundario que absorbe la potencia que le transmite el convertidor. El convertidor derivará la potencia máxima desde el bus hacia el capacitor solo en el caso de que el voltaje del capacitor sea inferior al mínimo y el SOC de la batería esté por encima del máximo. En caso contrario, la potencia derivada por el convertidor desde el bus hacia el capacitor será igual a la potencia del bus menos la de la batería.

Si la potencia que proviene del bus es mayor que la suma de las potencias de la batería y el convertidor de potencia, no será suficiente con el modo II para absorber toda la energía disponible, por lo que el sistema cambiara a su modo de mayor potencia, el modo I. En este modo, el capacitor absorberá toda la potencia que entrega el bus, salvo en el caso de que el capacitor alcance valores críticos de voltaje, y que la batería se encuentre por debajo de su estado de carga mínimo. En ese caso, parte de la energía será absorbida por el capacitor y parte será derivada hacia la batería a fin de liberar al capacitor y ayudar a recuperar niveles admisibles de trabajo en la batería.

Cuando el sistema suple de energía al bus de potencia desde el modo III, solo existen dos opciones: permanecer en el modo III, o cambiar al modo II. La decisión se fundamenta en los niveles de carga del capacitor y de la batería. Si los niveles son “normales”, el sistema permanecerá en el modo III. Si los niveles de carga del capacitor bajan por debajo del mínimo, el sistema intenta volver a meter en rango dichos valores, para ello pasa al modo II, en el cual se conecta el bus solamente a la batería, y por

medio del convertidor de potencia, se le suministra al capacitor la energía que necesita para llevar su voltaje por encima del valor mínimo.

Nótese que cuando el sistema está supliendo de energía al bus y está en el modo I, el sistema permanece en este modo, hasta que los voltajes de batería y capacitor son iguales. En ese momento el capacitor esta “descargado”, y el sistema puede cambiar entre modo II o modo III, pero nunca podrá pasar desde ninguno de estos dos modos hacia el modo I si antes no existe un periodo en el cual se produzca absorción de energía que permita “cargar” el capacitor.



Figura 5.13: Árbol de decisión para el Modo III.

## 6 CÁLCULOS

### 6.1 HIPÓTESIS Y PUNTOS DE PARTIDA

Este trabajo pretende ser una herramienta para el cálculo y dimensionamiento de un sistema de almacenamiento energético híbrido. Para ello se parte de diferentes ciclos de conducción establecidos, los cuales servirán para constituir el tipo de conducción. También se contemplan las distintas configuraciones que pueda tener el vehículo, tales como el peso, sus dimensiones, su coeficiente aerodinámico, etc.

La naturaleza de las variables de los datos de partida es discreta, puesto que se parte de los ciclos de conducción y estos, se presentan como una correlación de velocidades en función de una variable temporal, presentada de forma discreta (a cada segundo le corresponde un valor velocidad).

Por este motivo, se suponen intervalos de cálculo de un segundo de duración, en los cuales las aceleraciones son constantes a lo largo de dicho intervalo, y las velocidades calculadas son las velocidades medias en el intervalo.

Para manejar estos datos de naturaleza discreta, se ha optado por utilizar una hoja de cálculo con la que realizar los cálculos necesarios.

En este trabajo, las variables cinemáticas (posición, velocidad, aceleración), no se calculan en base a un cálculo integral sobre el tiempo, sino que se calculan en base a los valores iniciales y finales del intervalo. Así, una aceleración no se calcula como la integral de la velocidad en función de  $t$ , sino como la diferencia entre la velocidad en el instante  $t$  menos la velocidad en el instante  $t_0$ .

En este trabajo se van a tener en cuenta los ciclos de conducción, que se han desarrollado en el capítulo correspondiente, por ser los más relevantes. Bien sea por su extendido uso, como es el caso del ciclo Europa, como por su buena capacidad para representar las condiciones que se dan en la conducción ordinaria, como ocurre con el WLTP. Por la relevancia que tienen en sus respectivos mercados, también están presentes el FTP americano y el JAPAN 10-15 japonés.

A la hora de desarrollar la estrategia de gestión, se habla de que los cambios de modo han de producirse cuando los voltajes son iguales, sin embargo, al trabajar con variables discretas no se puede asegurar que en un tiempo en concreto los voltajes vayan a coincidir, a diferencia de las variables continuas en las que sí que se pueden vaticinar este tipo de resultados tal y como se hace en la búsqueda de ceros o de raíces, por medio del teorema de Bolzano. Por éste motivo, en la formulación del algoritmo a seguir por el sistema, se sustituye la igualdad entre los voltajes por una condición en la cual la diferencia absoluta entre éstos no sea mayor de una cantidad determinada, suficiente para asegurar que se produzca el cambio de modo con normalidad.

En cuanto a las premisas que se han aceptado, se encuentran las siguientes:

- El alcance de este trabajo abarca el sistema de almacenamiento y como límite, el bus de potencia, no se tienen en cuenta las características del motor eléctrico, o su rendimiento.
- Al no tratarse de una simulación en profundidad, los elementos de almacenamiento eléctrico, no se encuentran modelados al detalle, por lo que todos los cálculos han sido realizados con una base puramente teórica. No se han tenido en cuenta los rendimientos.
- En cuanto al cálculo de la resistencia aerodinámica, se ha supuesto viento en reposo.
- Al trabajar en una variable discreta, se ha sustituido la condición de igualdad (entre los voltajes de los distintos sistemas de almacenamiento) por una condición de diferencia de voltajes acotada por un máximo absoluto.
- Aunque en la herramienta se han previsto los cálculos para calcular la fuerza y potencia de ascenso (o de gradiente), no se ha calculado puesto que los ciclos de conducción homologados se suponen realizados sobre superficie plana.

## 6.2 CÁLCULOS

Los cálculos necesarios han sido desarrollados mediante el uso de hojas de cálculo, de la forma que se desarrolla a continuación. La explicación de cada uno de los campos se realiza en el orden en el que están presentados en la hoja de cálculo, que a su vez, siguen la secuencia lógica para necesaria para su cálculo.

### 6.2.1 CONDICIONES ESPECÍFICAS DE CADA CASO DE ESTUDIO

Las contantes indicadas a continuación, se introducen dependiendo de las características del vehículo y del entorno consideradas en el estudio.

**Masa:** La masa del vehículo a estudiar se introduce en kilogramos.

**Alto:** La altura del vehículo en metros.

**Ancho:** Anchura del vehículo expresada en metros.

**$C_x$ :** Coeficiente de resistencia aerodinámica. Se trata de un número adimensional que se referirá a la superficie frontal del vehículo. El coeficiente  $C_x$ , mide la resistencia que ofrece un cuerpo a moverse en el seno de un fluido debido a la forma. Se toma como referencia la resistencia que ofrece una plancha cuadrada de metal, de 1 m de lado. Al coeficiente de la plancha se le atribuye el valor unidad, y al resto de cuerpos con la misma superficie frontal pero diferente forma se le asignan valores en comparación al de referencia.

**Densidad del aire.** Dato de entrada, que indica la densidad del fluido en el interior del cual se desplaza el objeto. Este dato resulta relevante en la resistencia aerodinámica. A mayor altura menor densidad del aire y por tanto, menor resistencia.

**Coeficiente de rodadura.** Interviene en la resistencia a la rodadura. Se trata de un número adimensional.

### 6.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL HESS

En este apartado se introducen las características del almacenamiento híbrido que va a ser objeto de estudio.

**Frenado regenerativo S/N.** A la hora de realizar los cálculos en cada punto del ciclo de conducción se contemplará o no (según se indique), la posibilidad de recuperar la energía procedente del frenado. Esto es especialmente importante a la hora de hacer estudios comparativos entre recuperar esa energía o perderla utilizando sistemas de frenado convencionales.

**Potencia máxima del bus.** La potencia que se tiene en cuenta para el calculo en cada paso del intervalo quedará acotada por arriba por este valor.

**Capacidad del capacitor.** Se trata de la capacidad de la Unidad de Capacitores empleados en el HESS. Es una unidad energética y por tanto se da en kJ.

**$V_{UC \max}$ :** Se trata del voltaje máximo de la Unidad de Capacitores, se considera en voltios.

**$V_{UC \min}$ :** Se trata del voltaje mínimo establecido para la Unidad de Capacitores, se considera en voltios.

**$SOC_{UC \text{ inicial}}$ :** El término SOC, se refiere únicamente a baterías, en este caso se ha tomado una licencia para referirse con este término también a la Unidad de capacitores y denominar así al porcentaje inicial de carga máxima de dicha unidad.

**SOC<sub>BATT max</sub>:** Término referido al estado de carga (State Of Charge) máximo permitido para la batería. Se presenta como un porcentaje del estado de carga máximo.

**SOC<sub>BATT min</sub>:** Término referido al estado de carga (State Of Charge) mínimo permitido de la batería. Se presenta como un porcentaje del estado de carga máximo.

**SOC<sub>BATT inicial</sub>:** El término SOC inicial, indica el porcentaje de carga que tiene la Unidad de Baterías cuando se comienza el estudio.

**Capacidad batería:** Se trata de la energía que es capaz de almacenar la unidad de baterías del HESS. Está presentado en kJ.

**Número de celdas serie:** El número de celdas colocadas en serie, tendrá influencia sobre el voltaje final de la unidad de capacitores.

**P<sub>DCDCmax</sub>:** Se trata de la máxima potencia que el convertidor de potencia es capaz de transferir entre la unidad de baterías y la de capacitores o viceversa.

**Capacitancia:** Referida a la Unidad de Capacitores. Se calcula en faradios (F).

**Potencia Batt Max:** Se trata de la potencia que es capaz de proporcionar la unidad de baterías en un instante determinado. Está dada en kW.

### 6.2.3 VARIABLES

A continuación se indican todas las variables utilizadas en el estudio del sistema de almacenamiento energético. Estas variables pueden cambiar de valor en cada paso del intervalo estudiado. Los términos de potencia indicados a continuación están referidos como valores absolutos. El criterio de signos que se utiliza en la hoja de cálculo establece que la potencia suministrada por el HESS es de signo positivo, y la absorbida es de signo negativo. No obstante, en las expresiones mostradas en este apartado no se tiene en cuenta el criterio de signos, con la intención de hacer más intuitivos los conceptos. Están definidos de manera estricta todos los cálculos realizados en la propia hoja de cálculo.

**Tiempo.** Es un dato conocido y representa la variable independiente. Los datos se presentan en función de esta variable primaria.

**Velocidad en Km/h.** Es un dato conocido, se parte de él como origen de datos de este trabajo. Los ciclos de conducción se presentan de esta forma.

**Velocidad en m/s.** Se trata de una simple conversión de unidades para poder trabajar con la velocidad del vehículo indicada en unidades del sistema internacional.

**Aceleración.** Como se ha explicado en el apartado “hipótesis y puntos de partida”, la aceleración es calculada como la diferencia de velocidades entre el estado actual y el estado previo, dividido entre el intervalo de tiempo transcurrido, que como es la unidad (el tiempo de muestreo es de un segundo), el resultado final es el mismo que el de la propia recta.

**Altura.** Se trata de un dato. La herramienta está diseñada para tener en cuenta la fuerza de ascenso o descenso. En los ciclos de conducción estándar, éste dato es constante e igual a cero, es decir, se supone que el ciclo de conducción se realiza en un recorrido totalmente plano.

**Pendiente ( $\alpha$ ).** Se muestra en radianes, y se calcula como el arco-seno de la altura ascendida en el intervalo (cateto opuesto), dividido entre la distancia recorrida en el intervalo (velocidad por el tiempo), y que representa a la hipotenusa de la relación trigonométrica.

**Energía Cinética.** Se calcula como:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad \text{Ec. 6.1}$$

Dónde:

$E_C$  es la energía cinética, está expresada en julios (J).

$m$  es la masa del vehículo expresada en kilogramos.

$V$  es la velocidad del vehículo expresada en m/s.

**Fuerza de Rodadura.** Se calcula como:

$$F_r = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos\alpha = m \cdot g \cdot \left[ 0.01 \cdot \left( 1 + \frac{V}{160} \right) \right] \cdot \cos\alpha \quad \text{Ec. 6.2}$$

Dónde:

$F_r$  es la fuerza aerodinámica, se expresa en newtons.

$m$  es la masa del vehículo.

$g$  es la aceleración de la gravedad.

$f_r$  es el coeficiente de rodadura.

$V$  es la velocidad del vehículo expresada en m/s.

**Potencia de rodadura (Fuerza de Rodadura · Velocidad).** Es el resultado de la multiplicación de la Fuerza aplicada por la velocidad a la que circula el vehículo. La magnitud resultante es una potencia que se expresa en vatios (W).

**Fuerza aerodinámica.** La fuerza resistente aerodinámica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_x \cdot V^2 \quad \text{Ec. 6.3}$$

Dónde:

$F_w$  es la fuerza aerodinámica, se expresa en *newtons*.

$\rho$  es la densidad del aire

$A_f$  es la superficie frontal del vehículo,

$C_x$  es el Coeficiente de resistencia aerodinámica, y

$V$  es la velocidad del automóvil.

**Potencia aerodinámica (Fuerza aerodinámica · Velocidad).** Se obtiene como el resultado de la multiplicación de la fuerza aerodinámica por la velocidad del móvil en cada intervalo del estudio. Como una potencia que es, se mide en vatios (W).

**Fuerza gradiente.** Se calcula como:

$$F_g = M \cdot g \cdot \text{sen } \alpha \quad \text{Ec. 6.4}$$

Dónde:

$F_g$  es la fuerza de gradiente, se expresa en *newtons*.

$g$  es el valor de la gravedad terrestre, tomado como 9.81 m/s<sup>2</sup>

$\text{sen } \alpha$  es el valor del seno del ángulo que forma la pendiente del plano sobre el que se desplaza el vehículo en relación al plano horizontal.

**Potencia gradiente (Fuerza gradiente · Velocidad). (W).** Se calcula como el resultado de multiplicar la fuerza por la velocidad del vehículo. Como la fuerza está descompuesta, la única componente que genera trabajo es la colineal con el vector velocidad del vehículo.

**Energía Cinética.** Se trata de la misma energía cinética calculada anteriormente, pero con un cambio de unidades. En esta ocasión se utiliza el kJ como unidad para medir la energía.

**Potencia a velocidad estacionaria.** Se trata de la potencia necesaria que tiene que suministrar el sistema de almacenamiento energético para mantener el vehículo circulando a la velocidad correspondiente en cada momento. Se trata de la suma de las tres potencias vistas hasta ahora: Potencia de rodadura, aerodinámica y de gradiente. Se da en kW.

**Potencia para acelerar.** Aunque no se trata de una potencia generada por una fuerza resistente como tal, para acelerar el vehículo, es necesario un aporte extra de energía en un tiempo determinado. Este concepto es el de potencia para acelerar, y está calculado como la diferencia entre la energía cinética del intervalo actual, menos la energía cinética del intervalo anterior.

$$P_A = E_C(t) - E_C(t - 1)/(t - (t - 1)) \quad \text{Ec. 6.5}$$

**Potencia Instantánea.** Es la suma de la potencia necesaria para mantener una velocidad estacionaria, y la potencia necesaria para acelerar. Esta presentada en kW.

**Distancia recorrida acumulada.** Se trata de una variable que suma la distancia recorrida en cada periodo muestreado sumada a la recorrida previamente. Se presenta en metros.

**Potencia en el bus.** El valor de esta variable depende de los datos que definen las condiciones del HESS, mediante una expresión que define un flujo de decisión. Si se eligió un HESS sin frenado regenerativo, este valor nunca podrá ser negativo. Un valor negativo, indica la transmisión de potencia desde el bus de potencia hacia el HESS. Por otro lado dicha expresión también acota la máxima potencia que es capaz de darse en el bus.

**Código de Función.** Se trata de una expresión que denomina de forma unívoca a cada una de los distintos caminos que puede seguir el flujo de decisión. Los estados finales que puede tomar el HESS, pueden ser los mismos, aunque se haya llegado a ellos por distintos caminos. Posteriormente, este código de función es traducido a las diferentes configuraciones que pueden darse en el HESS. Esta traducción se presenta en las variables “Modo HESS” y “Modo DCDC”.

**Modo HESS.** Esta variable indica el modo de funcionamiento del sistema de almacenamiento, toma los valores 1, 2 o 3, siendo el número 1 el de mayor potencia y el 3 el de menor potencia.

**Modo DCDC.** Dentro de cada uno de los modos, existen diferentes configuraciones. Éstas vienen marcadas por el modo de funcionamiento que tenga el convertidor DCDC. El modo A indica que el convertidor no trabaja, es decir, no transforma ninguna potencia entre capacitores y baterías, en este caso la unidad de capacitores y la batería están desconectados. El modo B de funcionamiento del convertidor, se refiere a un funcionamiento a plena carga, entre baterías y capacitores o viceversa. La dirección de transferencia de potencia se indica mediante el signo de la potencia DCDC que se explica

en el siguiente punto. Cuando el convertidor DCDC se encuentra funcionando en el modo C, trabaja con una carga comprendida entre el cero y la potencia máxima del convertidor. Este valor viene dado por la diferencia entre las potencias del bus y la potencia máxima de la batería, funcionando el convertidor como un “suplemento” a la potencia que la batería puede dar o absorber.

**Potencia DCDC.** Este número indica la potencia que está transfiriendo el convertidor desde los capacitores hacia la batería, en el caso de que esta cifra sea positiva. Mientras que si la cantidad indicada es negativa, significa que la energía está fluyendo desde las baterías hacia los capacitores.

**Energía Capacitor. (kJ).** Representa la cantidad de energía eléctrica almacenada en los capacitores. Esta energía está calculada en base a una serie de condicionales supeditados a la estrategia de gestión del HESS. De esta manera, se tienen los siguientes comportamientos:

Si el modo de funcionamiento es 1A: La energía de los capacitores es igual a la energía de los capacitores en el caso anterior menos la energía suministrada en caso de estar suministrando energía. En caso contrario, la energía será igual a la energía del paso anterior más la energía recuperada procedente del bus de potencia.

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - P_{bus} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.6}$$

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} + P_{bus} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.7}$$

Para el modo de funcionamiento 1B: La energía de los capacitores es igual a la energía anterior menos la diferencia entre la energía requerida por el bus y la energía que suministra el convertidor DCDC. De la misma manera, pero en sentido contrario actuaría la expresión para el caso en el cual el sistema se cargara de energía desde el bus de potencia. En este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será máxima.

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - (P_{bus} - P_{DCDC}) \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.8}$$

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} + (P_{bus} - P_{DCDC}) \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.9}$$

Para el modo de funcionamiento 2A: En este caso, la cantidad de energía en los capacitores no varía, puesto que toda la transferencia de potencia, se realiza exclusivamente entre la batería y el bus de potencia.

Para el modo de funcionamiento 2B: La energía que se transfiere entre los capacitores y el bus de potencia en esta configuración de funcionamiento, se produce únicamente a través del convertidor de potencia. Por lo tanto, la única variación en la cantidad de energía de los capacitores, será la que la potencia del convertidor permita. En este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será máxima. De esta manera:

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.10}$$

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} + P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.11}$$

Para el modo de funcionamiento 2C: Al igual que en el modo de funcionamiento anterior, la energía que se transfiere entre los capacitores y el bus de potencia en esta configuración, se produce únicamente a través del convertidor de potencia, sólo que en este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será solamente la que no sea capaz de proporcionar/absorber la batería. De esta manera:

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.12}$$

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} + P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.13}$$

Dónde:

$$P_{DCDC} = P_{bus} - P_{batt} \quad \text{Ec. 6.14}$$

Para el modo de funcionamiento 2D: Este modo de funcionamiento, es un modo similar al 2C, con la salvedad de que este modo, no es reversible, es decir, sólo se da en el caso de que se requiera en el bus una potencia inferior a la potencia máxima de la batería. En este caso y bajo las premisas del sistema de gestión del HESS, la potencia no utilizada de la batería, se utiliza para recargar los capacitores. De esta manera:

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - P_{DCDC} \cdot t \quad \text{Ec. 6.15}$$

Para el modo de funcionamiento 3A: En este modo de funcionamiento, la unidad de capacitores como la unidad de baterías están conectadas en paralelo. Este modo de conexión hace que no tenga sentido un convertidor de potencia que conecte dichas unidades entre ellas, por lo tanto, la energía contenida en la unidad de capacitores para esta configuración es de la forma:

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} - \frac{1}{2} P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.16}$$

$$E_{cap_n} = E_{cap_{n-1}} + \frac{1}{2} P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.17}$$

**SOC del Capacitor.** Se trata de una medida “intuitiva” para entender la cantidad de energía existente en ese momento en la unidad de capacitores en comparación a la máxima energía que éste sería capaz de albergar. Se ha adoptado la nomenclatura “State Of Charge” utilizada en las baterías por referirse al mismo concepto. Por lo tanto esta expresión es de la forma:

$$SOC_{cap} = \frac{E_{cap_n}}{E_{cap_{max}}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 6.18}$$

## Vuc.

Partiendo de la ecuación 4.10:

$$w = \int_{-\infty}^t p dt = C \int_{-\infty}^t v \frac{dv}{dt} dt = C \int_{-\infty}^t v dv = \frac{1}{2} C v^2 \Big|_{t=-\infty}^t \quad \text{Ec. 6.19}$$

Se puede afirmar que la energía contenida en el capacitor es el trabajo realizado por una fuerza eléctrica, para aumentar el voltaje desde el mínimo hasta el voltaje en el instante  $t$ . Por lo tanto, resolviendo la integral y renombrando términos se obtiene:

$$E_{cap_n} = \frac{1}{2} \cdot C_{UC} \cdot v_{UC}^2 - v_{UC_{min}}^2 \quad \text{Ec. 6.20}$$

Despejando el término  $V_{UC}$  en la anterior ecuación:

$$V_{UC} = \sqrt{2 \cdot \frac{E_{cap_n} \cdot 1000 + \frac{C_{UC} \cdot V_{UC_{min}}^2}{2}}{C_{UC}}} \quad \text{Ec. 6.21}$$

**Energía Batería. (kJ).** Los cálculos que se realizan para obtener la energía existente en la batería para cada iteración, al igual que en el caso de la unidad de capacitores, están sometidos a las condiciones que marque la estrategia de organización del HESS. Esto quiere decir que en cada iterando se comprobará en que configuración está funcionando el sistema, para así calcular la energía dependiendo de cada caso. Los cálculos que se realizan para cada configuración son los siguientes:

Si el modo de funcionamiento es 1A: En este caso, la cantidad de energía en la batería no varía, puesto que toda la transferencia de potencia, se realiza exclusivamente entre los capacitores y el bus de potencia.

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} \quad \text{tanto si el HESS absorbe energía como si la suministra.} \quad \text{Ec. 6.22}$$

Para el modo de funcionamiento 1B: La energía que se transfiere entre las baterías y el bus de potencia en esta configuración de funcionamiento, se produce únicamente a través del convertidor de potencia. Por lo tanto, la única variación en la cantidad de energía de las baterías, será la que la potencia del convertidor permita. En este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será máxima. De esta manera:

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} - P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.23}$$

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} + P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.24}$$

Para el modo de funcionamiento 2A: La energía de la batería es igual a la energía de la batería en el paso anterior menos la energía suministrada (en el caso de que el HESS esté suministrando energía). En caso de que el HESS se encuentre absorbiendo energía del bus de potencia, la energía será igual a la energía del iterando anterior más la energía recuperada procedente del bus de potencia.

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} - P_{bus} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.25}$$

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} + P_{bus} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.26}$$

Para el modo de funcionamiento 2B: La energía de las baterías es igual a la energía anterior menos la diferencia entre la energía requerida por el bus y la energía que suministra el convertidor DCDC. De la misma manera, pero en sentido contrario actuaría la expresión para el caso en el cual el sistema se cargara de energía desde el bus de potencia. En este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será máxima.

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} - (P_{bus} - P_{DCDC}) \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.27}$$

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} + (P_{bus} - P_{DCDC}) \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.28}$$

Para el modo de funcionamiento 2C: Al igual que en el modo de funcionamiento anterior, la energía que se transfiere entre los capacitores y el bus de potencia en esta configuración, se produce únicamente a través del convertidor de potencia, sólo que en este caso, la potencia del convertidor ( $P_{DCDC}$ ), será solamente la que no sea capaz de proporcionar/absorber la batería. De esta manera:

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} - P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.29}$$

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} + P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.30}$$

Dónde:

$$P_{DCDC} = P_{bus} - P_{batt} \quad \text{Ec. 6.31}$$

Para el modo de funcionamiento 2D: Este modo de funcionamiento, es un modo similar al 2C, con la salvedad de que este modo, no es reversible, es decir, sólo se da en el caso de que se requiera en el bus una potencia inferior a la potencia máxima de la batería. En este caso y bajo las premisas del sistema de gestión del HESS, la potencia no utilizada de la batería, se utiliza para recargar los capacitores. De esta manera:

$$E_{batt_n} = E_{batt_{n-1}} - P_{batt_{max}} \cdot t \quad \text{Ec. 6.32}$$

Para el modo de funcionamiento 3A: En este modo de funcionamiento, la unidad de capacitores como la unidad de baterías están conectadas en paralelo. Este modo de conexión hace que no tenga sentido un convertidor de potencia que conecte dichas unidades entre ellas, por lo tanto, la energía contenida en la unidad de capacitores para esta configuración es de la forma:

$$Ebatt_n = Ebatt_{n-1} - \frac{1}{2} P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de suministrar potencia.} \quad \text{Ec. 6.33}$$

$$Ebatt_n = Ebatt_{n-1} + \frac{1}{2} P_{DCDC} \cdot t \quad \text{en el caso de absorber potencia.} \quad \text{Ec. 6.34}$$

**"SOC" Bateria.** El estado de carga (State Of Charge) expresa la cantidad de carga medida en amperios-hora que puede suministrar una batería en relación al máximo o nominal. Se expresa en un porcentaje, y su forma es la que sigue:

$$SOC = \frac{Ebatt}{Ebatt_{max}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 6.35}$$

**Vbatt.** Como se explicó en el capítulo de las baterías, el voltaje de las baterías varía de una forma no lineal en relación a su estado de carga. En este trabajo la variación del voltaje se ha tomado bajo la siguiente ecuación:

$$V_{batt} = n \cdot (-197.3628 DoD^7 + 643.0525 DoD^6 - 841.4597 DoD^5 + 563.8342 DoD^4 - 204.1659 DoD^3 + 39.1562 DoD^2 - 4.2624 DoD + 3.65) \quad \text{Ec. 6.36}$$

Dónde:

$n$  es el número de celdas que componen la unidad de baterías

$DoD$  es la profundidad de descarga (Deep Of Discharge), siendo  $DoD = 1 - SOC$

## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 CICLO WLTP

A continuación se procede al análisis de los resultados de un caso concreto. El vehículo objeto del análisis tiene un peso de 1200 kg en orden de marcha, esto es, se supone que en la masa del vehículo, está incluida la masa del conductor, la del sistema de almacenamiento y todo lo necesario para el correcto funcionamiento del vehículo. El ancho del vehículo es de 1963 mm y el alto es 1435 mm. Al vehículo analizado se le ha supuesto un coeficiente  $C_x$  de 0,24.

En cuanto a las características del sistema de almacenamiento energético híbrido, éste cuenta con una unidad de capacitores, que tiene una capacidad máxima de 4.000 KJ y una capacitancia de 115 faradios. La batería tiene una capacidad de 40098,8 KJ (11,14 kWh) y una potencia máxima de 10 KW. Con respecto al convertidor de potencia DCDC, en el caso analizado, consta de una capacidad máxima de 15 KW.

Con respecto al escenario utilizado para la prueba, se ha utilizado el ciclo de conducción *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures – WLTP*, desarrollado en el apartado 3.1.4.

Bajo el escenario y las características anteriormente descritas, se obtiene la siguiente demanda de potencia en base al tiempo transcurrido.

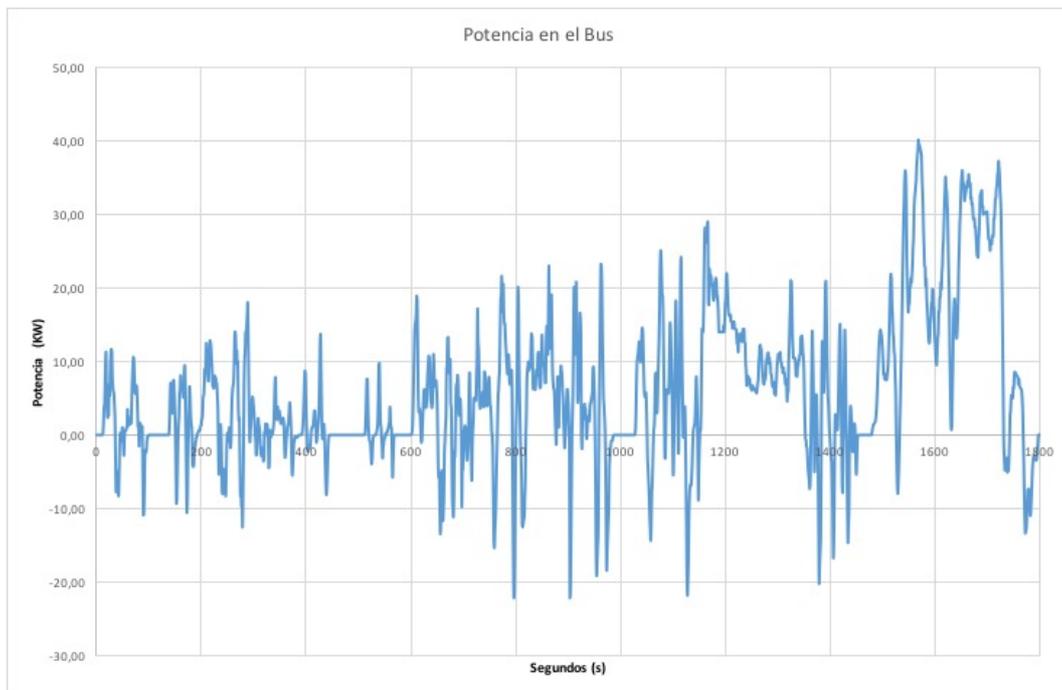


Gráfico 7-1: Potencia requerida en función del tiempo.

Sobre el gráfico 7-1, están representadas en positivo la potencia demandada por el bus, mientras que la potencia que ha de absorber el sistema de almacenamiento se muestra en valores negativos. Se puede observar como en la primera parte, que corresponde a una circulación urbana, no existen grandes picos de potencia, ni demandada ni absorbida, así como tampoco se observan largos periodos en los que la potencia es mantenida en el tiempo. Conforme el tiempo de ensayo va avanzando, se van sucediendo potencias cada vez más altas y mantenidas durante más tiempo. Esto es debido a que conforme más tiempo pasa, el ciclo va simulando un comportamiento del vehículo cada vez más en conducción por carretera, donde las velocidades mantenidas son más altas y el tiempo de las aceleraciones es mayor como causa de lo anterior.

Se puede observar también, como el área encerrada debajo de la curva de las potencias positivas es mayor que bajo las potencias negativas. Este hecho lógico e incuestionable es la causa de que las baterías se vayan descargando conforme más kilómetros se recorren.

A lo largo del ensayo, la gestión de la energía del sistema de almacenamiento hace que éste pase por los distintos modos de almacenamiento acorde a las premisas que se han explicado en el apartado 5.3.

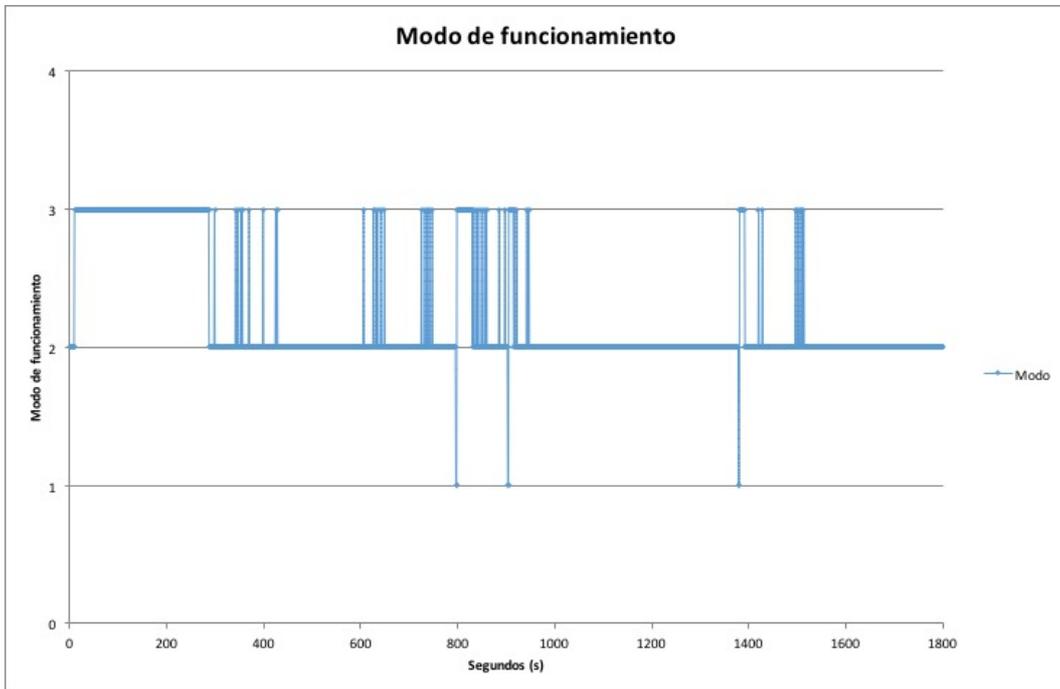


Gráfico 7-2: Modo de funcionamiento del HESS.

Para la elección del modo de funcionamiento en cada instante intervienen muchas variables, pero a tenor del gráfico se pueden sacar las siguientes conclusiones:

En los primeros compases del ensayo, donde la potencia no es muy elevada el sistema trabaja en el modo III (el de menor potencia), conforme se avanza en el ensayo y aumenta la potencia, cada vez durante más tiempo el sistema trabaja en el modo II, el que maneja una potencia intermedia y a su vez el más versátil. Mientras tanto, el sistema reserva el modo I (el de mayor energía) para ocasiones puntuales en las que la demanda / absorción de potencia es mayor, aunque la elección de éste método está supeditada a que las condiciones existentes en ese momento en el HESS así lo permitan.

En cuanto al funcionamiento del banco de baterías frente a la unidad de capacitores, se puede observar un comportamiento ciertamente diferente entre uno y otro dispositivo de almacenamiento.

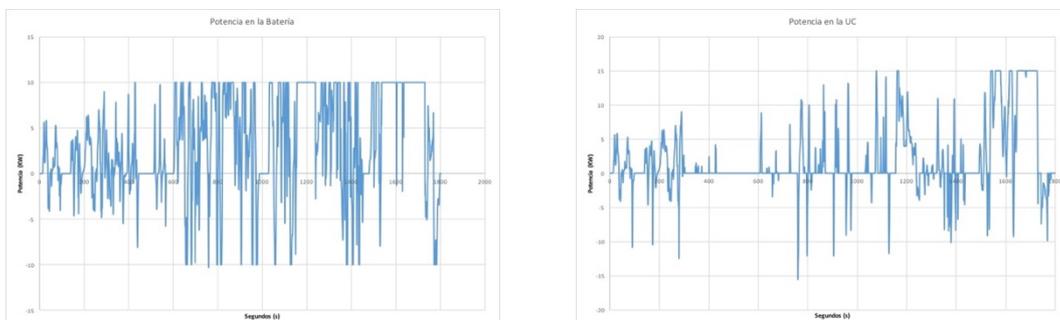


Gráfico 7-3: Distribución de potencias en batería y UC.

Mientras que en el gráfico de la izquierda que corresponde a la batería se observa gran cantidad de área por debajo de la curva, en el de la derecha, correspondiente a los capacitores, se aprecia mucho menos. Esto es debido a que la batería, al ser el almacenamiento principal, trabaja durante más tiempo, mientras que los capacitores, que no dejan de ser un apoyo a las baterías, en general son requeridos en menos ocasiones y durante mucho menos tiempo.

A lo largo de todo el análisis que se ha realizado en el presente apartado, se ha tenido en cuenta que el automóvil cuenta con frenado regenerativo eléctrico y un sistema híbrido de almacenamiento basado en la combinación baterías – capacitores. A continuación se presenta el consumo de energía del mismo a lo largo del ciclo de conducción. En el gráfico que se presenta a continuación se superpone a la gráfica del HESS, el consumo de energía de un sistema de almacenamiento sin hibridar (basado solamente en baterías) y en primer plano, el consumo de energía de un vehículo sin frenado regenerativo.

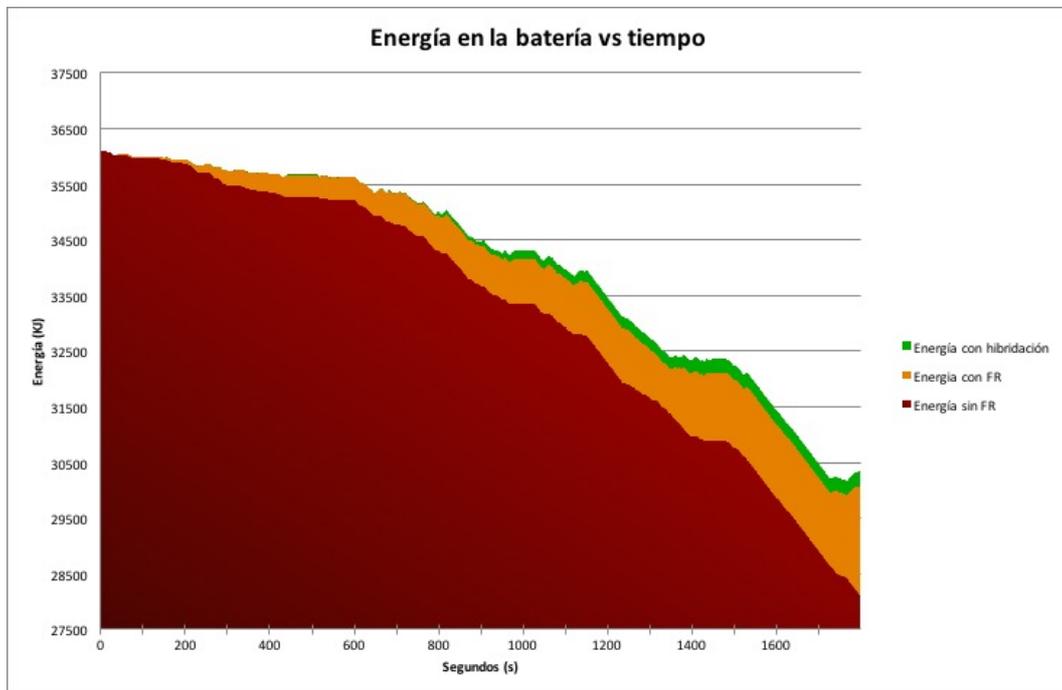


Gráfico 7-4: Consumo de energía.

En el gráfico se puede ver cómo en los primeros instantes de la prueba (allí donde la potencia era pequeña, por tratarse de circulación urbana) se presenta una curva descendente muy plana. En esta zona vemos que el el gasto energético del sistema sin frenado regenerativo solo puede descender (por la razón evidente de que no hay nada que le haga recuperar energía), mientras los otros dos casos si que presentan zonas en las que aumenta la energía total del sistema de almacenamiento.

A partir del segundo 200 aproximadamente, se observa como se empieza a notar el uso del frenado regenerativo sobre el vehículo que no dispone de él.

Comparando la serie de datos del sistema sin hibridación (representado en naranja), con el sistema híbrido de almacenamiento, se observa como a partir del segundo 800 aproximadamente empieza a hacerse palpable el ahorro de energía que supone el sistema híbrido frente al compuesto únicamente de baterías.

En este ensayo, en el cual se simula el recorrido de 23 kilómetros y 262 metros, se consumen 7995,28 KJ (2,22 kWh) con un vehículo sin frenado regenerativo.

Incluyendo el frenado regenerativo en el vehículo se consumen 5751 KJ (1,59 kWh), lo que supone un ahorro de energía de un 28,07% sobre el vehículo sin recuperación de energía.

Cuando se utiliza un sistema híbrido para el mismo ensayo, se consumen 5488 KJ (1,52 kWh), lo que supone un ahorro de energía de un 4,58% sobre el sistema de almacenamiento basado sólo en baterías.

## 7.2 CICLO NEDC

Al igual que en el apartado anterior, el vehículo objeto del análisis tiene un peso de 1200 kg en orden de marcha. El ancho del vehículo es de 1963 mm y el alto es 1435 mm. Al vehículo analizado se le ha supuesto un coeficiente  $C_x$  de 0,24.

En cuanto a las características del sistema de almacenamiento energético híbrido, éste cuenta con una unidad de capacitores, que tiene una capacidad máxima de 4.000 KJ y una capacitancia de 115 faradios. La batería tiene una capacidad de 40098,8 KJ (11,14 kWh) y una potencia máxima de 10 KW. Con respecto al convertidor de potencia DCDC, en el caso analizado, consta de una capacidad máxima de 15 KW.

Con respecto al escenario utilizado para la prueba, se ha utilizado el ciclo de conducción *New European Drivin Cycle (NEDC)* desarrollado en el apartado 3.1.1.

Bajo el escenario y las características anteriormente descritas, se obtiene la siguiente demanda de potencia en base al tiempo transcurrido.

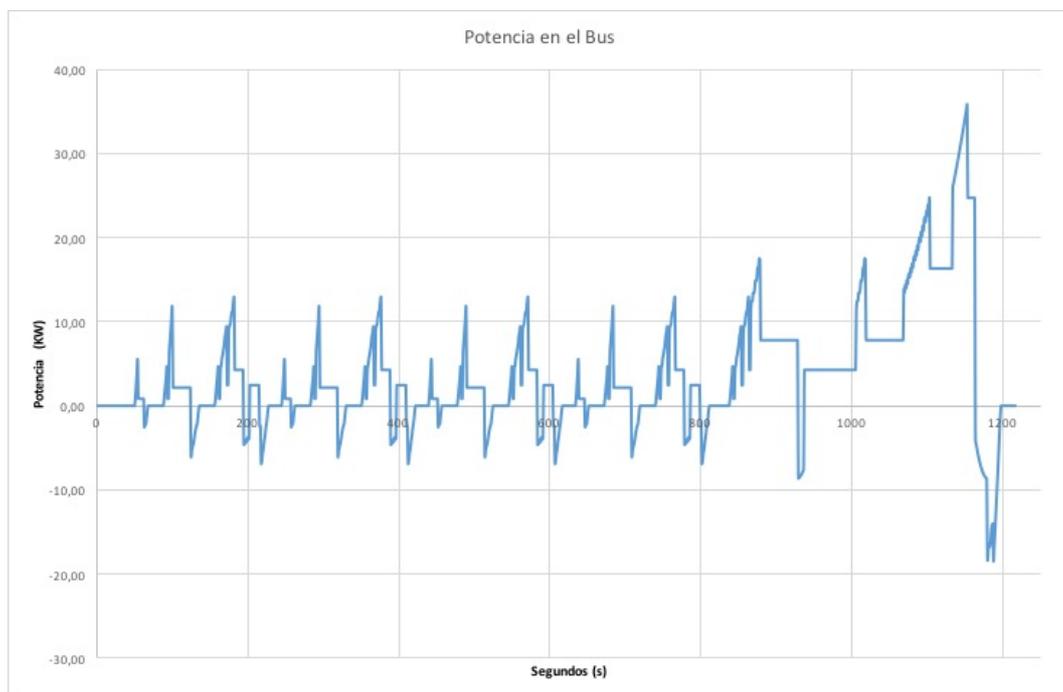


Gráfico 7-5: Potencia requerida en función del tiempo.

En esta ocasión puede verse cómo se trata de un ciclo de conducción menos agresivo que el WLTP, en el que se puede intuir desde este momento un menor aprovechamiento de los capacitores, por ser éste un ciclo mucho más “plano”

A lo largo del ensayo, la gestión de la energía del sistema de almacenamiento hace que éste pase por los distintos modos de almacenamiento acorde a las premisas que se han explicado en el apartado 5.3.

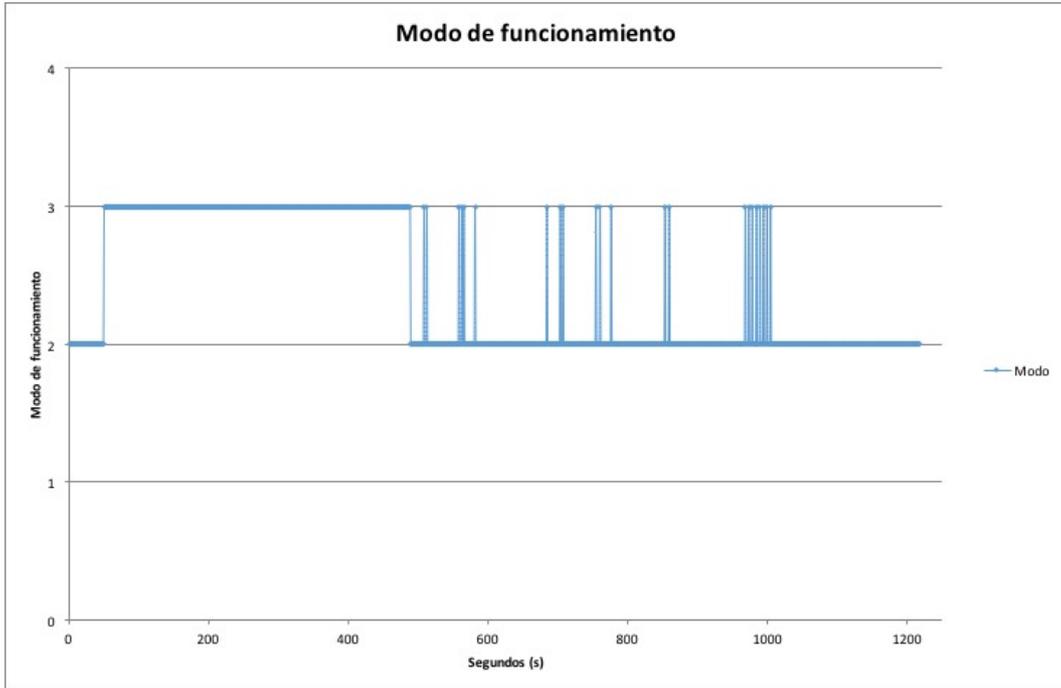


Gráfico 7-6: Modo de funcionamiento del HESS.

En este caso, se puede observar como el sistema de gestión de la energía del HESS, sólo utiliza los modos II y III, los de menos energía, y que en ningún momento se utiliza el modo I, puesto que no hay lugar para ello.

En cuanto al funcionamiento del banco de baterías frente a la unidad de capacitores, se puede observar un comportamiento ciertamente diferente entre uno y otro dispositivo de almacenamiento.

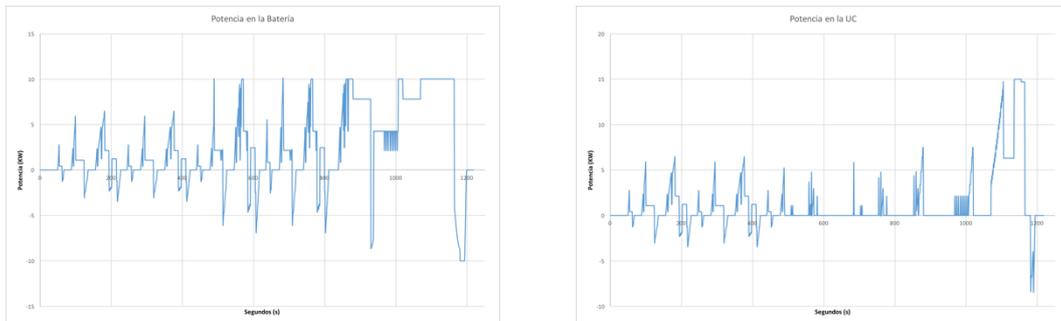
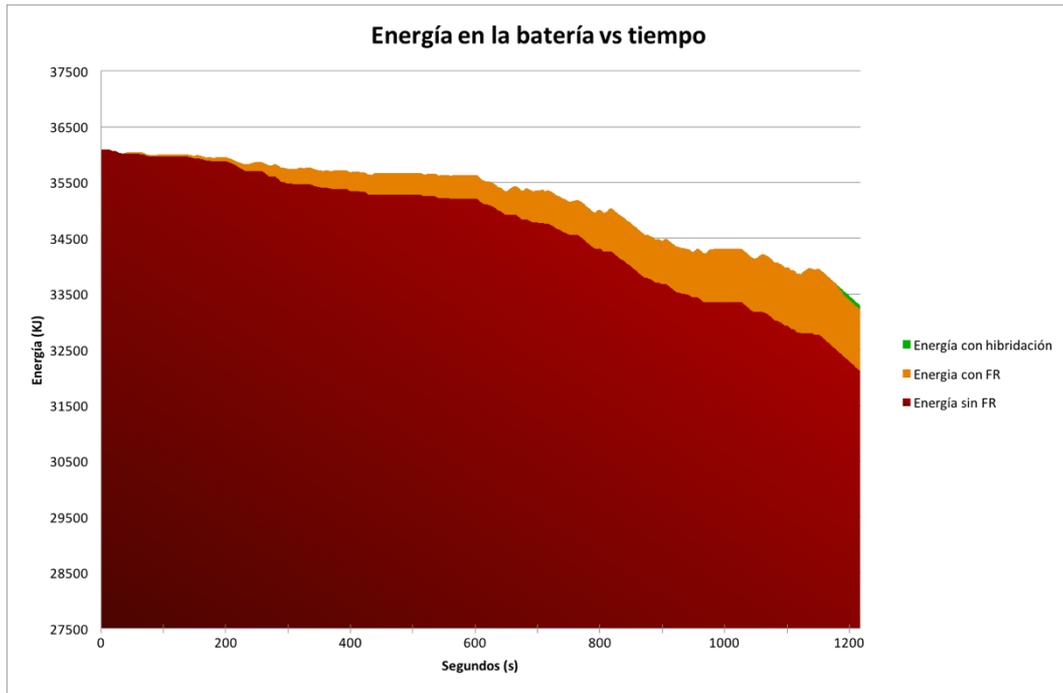


Gráfico 7-7: Distribución de potencias en batería y UC.

La conclusión que se puede sacar de estos dos gráficos en comparación con sus homólogos en el apartado WLTP, es que tanto batería como capacitores están mucho menos solicitados.



En este caso no puede observarse una reducción del consumo de energía significativa entre un sistema de almacenamiento híbrido y uno que no lo sea, pues manteniendo la escala del anterior apartado, apenas puede apreciarse una línea de color verde, correspondiente a la energía consumida por el sistema híbrido. Si que sigue siendo significativa la diferencia entre equipar o no un sistema de frenado regenerativo.

En este ensayo, en el cual se simula el recorrido de 11 kilómetros y 13 metros, se consumen 3012,71 KJ (0,84 kWh) con un vehículo sin frenado regenerativo.

Incluyendo el frenado regenerativo en el vehículo se consumen 2782 KJ (0,77 kWh), lo que supone un ahorro de energía de un 7,64% sobre el vehículo sin recuperación de energía.

Cuando se utiliza un sistema híbrido para el mismo ensayo, se consumen 2710 KJ (0,75 kWh), lo que supone un ahorro de energía de un 2,60% sobre el sistema de almacenamiento basado sólo en baterías.

Ciclo	Peso	Cx	Pot Batt KW	Pot DCDC	E consumida sin FR (kWh)	E consumida sin HESS (kWh)	E consumida con HESS (kWh)	% ahorro con FR	% Ahorro con hibridación
WLTP	1200	0,24	10	15	2,22	1,60	1,52	28,07	4,58
NEDC	1200	0,24	10	15	0,84	0,77	0,75	7,64	2,60
WLTP	1600	0,24	10	15	2,74	1,65	1,47	39,63	10,72
WLTP	1200	0,33	10	15	2,44	1,70	1,63	30,37	4,04
WLTP	1200	0,24	15	15	2,77	2,09	2,07	24,72	0,92
WLTP	1200	0,24	10	20	2,25	1,59	1,52	29,05	4,59

Tabla 7-1: Resumen de los resultados con cambios en diferentes parámetros.

A modo de resumen, se muestra esta tabla con los resultados que se obtienen modificando cada uno de los parámetros por separado. La primera y segunda línea corresponden a los ejemplos que se han desarrollado con mayor extensión. Las celdas sombreadas señalan el valor que se ha modificado con respecto a la primera fila en cada uno de los análisis.

## 8 CONCLUSIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha diseñado una herramienta que permite realizar el estudio y dimensionamiento de un sistema de almacenamiento energético híbrido para vehículo eléctrico. Esta herramienta permite conocer las implicaciones y funcionamiento del sistema de almacenamiento en un vehículo, en base a las características del propio vehículo y al uso que se le vaya a dar. En este trabajo se han utilizado diferentes ciclos de conducción homologados, pero la herramienta es capaz de trabajar con cualquier rutina de desplazamiento, tales como sistemas de transporte público, rutas de flotas, etc, pudiendo servir como base para la adopción de tales sistemas en los casos anteriormente citados.

Queda comprobada la eficacia de dotar al automóvil de un sistema de almacenamiento eléctrico de cara a recuperar energía cinética en el frenado, que en caso contrario se perdería en forma de calor. El siguiente paso en la senda de la eficiencia es la hibridación del sistema de almacenamiento, pues permite un mayor aprovechamiento de la energía que se disipa en la frenada. A diferencia de las baterías convencionales, los sistemas híbridos de almacenamiento eléctrico, permiten aunar las altas capacidades energéticas de las baterías con las altas potencias que los súper capacitores son capaces de proporcionar.

En general, cuanto más pequeño se dimensione la parte de súper capacitores de un sistema de almacenamiento híbrido de un vehículo, mayor será la eficiencia de esta parte. Por el contrario, cuanto más pequeño menos energía total es capaz de absorber. Esto se debe a que tanto la entrega como el consumo de potencia se realizan de una forma “aleatoria” y muy variable. Cuanto más pequeña sea la capacidad del capacitor, más tiempo se está utilizando su capacidad al 100%. Como en tantas facetas de la ingeniería, será trabajo del diseñador llegar a una solución de compromiso en base a unas solicitaciones previas.

El uso de sistemas de almacenamiento híbridos, además, dota al vehículo de una mayor capacidad de aceleración en comparación a los sistemas de almacenamiento convencionales basados en baterías.

Otro beneficio de este tipo de sistemas, es que prolonga en gran medida la vida útil de las baterías, puesto que los capacitores protegen de los efectos dañinos que tienen los picos de sobretensión sobre las baterías.

### 8.2 PRINCIPALES APORTACIONES DEL AUTOR DEL TFM

Una de las principales aportaciones del autor del trabajo es la de recoger y analizar el conocimiento existente sobre el diseño y gestión de sistemas de almacenamiento híbridos, para analizar el estado del arte de la materia en cuestión.

Una vez recogido el conocimiento, éste ha sido aplicado en la creación de una herramienta capaz de ejecutar un sistema de gestión del almacenamiento energético en base a unos datos de entrada, consiguiendo unos resultados sólidos y coherentes con la realidad, teniendo en cuenta las simplificaciones desde las cuales se parte en este trabajo.

Gracias a la creación de esta herramienta de dimensionado, se ha podido comprobar la viabilidad de la instalación de sistemas de almacenamiento en diferentes casos y además, cuantificar la efectividad de una hipotética utilización de este tipo de sistemas de almacenamiento en distintos vehículos.

### **8.3 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS**

En lo concerniente a la herramienta realizada en este trabajo, la primera línea de trabajo lógica a seguir sería la de profundizar en el funcionamiento de ésta. Las premisas de las que se han partido han sido netamente teóricas y sería interesante realizar un modelizado más exhaustivo tanto de baterías como de capacitores y de convertidor de potencia. Aprovechando la estrategia de control planteada, sería posible realizar una simulación completa teniendo en cuenta diversos factores que se han obviado en este trabajo por quedar fuera del alcance planteado inicialmente.

En un escalón más profundo sería interesante hacer estudio de las interacciones entre capacitores y baterías y de cómo los primeros pueden prolongar la vida de las baterías, al absorber los picos de tensión.

En cuanto a las aplicaciones de la herramienta y del conocimiento, se podrían hacer estudios en mayor profundidad que analizar un ciclo de conducción, como por ejemplo, realizar un estudio en profundidad de los itinerarios seguidos por una flota de vehículos destinada a transporte público, o a la logística en general, a fin de optimizar el sistema de almacenamiento para cada uso.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

- C. Baisden and A. Emadi, "ADVISOR-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, no. 1, pp. 199-205, Jan. 2004.
- Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July 2010.
- Khaligh, J. Cao and Y. J. Lee, "A Multiple-Input DC–DC Converter Topology," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 3, pp. 862-868, March 2009."
- F. Ahmadkhanlou and A. Goodarzi, "Hybrid Lithium-ion/Ultracap energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles," 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, 2011, pp. 1-7.
- Juan W. Dixon, Micah Ortúzar and Eduardo Wiechmann. Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter. Department of Electrical Engineering. Catholic University of Chile"
- L. Kumar and S. Jain, "A multiple input dc-dc converter for interfacing of battery/ultracapacitor in EVs/HEVs/FCVs," 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Delhi, 2012, pp. 1-6.
- M. Ortuzar, J. Dixon and J. Moreno, "Design, construction and performance of a buck-boost converter for an ultracapacitor-based auxiliary energy system for electric vehicles," Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, 2003, pp. 2889-2894 Vol.3.
- Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, Bernard Davat, Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle, Journal of Power Sources, Volume 158, Issue 1, 14 July 2006, Pages 806-814, ISSN 0378-7753
- R. Li, A. Pottharst, N. Fröhleke, J. Böcker. Energy Storage Scheme for Rail-guided Shuttle using Ultracapacitor and Battery. Institute for Power Electronics and Electrical Drives University of Paderborn Paderborn, D-33098 Germany
- R. M. Schupbach, J. C. Balda, M. Zolot and B. Kramer, "Design methodology of a combined battery-ultracapacitor energy storage unit for vehicle power management," Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual, 2003, pp. 88-93 vol.1.
- Xiang, C.; Wang, Y.; Hu, S.; Wang, W. A New Topology and Control Strategy for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Energy Storage System. Energies 2014, 7, 2874-2896.
- "Xiang, C.; Wang, Y.; Wang, W. Research on Parameter Matching and Fuzzy Logic Control Strategies of EMT Hybrid Energy Storage System. In Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress Lecture Notes in Electrical Engineering, Beijing, China, 27–30 November 2012."
- Z. Li, O. Onar, A. Khaligh and E. Schaltz, "Design and Control of a Multiple Input DC/DC Converter for Battery/Ultra-capacitor Based Electric Vehicle Power System," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE, Washington, DC, 2009, pp. 591-596.

## **LIBROS DE TEXTO**

- Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. Circuitos Microelectrónicos. Oxford University Press.
- Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku. Fundamentos de Circuitos eléctricos. McGraw Hill, 2006
- Daniel W. Hart. Electrónica de potencia. Pearson Educación. Madrid 2001
- Gianfranco Pistoia. Electric and Hybrid Vehicles. Elsevier B.V. 2010.
- M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. CRC Press, 2010.
- Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC, 2008

## **PROYECTOS UNIVERSITARIOS**

- M. Ortúzar – Diseño y construcción de conversor DC-DC para control de ultracapacitores en vehículo eléctrico. Universidad Católica de Chile

## **REVISTAS ESPECIALIZADAS**

- Francisco J. Alfonso Peña. Cevimap 59 pp 12-15. Marzo 2007