

# Sistemas de almacenamiento energético mecánico en el mundo de la automoción

---

Autor: D. Oscar Martínez Pérez

Tutor: D. Manuel Ignacio González Hernández

Valladolid, Enero de 2014

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica  
Paseo del Cauce s/n  
47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209  
47151 Boecillo (Valladolid)  
España



## Resumen del proyecto

En este proyecto se podrá encontrar una revisión extensa de los sistemas de almacenamiento energético de tipo mecánico y su aplicación en el mundo de la automoción. Se comenzará por una cronología de los mismos en la que se profundizará en las soluciones empleadas en el almacenaje de energía mediante dispositivos mecánicos y la problemática de diseño y funcionamiento debido a las limitaciones técnicas de las diferentes épocas hasta llegar a la actualidad.

Se realiza también un esbozo simple de las consideraciones físicas a tener en cuenta en el estudio y diseño de los mismos, así como una breve definición de los términos de las características específicas asociadas a los sistemas de almacenamiento energético.

También se hace una comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento en el ámbito de las plantas de generación energética para comprender de mejor manera las diferentes características intrínsecas de los diferentes tipos, así como las ventajas de su aplicación en el mundo de la automoción.

Dentro del mundo de la automoción se desarrolla otra comparativa de los diferentes tipos de Sistemas de Recuperación de Energía Cinética (KERS, con sus siglas en inglés) y se desgranara las diferentes ventajas e inconvenientes de los mismos, así como cuando es más indicado su uso.

Ya por último se hace un recordatorio del porqué del renacimiento de esta tecnología y se realiza una panorámica de las diversas empresas y tecnologías que se encuentran desarrollando o implantando estos sistemas, tanto en el mundo de la automoción de competición como en la automoción de consumo. Para concluir se hace una evaluación del primer sistema de almacenamiento energético mecánico implantado en un vehículo de una marca generalista, especificando sus características técnicas, sus sensaciones en la conducción así como la problemática de su fabricación en masa para vehículos de serie.

## ABSTRACT

### Mechanical energy storage systems

In this project, you will find an extensive review of the mechanical energy storage systems and its application in the automotive world. It will begin with a chronology of the same in which will deepen the solutions used in the mechanical storage of energy and the design and operational problems due to the technical limitations of the different eras up to present.

It also takes a simple outline of the physical considerations in the study and the definitions of these considerations, also a brief definition of the terms of the specific characteristics associated with energy storage systems.

A comparison of the different storage systems in the field of power generation plants its done to better understand the different intrinsic characteristics of different types as well as the benefits of its application in the automotive world.

Within the automotive world is developed another comparative of the different types of Kinetic Energy Recovery Systems (KERS) and the different advantages and disadvantages thereof, and when it is most indicated for use.

And finally a reminder why is made the revival of this technology and an overview of the various companies and technologies that are developing or implementing these systems, both in the world of automotive racing and automotive consumer market. To complete an assessment of the first mechanical energy storage system deployed in a vehicle of a generalist brand, specifying their technical characteristics, their feelings on driving and the problems of manufacture for mass production vehicles.

## Agradecimientos

A mi madre, por todo, nunca se lo podre agradecer suficiente. A mi padre, por estar cuando es necesario recordar el camino. A mi hermano por la compañía. Y toda mi familia.

A mi tutor, Manuel, por las prisas y los plazos a los que le he sometido y en los que ha gastado su horas para que yo presente a tiempo

A Francisco, coordinador del máster, por formar y facilitar la inserción laboral en estos tiempos tan difíciles.

A todos los que no están aquí nombrados y que ellos saben quién son, gracias por compartir tantos jueves enfrente de industriales

## Índice:

<b>1. Introducción</b>	
○ <b>Definiciones</b>	
▪ Sistema de almacenamiento energético	1
▪ Energía potencial	1
▪ Energía cinética	1
▪ Eficiencia energética	1
▪ Volante de inercia	1
○ <b>Aplicaciones</b>	2
○ <b>Historia</b>	2
<b>2. Consideraciones Físicas</b>	
○ Energía almacenada	9
○ Densidad de energía	9
○ Densidad de potencia	10
○ Vida útil	10
○ Eficiencia energética	10
<b>3. Clasificación de almacenamientos energéticos mecánicos:</b>	
○ <b>Por sus componentes</b>	
▪ Exclusivamente mecánicos	11
▪ Electro-mecánicos	12
○ <b>Por su velocidad de giro</b>	
▪ Low Speed Flywheels	13
▪ High speed flywheels	15
<b>4. Comparativa de almacenamientos</b>	
○ Sistemas de almacenamiento en las plantas de producción de energía	17
○ Sistemas de almacenamiento en la automoción	25
<b>5. Implementación de los sistemas de almacenamiento energético mecánico en la actualidad</b>	32
<b>6. Conclusiones</b>	
○ Conclusiones	50
○ Líneas futuras de trabajo	50
<b>7. Referencias</b>	51

## 1. Introducción

La creciente preocupación por la protección del medio ambiente, a través de la reducción de la contaminación, crea la necesidad de dispositivos más respetuosos con el medio ambiente. Esto tiene un gran impacto en el sector del transporte por carretera, que en total representa actualmente alrededor del 25% de las emisiones de dióxido de carbono en todo el mundo. Con las legislaciones que están surgiendo más estrictas para las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes, y la conciencia de que los recursos energéticos son finitos, esto da mayor motivación para los fabricantes, diseñadores e investigadores para mejorar y optimizar los sistemas de generación y transmisión energéticos. En la industria de la automoción esto significa el desarrollo y aplicación de nuevos materiales, la optimización de los sistemas de propulsión del motor y la rápida evolución de los vehículos híbridos y eléctricos que podrían introducirse en el futuro cercano sin pérdida significativa de rendimiento del vehículo, e incluso aumentando sus prestaciones. Estas necesidades han dado lugar a la creación de varios nuevos dispositivos, técnicas y configuraciones del sistema de propulsión, o en el caso que se trata en este TFM, modernizando y desarrollando dispositivos que ya existían en el pasado.

### ○ Definición, funciones

#### *Sistema de almacenamiento energético:*

Son dispositivos diseñados para el almacenaje de cierta cantidad de energía en cualquier forma, para liberarla cuando se requiera en la misma forma en que se recolectó o en otra diferente.

Las diferentes formas de almacenaje pueden ser mediante energía potencial ((gravitacional, química, elástica, etc.) o energía cinética.

#### *Energía potencial:*

Es la energía que mide la capacidad que tiene dicho sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición o configuración.

#### *Energía cinética:*

La energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada.

#### *Eficiencia energética*

La eficiencia en las tecnologías de almacenamiento se puede definir como la cantidad de energía almacenada por el sistema por la cantidad de energía recibida. Se expresa como porcentaje del total de energía recibido.

#### *Volante de inercia*

Un volante de inercia es un dispositivo mecánico de rotación que tiene forma de disco o una rueda de radios que gira alrededor de un eje central, que se utiliza para almacenar energía rotacional. Tienen un significativo momento de inercia y por lo tanto se oponen a los cambios en la velocidad de rotación. La cantidad de energía almacenada en un volante de inercia es proporcional al cuadrado de su velocidad de rotación. La energía se transfiere a un volante de

inercia mediante la aplicación de par de torsión a la misma, aumentando de este modo su velocidad de rotación, y por lo tanto su energía almacenada. A la inversa, un volante de inercia pierde parte de su energía almacenada mediante la aplicación de par motor a una carga mecánica, disminuyendo de ese modo su velocidad de rotación.

## ○ Aplicaciones

La aplicación más destacable de los últimos años ha sido para el suministro de energía eléctrica a satélites en la industria aeroespacial. Durante las horas solares se almacena la energía proveniente de las placas fotovoltaicas, de forma similar a las baterías eléctricas pero con menos peso y mayor fiabilidad.

Otro campo es la aplicación a los vehículos urbanos, cuya velocidad es discontinua y la energía cinética se pierde en forma de calor durante las frenadas. El acumulador cinético es capaz de almacenar la energía de la frenada porque su capacidad de absorber potencia, a diferencia de las baterías químicas, es suficiente para absorber la energía en unos segundos y para devolverla en la aceleración. Se aplica tanto a automóviles y a autobuses como a trenes y tranvías.

En los trenes, tanto urbanos como interurbanos, trabajan igual que en los vehículos urbanos y se aplican tanto si el motor es eléctrico como de combustión interna. De forma similar aunque para menos energía se aplica a los tranvías urbanos. En cambio, en los trenes de alta velocidad es distinto, el acumulador debe estar situado en las estaciones porque su masa es muy grande comparada con la masa del tren.

Existen otras aplicaciones, por ejemplo en las redes de suministro de energía eléctrica para evitar los cortes de corriente. Se utilizan como fuente complementaria durante las interrupciones de corta duración, con periodos de tiempo entre 10 y 60 segundos.

## 2. Historia

### *Cronología*

2. La primera aplicación en el mundo de la automoción fue el de los girobuses. Los girobuses son autobuses con motor eléctrico en el que la batería era un pesado volante de inercia. El principio de funcionamiento fue puesto a punto por August Scherl en Berlín ya durante el año 1909 aunque en tal época el auge de los motores de explosión hizo despreciar al nuevo invento.
3. En 1944 ante la carestía de hidrocarburos causada por la Segunda Guerra Mundial la empresa Oerlikon de Suiza fabricó una locomotora de impulsión dual (*Figura 1*): un motor diésel iniciaba la marcha a la vez que transmitía energía al volante inercial, luego el motor diésel (según conviniera) se detenía y el tren era movido por la energía liberada por el volante (en este sentido el sistema recuerda a los motores a cuerda usado en juguetes o en aparatos mecánicos de relojería). El experimento de la locomotora con impulsión dual resultó positivo y de este modo se puso en servicio un girobús en la

localidad de Altford desde el 24 de noviembre al 5 de diciembre de 1950, la experiencia de Altdorf no se prolongó ya que se decidió perfeccionar los dispositivos y hacer mejoras de diseño.



Figura 1. Locomotora impulsión dual de Oerlikon [Fotografía Museo del ferrocarril de Madrid]

4. En 1950 se construye en Suiza el primer prototipo de autobús eléctrico con batería inercial (*Figura 2*)

La batería de este prototipo eran acumuladores de energía, pero no eléctrica de manera intrínseca, sino de energía cinética. Para ello, la batería inercial utiliza un volante de inercia. El volante de inercia de estas baterías primigenias era rueda pesada (aunque las modernos volantes de inercia sacrifican peso por velocidad) que se hacía girar por medio de un motor eléctrico hasta velocidades de miles de revoluciones (3000rev/min) por minuto.

Estos volantes, cuando están bien diseñados y equilibrados, pueden mantenerse en movimiento una vez quitado el impulso inicial durante horas. Como el eje está conectado con el rotor de un generador de corriente, esta corriente se utilizaba para poner en marcha el motor de un vehículo eléctrico. Esta situación se mantenía hasta que el volante se frenaba, dependiendo de la exigencia del generador en un tiempo más o menos dilatado, ya que mover el generador implicaba un efecto de freno electromagnético debido a que interaccionan campos para generar electricidad. Entonces el volante era puesto nuevamente en movimiento mediante estaciones de carga ubicadas a cierta distancia una de la otra en paradas determinadas, obteniendo un vehículo eléctrico con un alcance importante. Al contrario que con las baterías, el volante adquiere su velocidad en poco tiempo, estando listo para seguir su viaje en escasos minutos.



Figura 2. Primeros girobuses para Suiza [Sontoro, 2012]

5. En octubre de 1953 otras poblaciones suizas, Yverdon-les-Bains y Grandson, instalaron las primeras líneas regulares con girobuses de 70 plazas (35 pasajeros sentados y 35 de pie), la velocidad máxima de estos primeros girobuses alcanzaba casi los 60 km/h con una carga de 14 toneladas, tal vehículo recibía la energía inicial a partir de tomas eléctricas ubicadas en postes cada 5 kilómetros, la electricidad pasaba a un alternador dentro del girobús y era transferida mediante embragues como energía mecánica al motor con un gran volante inercial de 3 t que así rotaba a una velocidad de 3000 revoluciones por minuto.
6. Poco tiempo después se instaló otra línea de girobuses (Figura 3) en Leopoldville (actual Kinshasa) cuando existía aún el llamado Congo Belga, usándose girobuses de 10,4 metros de longitud, con 90 plazas de capacidad y 10,9 toneladas de peso total.



Figura 3. Girobus en una estación de recarga en Kinshasa [Copex, 2004]

7. En 1956 la importante ciudad belga de Gante estableció una prolongada línea de girobuses que comunica el sur de la ciudad (Zuid Gent) con las poblaciones satélites de Zwijnaarde y Merelbeke. El motivo del abandono de esta tecnología fue que se consideraron poco rentables por la empresa operadora, declarando que “pasaban más tiempo fuera de las carreteras que en ellas” y que su peso dañaba el pavimento. Otra de las razones fue que el consumo eléctrico, superior al sistema de tranvías que consumían entre 2.0 y 2.4 kWh/km con una capacidad superior de pasajeros. A pesar de la libertad que otorgaba el poder circular por rutas en las que no existiese el cableado eléctrico.
8. En 1980 la cooperativa sueca AB Volvo diseñó y comenzó la fabricación de girobuses duales, cuyo impulso inicial es otorgado por un motor diésel (eventualmente biodiesel).
9. En 1993 se diseña y construye el primer prototipo de vehículo híbrido ligero con batería inercial, suponiendo un avance muy importante en el mundo de la automoción-. Los impulsores de este prototipo fueron los hermanos Rosen.

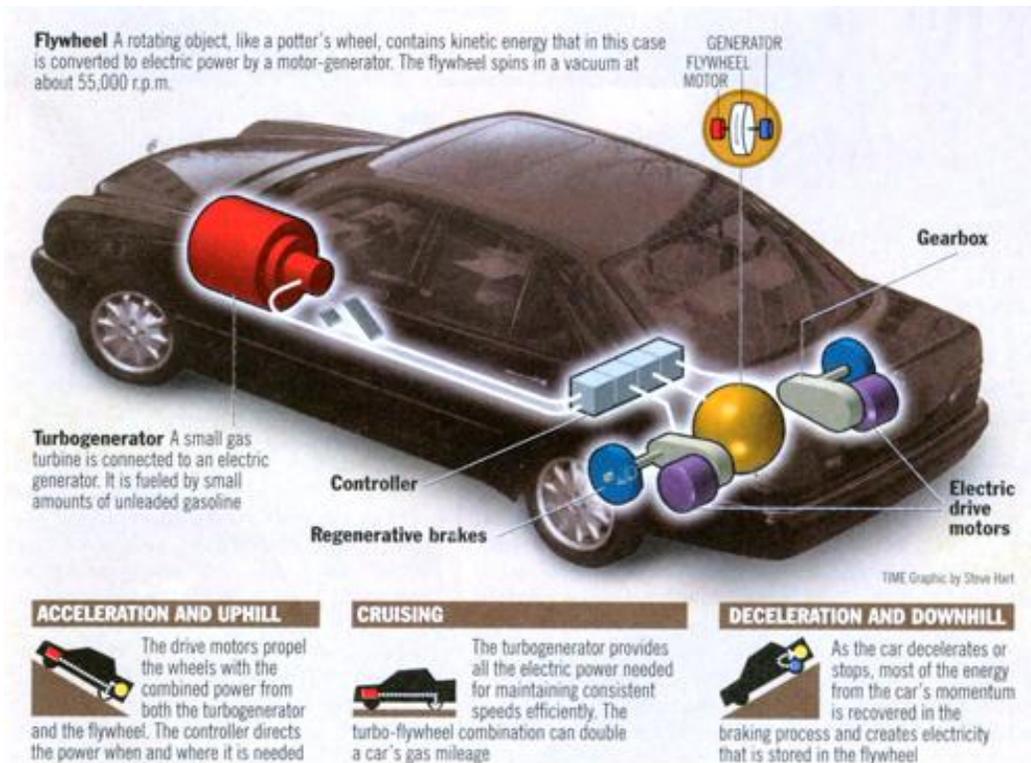


Figura 4. Esquema de funcionamiento del prototipo de los Rosen [Rosen, 2007]

El concepto era sencillo pero muy revolucionario para la época: Tecnología híbrida. Es necesario para revolucionar hacer propuestas totalmente diferentes, y las premisas de los hermanos Rosen lo eran. La electricidad se generaba con un turbogenerador y esta se almacenaba en una batería inercial, según esquema de la figura 4. El resto del vehículo se podría considerar normal hoy en día, un motor eléctrico en cada rueda trasera generaba el movimiento en fases de aceleración y recuperaba energía durante las frenadas. De todos los componentes usados, hay dos que a pesar de sus beneficios, aun no son utilizados de manera habitual: turbogenerador y batería inercial.

### Turbogenerador

Los Rosen, aparte de Rosen Motors, crearon también Capstone Turbine, la empresa que desarrolló el turbogenerador compacto de 30kW. Este se alimentaba con gasolina sin plomo y para lograr una alta eficiencia energética, usaron sólo una parte móvil suspendida con cojinetes de aire que giraba a 96.000 rpm y que se mantenía siempre en ese régimen de máximo rendimiento, reduciendo el consumo de gasolina al mínimo teórico (excluyendo pequeñas pérdidas inferiores al 1%) de la turbina.

### Batería inercial

La innovación más importante fue la batería inercial. En 1993 la eficiencia de las baterías químicas era bastante baja, por ello desarrollaron un volante de inercia que almacenaba energía cinética. Este rotaba a 55.000 rpm y producía la electricidad necesaria con su rotación. Para lograr que la energía no se perdiera con las fricciones, se alojó el volante en una cámara al vacío sosteniéndolo sin contacto mediante levitación magnética, según el esquema de componentes de la figura 5.

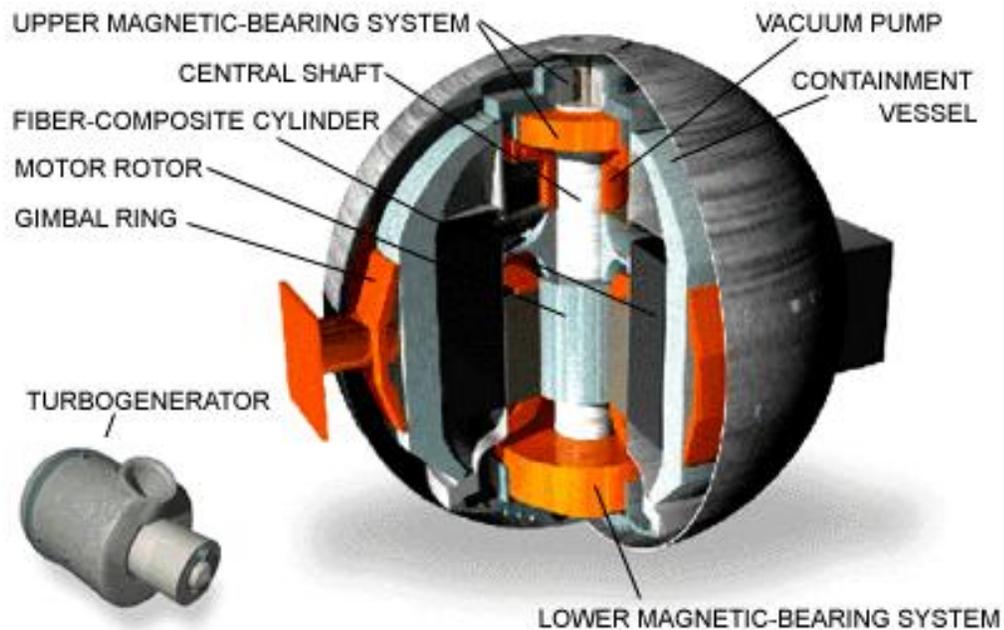


Figura 5 Componentes de la batería inercial [Rosen, 2007]

### Funcionamiento

El sistema era simple. La turbina giraba a velocidad constante para generar la energía necesaria para cargar la batería. Trabajando a velocidad constante se consigue que el consumo de combustible sea lo más bajo posible puesto que cualquier motor gasta más en fase de aceleración, y así se consigue también que trabajase en el régimen de mejor rendimiento. Esta electricidad se volvía a transformar en rotación dentro de la batería inercial, que suministraba la electricidad necesaria para acelerar el coche.

Los hermanos Rosen afirmaban la combinación del turbogenerador y la batería conseguía doblar la autonomía de cualquier coche (de 1993), producía un sonido agradable (a pesar de llevar un pequeño motor de avión en su interior) y aceleraba a de 0 a 100 a un Mercedes-Benz en 6 segundos, más rápido que el motor V8 original.

En 1997 se consiguió hacer rodar un prototipo sobre la base de un Saturn, el sistema funcionó perfectamente durante todas las vueltas y se convirtieron en la primera empresa en demostrar la viabilidad de la combinación turbogenerador-batería inercial para mover un vehículo eléctrico.

A pesar de las grandes ventajas del vehículo desarrollado por los hermanos Rosen, el proyecto fracasó. Esto es debido a que en una industria tan conservadora como la automoción las nuevas ideas son difíciles de implementar. Como explica Ben Rosen en su blog, entre 1996 y 1997 se reunieron con altos ejecutivos e ingenieros de nueve de los mayores constructores mundiales. Aún enseñándoles las ventajas teóricas y los resultados del prototipo fueron incapaces de convencerlos para invertir en su tecnología híbrida. Según él "llegaron demasiado pronto y el sector aún no estaba preparado" [Rosen, 2007], Los Rosen habían invertido en su empresa alrededor de 25 millones de dólares.

Aún así los desarrollos sirvieron para otras aplicaciones. Capstone Turbine cotiza en bolsa y es líder en el sector de las microturbinas mientras que las patentes de la batería inercial son la base sobre las que Pentadyne desarrolló los UPS (almacenes de energía) con baterías inerciales.

En el 2005 el Center for Transportation and the Environment (Centro para la Transportación y el Ambiente) de la Universidad de Texas en Austin ha comenzado el desarrollo de proyectos similares para su fabricación en Estados Unidos.

En el 2007 ciertos prototipos de girobuses poseen volantes inerciales que rotan a 100.000 rpm y se encuentran dentro de un recipiente al vacío en el cual unos cojines magnéticos reducen al máximo la fricción y el desgaste, esto les hace perfectamente prácticos quizás llegando a superar en trayectos de <100 km a los recientes motores a células de hidrógeno o, más aún, a los automotores impulsados convencionalmente por baterías eléctricas. Algunas unidades se basan en el ahorro de combustible en las frenadas, como los de Torotrak, que permiten un ahorro del 20% de combustibles, en sus recorridos urbanos.

### 3. Consideraciones Físicas

En las consideraciones físicas, se describe de manera poco profunda los principios físicos de un volante de inercia, (principal componente de las baterías inerciales) así como las características físicas principales de un sistema de almacenamiento energético, para que sean fácilmente entendibles las comparaciones entre sistemas de almacenamiento en los posteriores apartados.

#### *Energía almacenada en un volante de inercia*

La energía almacenada es la siguiente

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

E=Energía almacenada [Nm o J]

I=momento de inercia que es función de la masa y la distancia al eje de giro [kgm<sup>2</sup>]

w=velocidad angular [rad/s]

Por tanto a mayor masa ubicada a mayor distancia del centro de giro mayor será la energía almacenada. Como la velocidad angular esta al cuadrado, la energía almacenada será mayor cuando aumente el número de revoluciones respecto al peso del volante, debido a que aumentara de manera exponencial respecto a la lineal del peso.

Lógicamente existen limitaciones físicas de los materiales con los que se construyen los volantes. Debido a que los volante pueden llegar a superar la velocidad del sonido en su extremo las fuerzas a las que son sometidos son significativas, y las tensiones de rotura limitan la formula anterior, la velocidad angular máxima se expresara como  $w_f$ , que es la velocidad a la que el material con el cual está construido el volante, rompe. Entonces la formula de la energía almacenada máxima se expresara:

$$E = \frac{1}{2} (I w_f^2)$$

$w_f$  dependerá tanto del material como de la construcción del mismo (en el caso de volantes realizados mediante materiales compuestos influirán la posición de las fibras respecto a sí mismas y respecto al eje de giro)

#### *Densidad de energía*

En física, la densidad de energía representa la cantidad de energía acumulada en un sistema dado o en una región del espacio, por unidad de volumen en un punto.

En las aplicaciones de almacenamiento de energía, la densidad energética hace referencia a la densidad de energía másica o a densidad de la energía volúmica. Cuanto mayor sea la densidad de energía, más energía habrá disponible para acumular o transportar por volumen o por masa dados. Esto tiene incidencia particularmente en el área del transporte (automóvil, avión, cohete...), tanto en la elección del combustible, o tecnología energética como en los aspectos

económicos, teniendo en cuenta el consumo específico y el rendimiento del grupo motopropulsor.

También se puede encontrar la densidad energética como la energía específica de un sistema de almacenamiento energético. En este caso se mide por Wh/kg, que representa los vatios-horas por kilogramo del sistema de almacenamiento. Esto equivale a 3600 julios por kilogramo.

### *Densidad de potencia*

Otro factor importante a tener en cuenta es la densidad de potencia, que es la cantidad de trabajo efectuada por unidad de tiempo y por kilogramo. Se mide en (kilo)watts por kilogramo. Y influye en la rapidez con la que es capaz de almacenar y/o descargar la energía aplicada.

### *Vida útil*

Los ciclos de vida, o simplemente vida útil, es el número de veces que puede cargarse y descargarse un sistema de almacenamiento energético sin sufrir roturas o pérdidas de rendimiento significativas.

### *Eficiencia energética*

La eficiencia energética sirve para medir el grado de pérdida de energía del sistema de almacenamiento y se determina como la energía entregada partida por la energía recibida para el almacenaje, siempre será menor que uno y se expresará como porcentaje.

#### 4. Clasificación de almacenamientos energéticos mecánicos:

Dentro de los almacenamientos energéticos mecánicos podemos encontrar varios tipos de los mismos, que se diferencian básicamente por su construcción (basados en componentes mecánico-eléctricos o solamente mecánicos) o por su funcionamiento, a altas o bajas velocidades, siendo por tanto sus diseños diferentes para optimizar el funcionamiento.

##### a. Por sus componentes

##### 1. Exclusivamente mecánicos

Se encuentran en este tipo de sistema de almacenamiento energético mecánico los KERS (kinetic energy recovery system) en los que no se produce una transformación de la energía mecánica en cualquier otro tipo de energía en ningún momento, el par torsor es almacenado mediante la rotación del volante y es devuelto de la misma forma. Además el acople con el eje de transmisión se realiza también mediante un componente mecánico (aunque gobernado de manera electrohidráulica).

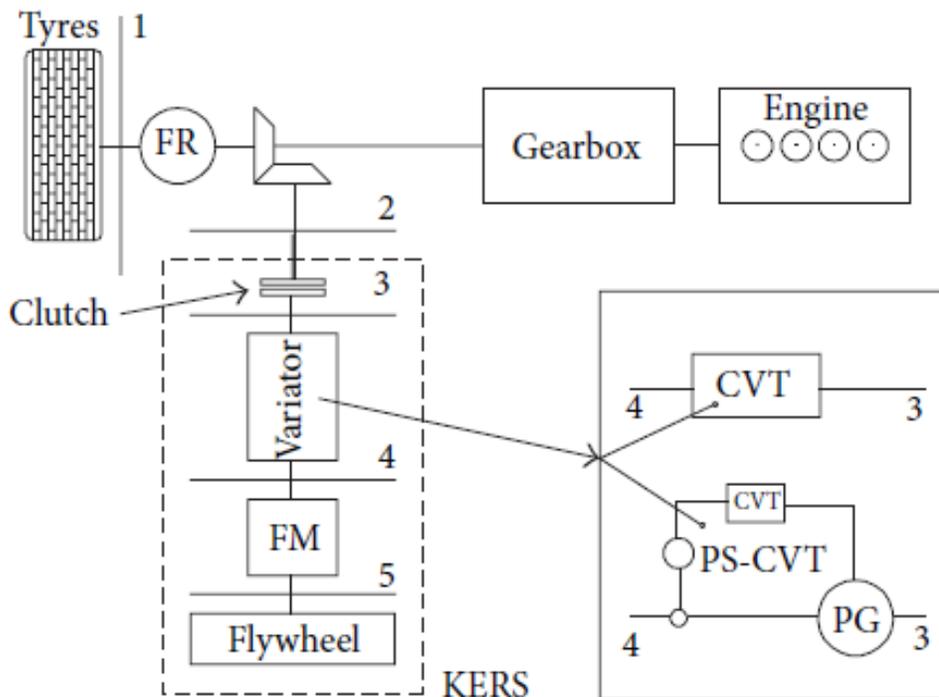


Figura 6. Esquema de funcionamiento de un KERS mecánico [Bottiglione, 2012]

El sistema consta de un volante de inercia conectado por una transmisión continua variable (CVT) para el tren de transmisión (figura 6). La adecuación de la CVT hacia una relación de transmisión óptima permite acelerar el volante hasta almacenar la energía de la manera más eficiente, mientras que si se adecua hacia una relación que reduce la velocidad permite que se libere la energía de nuevo al eje. Un embrague hidráulico separa la unidad si las revoluciones del volante exceden los límites del sistema.

Como breve explicación de la caja de cambios CVT se tiene que los componentes dentro de cada CVT incluyen un disco de entrada y un disco de salida opuesto. Cada disco está formado de manera que el espacio entre los discos crea una cavidad toroidal. Hay dos o tres rodillos dentro de cada cavidad, dependiendo de la capacidad de par que se necesite en la transmisión, que se coloca de modo que el borde exterior de cada rodillo está en contacto con las superficies toroidales de los discos de entrada y de salida. A medida que el disco de entrada rota, la potencia se transfiere a través de los rodillos para el disco de salida, que gira en la dirección opuesta al disco de entrada. Con el ángulo del rodillo determina la relación de la CVT, y se varía para obtener las relaciones óptimas.

También existe un sistema hidráulico de transmisión. El sistema hidráulico no difiere demasiado del mecánico, sólo se utiliza un fluido hidráulico a presión para llevar la energía cinética obtenida después de frenar, en el volante de inercia y luego de nuevo al eje de transmisión del coche.

## 2. Electro-mecánicos

En este caso se produce una transformación de la energía mecánica del eje en energía eléctrica mediante un alternador que se acopla en el frenado, aumentando la velocidad del rotor (el volante de inercia, elemento principal), y reduciéndola para producir la energía extra cuando sea requerida.

### Elementos de un acumulador cinético

En las aplicaciones más clásicas los volantes reciben la energía a través de una transmisión mecánica, como si fueran un subconjunto de la máquina. En estos casos es habitual que tengan un multiplicador para aumentar las revoluciones, o incluso un variador para adaptarse a distintos regímenes.

Cada vez es más frecuente que el volante incorpore un motor-generador eléctrico propio, de forma que configura una máquina aislada, conectada al exterior únicamente por cables eléctricos igual que una batería eléctrica. Su principal ventaja es la versatilidad porque se adapta fácilmente a cualquier necesidad energética mediante una adecuada regulación electrónica. Físicamente está formado por cinco elementos básicos, figura 1.2: (1) el rotor, (2) los cojinetes, (3) el motor-generador, (4) el recipiente de vacío y (5) el sistema de regulación.

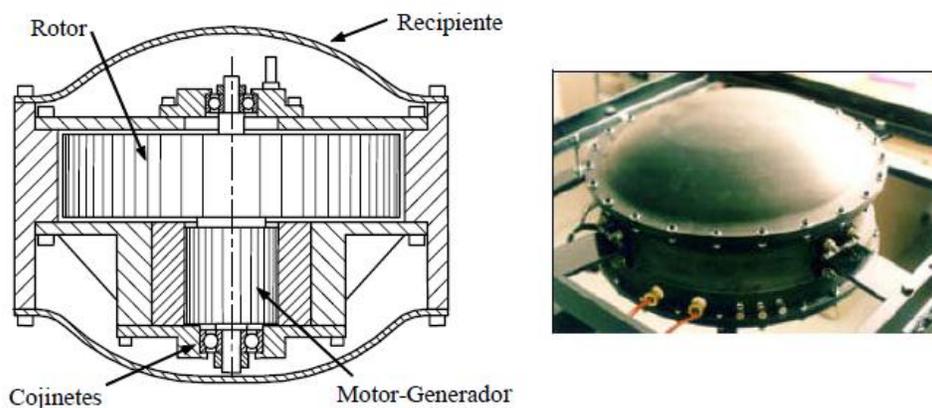


Figura 7. Esquema e imagen de un volante de inercia acoplado a un motor/generador. [Ripoll, 2005]

1. El rotor es el elemento central del acumulador, donde se almacena propiamente la energía. Está formado principalmente por la masa cilíndrica y el eje central.
2. Los cojinetes de giro suelen ser simples rodamientos de alta velocidad. En modelos más sofisticados se montan cojinetes de levitación magnética que eliminan las pérdidas por rozamiento.
3. El motor-generator convierte la energía eléctrica en cinética y viceversa. Gira solidario al rotor y puede estar situado en paralelo con el disco, como se muestra en la figura, o concéntrico a la masa circular. En este último las bobinas estatóricas se sitúan sobre el eje central fijo y las rotóricas en el interior de la masa cilíndrica.
4. El conjunto está encerrado en un recipiente de protección que evita el acceso a los elementos móviles. En algunos casos se efectúa el vacío para eliminar el rozamiento aerodinámico.
5. Además de las partes mecánicas, incorpora un equipo de regulación de la potencia eléctrica que gestiona el flujo de energía con el exterior.

Este tipo de acumuladores, además de ser versátiles, minimizan las pérdidas por fricción y la energía se mantiene durante horas o incluso días. Por contra, tienen pérdidas en la entrada y salida de energía debido al rendimiento eléctrico del motor.

Este tipo de configuración básicamente sustituye al habitual sistema de recuperación energética eléctrica con baterías de los coches eléctricos e híbridos, solo que en este caso dadas las características del volante de inercia puede absorber mucha más energía en menos tiempo respecto las baterías convencionales (excluyendo los supercondensadores/ultracapacitors que absorben la energía en un tiempo también muy reducido, pero con baja densidad energética).

Los sistemas híbridos eléctricos basados en baterías requieren un número de conversiones de energía, cada uno con sus correspondientes pérdidas de eficiencia. En un sistema híbrido eléctrico la eficiencia de conversión de energía global es 31-34 %. El sistema híbrido mecánico de almacenamiento de energía con un volante giratorio elimina las diversas conversiones de energía y proporciona una eficiencia de conversión de energía global superior a 70 %, más de dos veces la eficiencia de un sistema eléctrico.

## b. Por su velocidad de giro

Se puede hacer otra clasificación de los sistemas de almacenamiento energético mecánico por el régimen al que pueden llegar a funcionar, porque aunque similares en cuanto a satisfacer la fórmula de energía acumulada  $E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$  unos se basan en maximizar el primer miembro de la ecuación y otros el segundo

### 1. Low Speed Flywheels

Son tecnológicamente más anticuados que los modernos de alta velocidad y se basan en maximizar tanto el radio como la masa del volante penalizando la velocidad a la que giran.

Están compuestos de volantes de inercia de acero tratado, se montan sobre rodamientos industriales convencionales y su velocidad máxima es inferior a las 10.000 rpm, teniendo una velocidad de servicio habitual de unas 7.000 rpm. Los volantes suelen tener radios importantes y sus masas no están contenidas. Su fabricación no requiere tecnologías ni elementos especiales y es por ello bastante barata, como ejemplo de este tipo de volante se puede observar el de la figura 8.

Por todas sus características, fueron utilizados en el pasado en los mencionados girobuses, con volantes de hasta dos metros de diámetro y tres toneladas de peso y actualmente se utilizan en centrales de producción de energía eléctrica tanto como para absorber los picos de generación así como para el arranque y/o apoyo en situaciones de interrupción de la generación o arranque tras parada programada.



Figura 8. Despiece de un volante de inercia masivo [Kamm, 2008]

## 2. High speed flywheels

Son el futuro, actualizados con las últimas tecnologías y componentes, estos sistemas de almacenamiento energético se basan en girar a muy altas rpm para conseguir así almacenar una gran cantidad de energía en un tamaño y peso reducidos.

Desde que se empezaron a desarrollar de manera definitiva los volantes de inercia como sistemas de almacenamiento energético a principios del siglo 20 se conocía que el sistema sería capaz de almacenar mas energía cuanto más rápido girase el volante. En aquella época, las limitaciones tecnológicas eran importantes, y no se conseguían altas velocidades sin altos rozamientos, y por tanto la energía almacenada era disipada en un tiempo demasiado escaso. Además, a grandes velocidades la integridad estructural de los volantes estaba más que comprometida. Es por ello, que los desarrollos siguieron el camino de mantener unas velocidades moderadas aumentando el peso del volante.

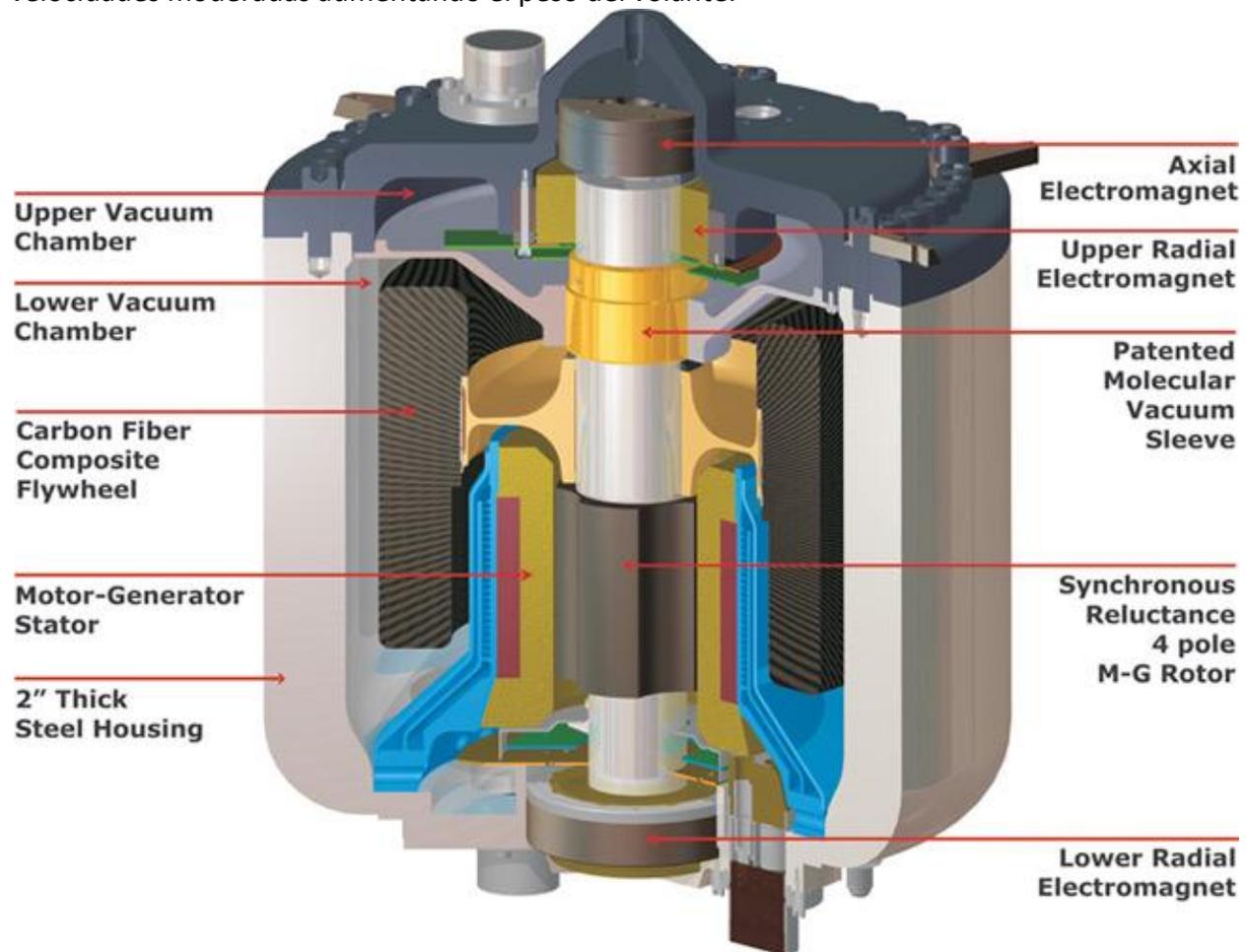


Figura 9. Componentes de un high-speed flywheel [Powerthru, 2013]

El desarrollo tecnológico de la actualidad ha permitido que se consigan sistemas de almacenamiento mecánico que consiguen hasta 60.000rpm. Esto ha sido posible a varios factores (figura 9) :

Carcasas que aseguran el vacío: el principal problema era el rozamiento que se tenía del volante de inercia al contacto con el aire que lo rodeaba, este efecto se ha eliminado en la actualidad

mediante la eliminación de ese aire haciendo el vacío, en algunos casos mediante el uso de dos cámaras diferenciadas, una que sirve como “reserva de vacío” y otra en la que se encuentra el volante, además de utilizar una carcasa de vacío molecular patentado en el eje del volante. La velocidad del eje, en combinación con ranuras helicoidales de la cubierta, mantiene un alto vacío del sistema (<5 millitorr [unidad de presión] o > 99,9993% gases evacuados). Esto además elimina el gasto de energía utilizado en las bombas de vacío mecánicas utilizadas en otros sistemas y sus correspondientes averías. Aunque también en modernos flywheels se encuentran carcasas con pequeñas bombas de vacío.

Cojinetes magnéticos: mediante cojinetes hechos con potentes imanes permanentes se consigue que la masa del volante de inercia se mantenga suspendida sin apoyar mediante campos magnéticos, esto evita que sea necesario usar rodamientos de acero especial para alta velocidad, que aun así tienen un rozamiento elevado comparado con los magnéticos y que además es necesario su sustitución.

Motor-generador de reluctancia síncrono: en el caso de los sistemas de almacenamiento energético mecánico en el que la transmisión de la energía al volante se produce mediante el uso de un motor generador se utiliza un motor-generador de reluctancia síncrono que es más eficiente energéticamente que los motores-generadores de imanes permanentes utilizados en los sistemas de volante convencionales. Los imanes permanentes son sensibles al calor y se vuelven menos capaces de operar a su máxima capacidad con el tiempo. Esto es particularmente peligroso en un ambiente al vacío en el que no se puede evacuar el calor de funcionamiento. El Motor-generador de reluctancia síncrono es un poco más caro que los motores-generadores normales, pero no tiene problemas de desmagnetización, incluso en los extremos de temperatura y vacío. Esto asegura el rendimiento del sistema y que no se degradará con el tiempo.

CVTs : en el caso de los sistemas de almacenamientos energéticos exclusivamente mecánicos el progreso ha venido por el desarrollo de las cajas de transmisión continuas variables (CVT), las cuales permiten utilizar cualquier tipo de relación de transmisión dentro de sus límites entre el eje tractor y el volante de inercia para permitir almacenar toda la energía de la frenada en un periodo de tiempo correspondiente con la aplicación del freno y además acelerar el volante hasta las cotas deseadas para el almacenamiento.

Materiales compuestos: El uso de relativamente nuevos materiales compuestos como la fibra de carbono (o los nuevos métodos de confección de los mismos), permiten aumentar la velocidad del volante de inercia hasta llegar hasta 90.000 RPM, algo imposible si utilizáramos aceros ya que su tensión de rotura es superada a elevadas revoluciones produciéndose una rotura muy peligrosa debida a la velocidad con que saldrían despedidos los pedazos, es por ello, que aunque la fibra de carbono puede soportar estas velocidades, la carcasa con la que es cubierto el volante se construye la suficiente resistencia como para aguantar la rotura catastrófica del volante y evitar problemas de seguridad. Es este el principal avance que ha sido necesario para poder alcanzar altas RPM, porque aunque los otros mencionados son mejoras sustanciales que permiten mayores eficiencias y tiempos de almacenamiento, no son determinantes a la hora de alcanzar altas velocidades.

Por todo ello los High Speed Flywheels consiguen almacenamientos con un alto rendimiento y con un tamaño y peso (menos de 40 kg con todo el sistema necesario para su funcionamiento) contenidos, haciéndolos muy apetecibles para la industria de la automoción actual ya que

gracias a ellos se consiguen reducciones de consumo del 20% aproximadamente y picos temporales de hasta 6 segundos y 80hp sumados a la potencia nominal.

## 5. Comparativa de almacenamientos

### Sistemas de almacenamiento en las plantas de producción de energía

Para poder hacer una comparación de los diferentes tipos de KERS dentro del mundo de la automoción, previamente se realizara una comparativa de los diferentes sistemas de almacenamiento en las plantas de producción de energía para así poder hacernos una idea de las ventajas e inconvenientes de los sistemas mecánicos frente a otros sistemas.

Últimamente se están desarrollando e implementado sistemas de almacenamiento energético en las centrales de producción de energía, básicamente por tres motivos:

- a. Almacenamiento de energía sobrante cuando no es necesaria.
- b. Absorción de picos de producción
- c. Sistemas de seguridad y emergencia para cuando se produzcan averías, reparaciones o mantenimientos.

Habitualmente, en las centrales hidroeléctricas se bombea el fluido de nuevo aguas arriba, convirtiendo energía eléctrica de nuevo en potencial, que es almacenable en grandes cantidades, pero en la actualidad se están desarrollando otros métodos para que sean aplicables a todo tipo de plantas de generación, estos son:

- Baterías: los mas extendidos
- Sistemas mecanicos, la que aplica a este proyecto
- SMES Superconducting magnetic energy storage, almacenamiento mediante campo magnético
- Supercondensadores (ultracapacitors)
- CAES: Compressed air energy storage, almacenamiento mediante la compresión y posterior descompresión de aire

Sistema	Estado de desarrollo
Baterías	Comerciales Plomo-ácido. Nuevos desarrollos (NaS, Li, en desarrollo...)
Flywheel	Hay sistemas comerciales. Necesaria I+D
SMES	Sistemas en He líquido. Necesaria I + D
Super-C	Comerciales. + Desarrollos y prototipos
CAES	Existe la tecnología. Problema: espacio y recursos económicos

Tabla 1. Estado de desarrollo de las diferentes tecnologías de almacenamiento [UPCT, 2008]

### Sistemas con baterías

El problema de las baterías es su coste, su volumen su ciclo de trabajo y su vida útil (Tabla 2)

- Capacidad de almacenamiento 10-60 minutos

- Utilidades:
  - Reducción y limitación de picos de demanda
  - Mejora de la calidad y fiabilidad del suministro

Características	Plomo	Niquel-metal hidruro	Polimeros de litio	Sulfuro de sodio	Sales de sodio
Energía específica kWh/cu.ft	2	5	6	7	5
Potencia específica kWh/cu.ft	3	6	11	15	15
Eficiencia % en 24 horas	92	92	88	88	87
Ciclo de vida	400	800	600	1000	800
Coste por kWh	125\$	375\$	550\$	350\$	300\$

Tabla 2. Comparativa de las diferentes características de los tipo de baterías químicas [UPCT, 2008]

### Sistemas mecánicos:

- Acoplan a un motor generador un volante de inercia (no son completamente mecánicos)
- Podrían resolver mas del 90% de las perturbaciones
- Se dividen en los tipos descritos con anterioridad, en baja velocidad o tradicionales y de alta velocidad o actuales.
- Tradicional (figura 10):
  - Construidos con acero y una velocidad máxima inferior a 10.000rpm
  - Fabricantes: Pillar, Canterpillar, Active Power

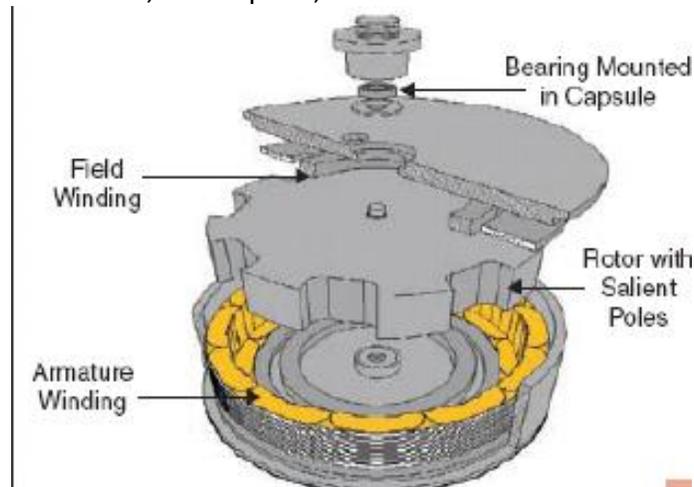


Figura 10. Esquema de componentes de un volante acoplado a un motor generador [UPCT, 2008]

- Actuales:
  - Fabricados en fibra de carbono, giran entre 40.000 y 60.000 vueltas
  - Productos comerciales: Urenco, Beacon Power
  - En desarrollo: Boeing, AFS
- Ventajas: menos mantenimiento, larga vida, alta densidad de potencia, mayor eficiencia que una batería.
- Usadas en los metros de Londres, Paris, Tokio...



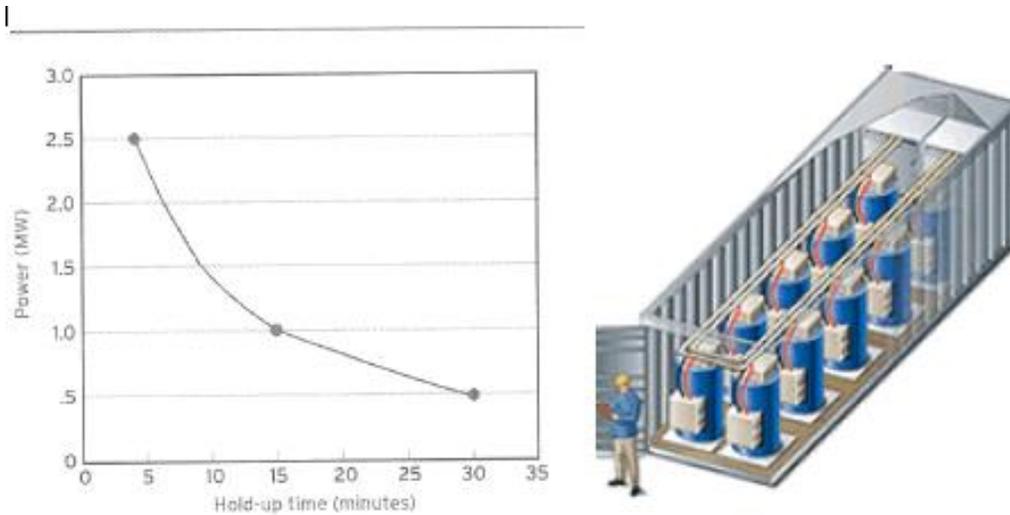


Figura 13. Gráfica potencia/tiempo de uso y la distribución de un contenedor de unidades. [UPCT, 2008]

### Sistemas de almacenamiento SMES

Se produce el almacenamiento mediante campo magnético (figura 14)

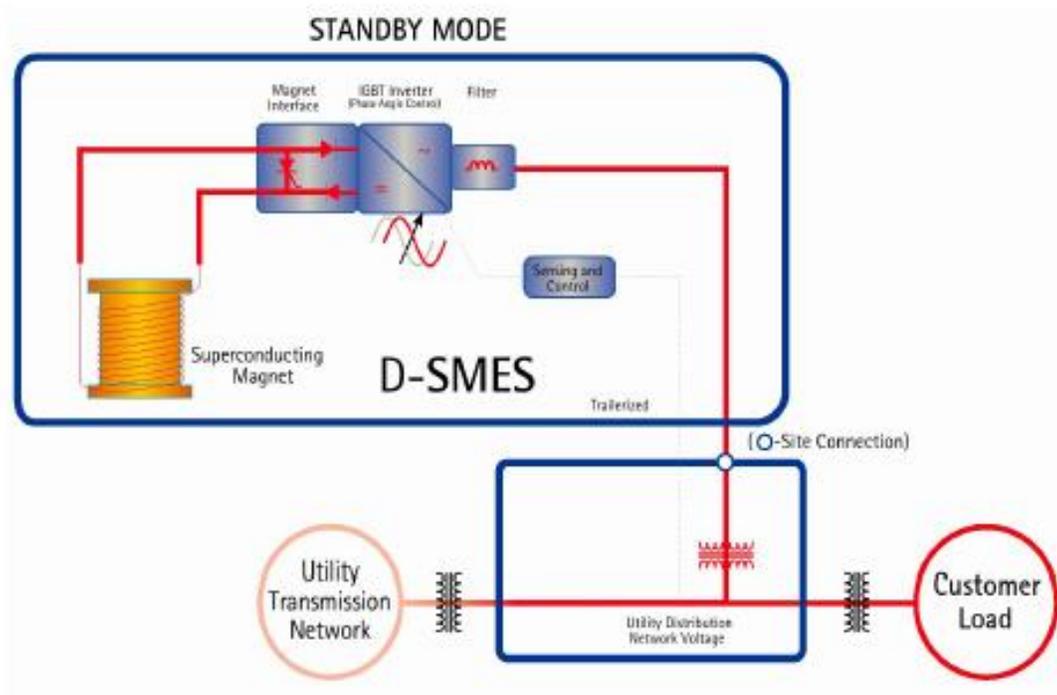


Figura 14. Esquema de instalación del sistema SMES [UPCT, 2008]

- Fabricantes Accel, GE, D-SMES, 3MJ
- Ejemplo: Planta desarrollada por ACCEL (figura 15) en Dortmund
- Energía 2,1 MJ
- Potencia media 200kW durante 8s

- Potencia máxima 800kW
- Tamaño 760x600mm



Figura 15 Unidad operativa SMES de ACCEL [UPCT, 2008]

## Supercondensadores

Utilidad:

- Apoyo en pequeñas interrupciones de servicio a las baterías, alargando la vida útil de los UPS
- Frenado regenerativo en ferrocarriles
- Ejemplo: fabricante Maxwell
- 2700F
- 10 años de vida o 500.000ciclos
- 2,5v
- 0,001 ohmio de R interna
- 8400 J de acumulación

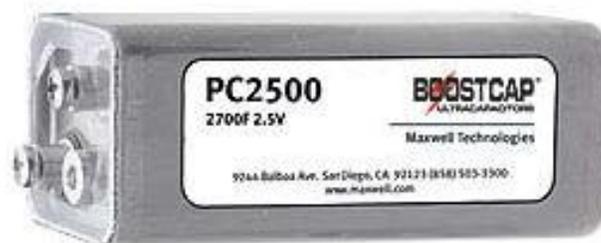


Figura 16. Supercondensador comercial de Maxwell [UPCT, 2008]

## Sistema de almacenamiento CAES

- Almacenamiento de aire comprimido en acuíferos/minas abandonadas: el problema es la dificultad de encontrar estos sitios.
- Ejemplo: Alabama
- Situado en una mina de sal abandonada
- 110MW
- Suministro de electricidad a 11000 viviendas durante 26 horas
- Presión se aumenta de 50 a 75 bar
- Coste de 65 M\$ con un coste por kW de 591 [\$/kW]
- En 14 minutos esta lista para generar

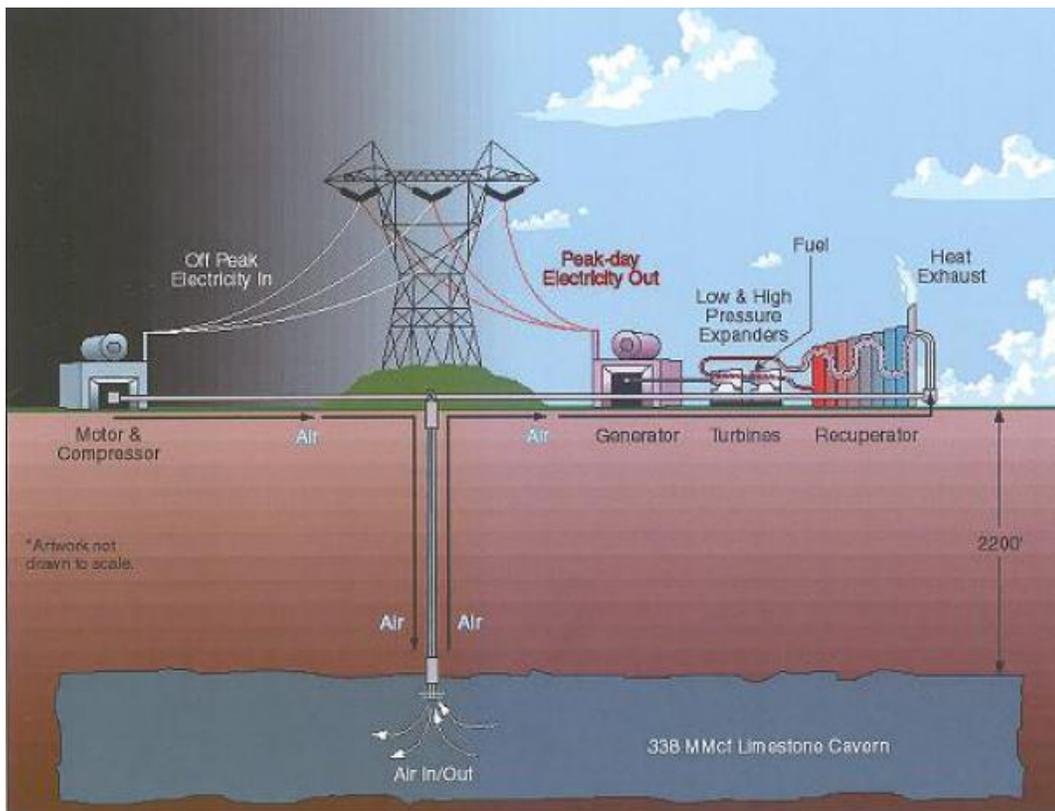


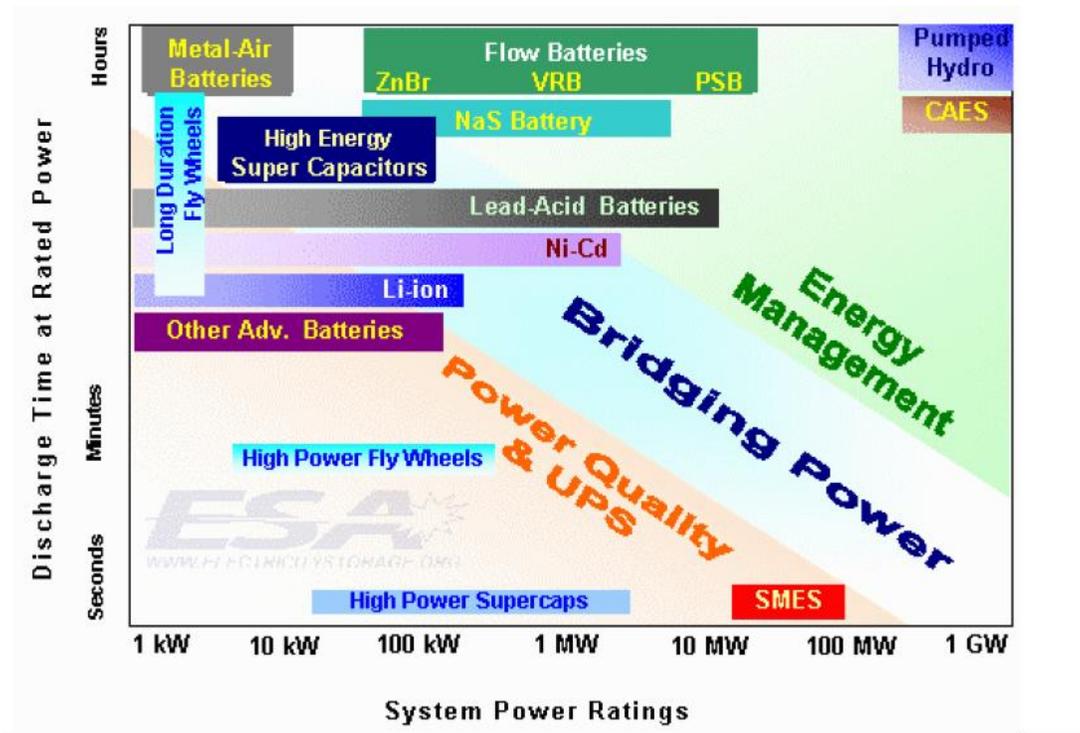
Figura 17. Esquema de instalación de un sistema CAES [UPCT, 2008]

Después de la presentación de los diferentes tipos de almacenamiento actuales tenemos como resumen:

Tipo de sistema de almacenamiento eléctrico	Año de primer uso comercial	Densidad energética Wh/ft <sup>3</sup>	Densidad de potencia kW/ft <sup>3</sup>	Eficiencia eléctrica % en 24 h	Tamaño kWh	Ciclo de vida	Nivelación anual \$/kWhr
Plomo	1985	2	3	92	0,5	8	\$25
Niquel-Metal hidruro	2000	5	200	92	1	8	\$80
Polimeros de litio	2005	6	6	88	5	7	\$120
Sulfuro de sodio	2008	7	25	88	5	7	\$85
SMES	1995	0,2	15	87	500	30	\$200
Supercondensadores de carbono	2002	1,5	5000	94	1	30	\$85
Volantes low-speed	1999	8	20	90	10	30	\$40
Volantes high-speed	2003	12	50	89	4	30	\$80
STES	1990	5	0,5	82	5000	30	\$15

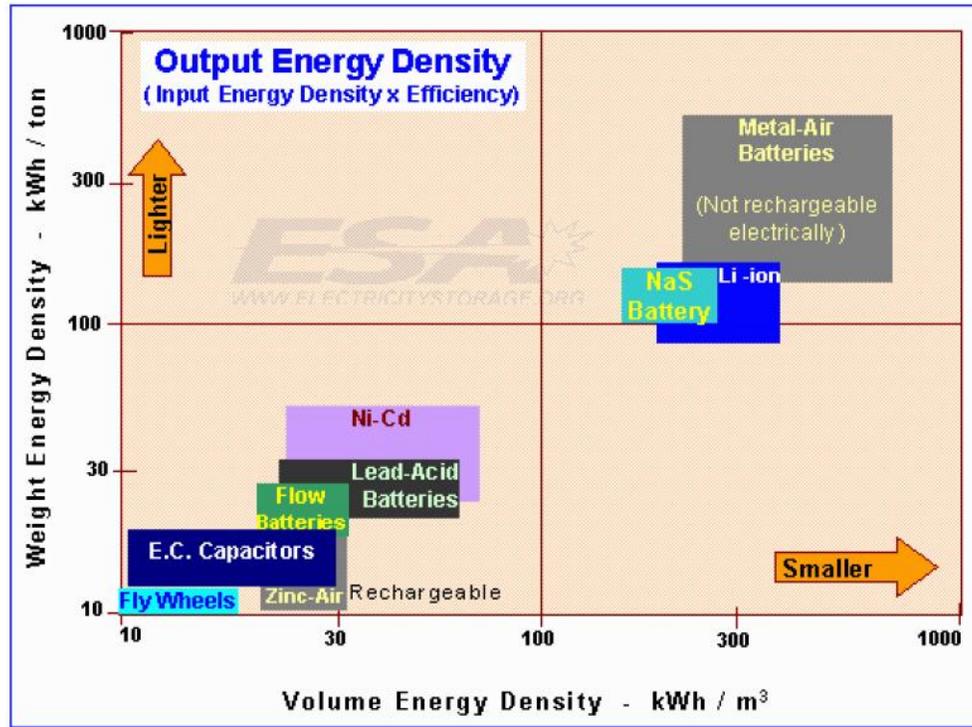
Tabla 3. Resumen de características de los tipos de almacenamiento [UPCT, 2008]

Utilidad de cada uno de los sistemas, gráfica potencia-tiempo



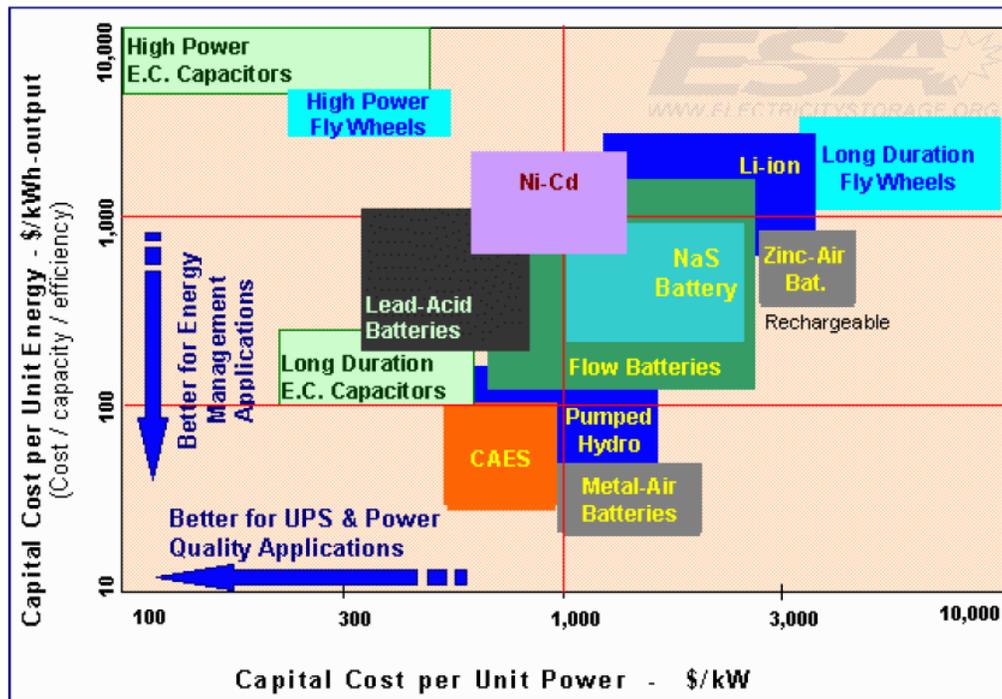
Gráfica 1. Potencia/tiempo [UPCT, 2008]

Utilidad de cada uno de los sistemas, gráfica peso-densidad de energía / densidad energética volúmica



Gráfica 2. Gráfica peso-densidad de energía / densidad energética volúmica [UPCT, 2008]

Gráfica de coste de cada uno de los sistemas



Gráfica 3. Coste por kW [UPCT, 2008]

Como conclusiones de las diferentes gráficas, podemos extraer, que los sistemas de almacenamiento energético de tipo mecánico, sin diferenciar entre los tres tipos representados (High power flywheel, Long duration Flywheel y flywheel:

- Tienen una vida útil muy elevada, con varias décadas de uso continuado.
- Su ratio de descarga es bastante bueno, con potencias de hasta 400kW
- Las de alto rendimiento son de precio elevado.
- Tienen una eficiencia elevada, aunque es necesario que ocupen gran tamaño.
- Su densidad de potencia es muy buena

Por tanto para este tipo de uso como acumulador energético en plantas de producción su uso es indicado para cuando se necesiten altas densidades de potencia durante un periodo de tiempo reducido, para absorber irregularidades de la red, además de ser útiles en plantas que no se disponga de manteniendo constante, ya que estos sistemas apenas lo necesitan.

Todas estas características que se pueden observar en sistemas de almacenamiento en plantas de producción de energía desde hace ya algunos años, si estudian detenidamente son perfectas y se pueden extrapolar para el mundo de la automoción. Esto es debido a que el mundo de automoción, al contrario que las plantas de producción de energía, los vehículos están en constante encendido y apagado, y trabajan tanto acelerando como frenando en la mayoría de su vida activa, que son los momentos que más se adecuan para el uso de los sistemas de almacenamiento. Con unas modificaciones adaptativas y una reducción del tamaño es perfectamente aplicable en el mundo de la automoción, como se observa a continuación.

## Sistemas de almacenamiento en la automoción

COMPARATIVA de diferentes tipos de “Kinetic Energy Recovery System” (KERS)

### Frenado regenerativo:

Un freno regenerativo es un mecanismo que reduce la velocidad del vehículo mediante la conversión de parte de su energía cinética (cuanto mayor sea este porcentaje, mejor será su eficiencia) en algún otro tipo de forma útil de energía - corriente eléctrica, aire comprimido, mecánica...

La energía capturada se almacena a continuación para su uso futuro. En vehículos a batería y los vehículos eléctricos híbridos, la energía se almacena en una batería o un conjunto de condensadores para su uso posterior. Otras formas de almacenamiento de energía que se pueden usar, incluyen aire comprimido y volantes de inercia.

El frenado regenerativo (en sistemas eléctricos) utiliza el principio eléctrico del motor actuando como un generador de energía. Se vuelve a utilizar la energía cinética usando su motor eléctrico para regenerar electricidad. El frenado regenerativo no disipa la energía eléctrica en forma de calor y por lo tanto es más eficiente energéticamente que el frenado dinámico.

### EL KERS

Un tipo específico de frenado regenerativo se llama KERS. El KERS es un sistema usado en automoción para la recuperación de la energía cinética en la frenada de un vehículo en movimiento. La energía recuperada es almacenada en un “depósito” (por ejemplo un volante de inercia o de una batería o condensador de alto rendimiento) para su uso posterior en aceleración. Los sistemas eléctricos utilizan un motor-generador incorporado en la transmisión

del coche, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Una vez que la energía ha sido convertida, se almacena en una batería y se libera cuando es requerida.

### **Tipos de dispositivos de almacenamiento**

Hay diferentes tipos de dispositivos y formas en las que las pérdidas de energía cinética durante el frenado se pueden almacenar, es necesario conocerlos para poder tener una visión más objetiva en la comparativa.

Son:

- 1 ) KERS mecánico
- 2 ) Eléctrico KERS
- 3 ) KERS hidráulico
- 4 ) Hidroeléctrica KERS ( HESS )

Descripción de los sistemas

#### 1. Sistema de almacenamiento mecánico.

El KERS mecánico utiliza una masa en rotación (o volante de inercia) como dispositivo de almacenamiento de energía y una caja de transmisión variable para controlar y transferir la energía desde y hacia la transmisión. La transferencia de energía cinética del vehículo a la energía cinética del volante puede ser vista como un cambio de momento. La energía se extrae del vehículo y suministrado al volante de inercia. Al hacer esto, la velocidad del vehículo se reduce, (efectivamente este está frenando), mientras que la velocidad del volante aumenta. Al inicio de frenado el vehículo tiene una alta velocidad y el volante de inercia baja velocidad, aplicando una cierta relación de transmisión entre ellos, al final del frenado el vehículo tiene una velocidad baja, y el volante una velocidad alta, debido a que la relación de velocidades ha cambiado. El examen de la transferencia de energía muestra que la relación entre la velocidad del vehículo y la velocidad del volante necesariamente cambia de forma continua durante el evento de transferencia de energía.

Los sistemas mecánicos basados volante no son nuevos –ha habido sistemas que han sido previamente desarrollados, incluyendo el diseñado por la Universidad de Eindhoven y Leyland Trucks entre otros y de hecho es posible montar en un tranvía potenciado con volante de inercia desde la estación de Stourbridge en Inglaterra, a parte de los ya mencionados en la cronología.

#### 2. Sistema de almacenamiento eléctrico

Los sistemas híbridos eléctricos utilizan baterías químicas como el medio de almacenamiento y el motor eléctrico/generador como el transformador de la energía y medio de control . Los componentes del KERS para los sistemas de almacenamiento eléctrico son los siguientes: Motor/ generador de propulsión eléctrica, electrónica de potencia -Inversor, y la batería .La propulsión eléctrica motor/generador es también conocidos como MGU - Unidad Generadora del motor. Los condensadores son elementos fundamentales de circuitos eléctricos que almacenan la energía eléctrica en el orden de microfaradios y ayudan en el filtrado siendo la función principal de un condensador la de cargar o descargar la electricidad de manera rápida. Los supercondensadores tienen características especiales, tales como una larga vida útil , carga

rápida , resistencia interna baja , alta densidad de potencia , y un método de carga más simple en comparación con los condensadores y baterías.

### 3. Sistema de almacenamiento hidráulico

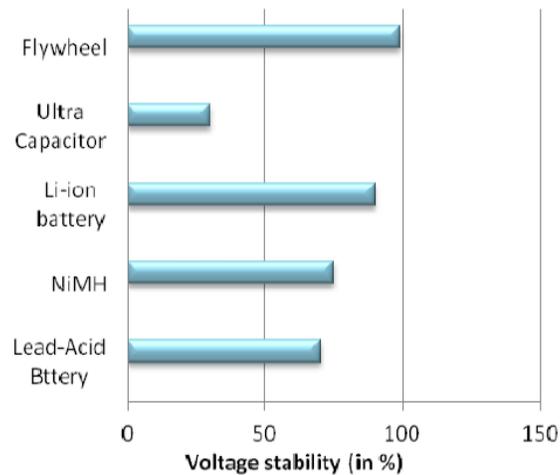
El frenado regenerativo en los vehículos que utilizan una bomba/motor hidráulico de desplazamiento variable junto con un acumulador hidroneumático ha atraído considerable interés durante los últimos 20-25 años. Tal sistema es especialmente adecuado para su aplicación en los autobuses urbanos. A pesar de los avances significativos en el uso eficiente de la energía que puede ser provocada por la regeneración hidroneumática en el frenado, su uso no ha alcanzado gran popularidad. El coste añadido, que puede representar el 10-15% de la total para el vehículo, es sin duda un elemento de disuasión.

### 4. Sistema de almacenamiento hidroeléctrico.

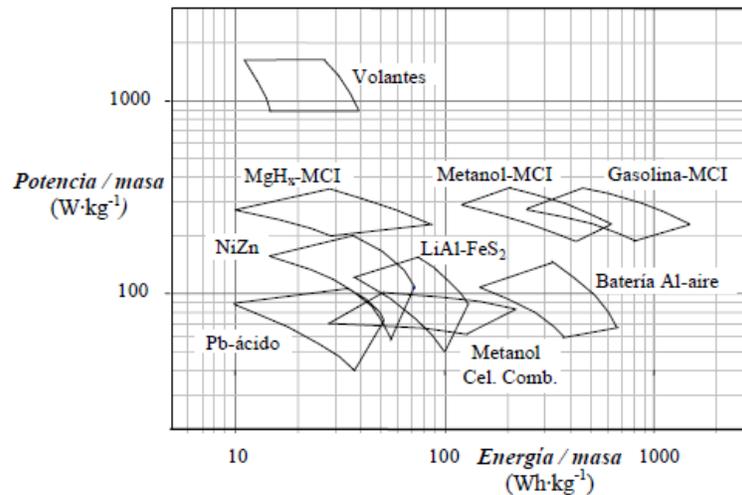
Los acumuladores hidráulicos tienen las características de mayor densidad de potencia y es muy adecuado para la aceleración y la desaceleración frecuente en las condiciones de tráfico de la ciudad. Puede proporcionar alta potencia para aceleraciones y puede recuperar de manera más eficaz la energía durante el frenado regenerativo en comparación con sus contrapartidas eléctricas. Sin embargo, la relativamente baja densidad de energía limita el sistema por el aumento de tamaño de acumulador. Por ejemplo , Uzunoglu, Rodatz y Thounthong desarrollaron el sistema híbrido de energía como la batería/ UC (Ultracapacitors, término inglés de supercondensadores), pila de combustible/ UC , etc Estos estudios se centraron en los sistemas híbridos de energía en formas eléctricas; y las publicaciones dedicadas al sistema hidráulico / eléctrico son relativamente escasas, pero esperanzadoras en cuanto a posibilidades de desarrollo, pero aún no han sido investigadas en profundidad. Ricardo (empresa de desarrollo del mundo de la automoción) propuso un sistema de freno regenerativo/disipativo combinado para un autobús urbano. El componente regenerativo consiste en una bomba/motor hidráulico de caudal fijo y un acumulador hidroneumático. La mejora vino por parte de Bozic, que introduce una sinergia hidroeléctrica en la transmisión híbrida utilizando la tecnología de pistón libre de los motores.

### **Análisis comparativo**

Siempre hay margen de mejora, especialmente en términos de tecnología. El análisis fue realizado por Radhika Kapoor para el congreso mundial de ingeniería de Londres de 2013 [Radhika, 2013], y se realizó sobre la base de los diferentes tipos de sistema de almacenamiento actualmente en uso. Es también una visión general de las posibles alternativas al uso general de dispositivos de almacenamiento. También destaca el inconveniente de los diferentes tipos KERS. Por ejemplo, la inestabilidad en el voltaje puede provocar un desgaste rápido y deterioro del dispositivo de almacenamiento de energía. Las gráficas 4 y 5 siguientes muestran que en comparación con otros sistemas de almacenamiento, los volantes ofrecen máxima tensión constante y el máximo nivel de potencia; que es independiente de la carga, la temperatura y el estado de carga.

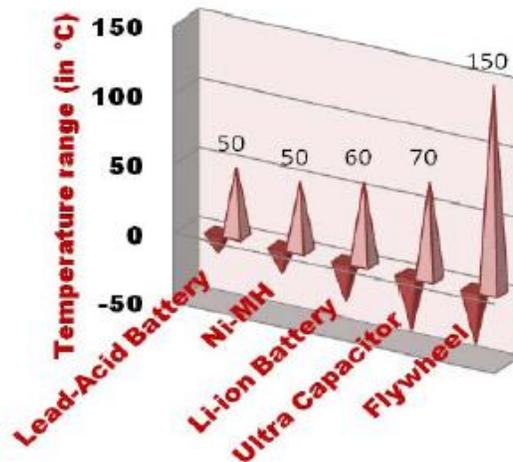


Gráfica 4. Estabilidad de voltaje [Radhika, 2013]



Gráfica 5. Potencia/masa en ordenadas contra Energía/masa en abscisas [Ripoll, 2005]

Siendo segundo la batería de iones de litio (Li-ion), seguido de Hidruro de metal níquel NiMH, Las baterías de plomo-ácido. Supercapacitors /ultracondensadores son los más bajos en cuanto a estabilidad con un 30%. La razón es que los supercondensadores tienen propiedades de autodescarga. Investigaciones recientes sugieren que esta cuestión podría ser superada. La carga y descarga de electrones causa variación de temperaturas en los dispositivos de almacenamiento. Existen limitaciones para el rango de temperatura que los sistemas de almacenamiento pueden soportar. La gráfica 6 muestra la amplia gama de temperaturas de funcionamiento de estas tecnologías de almacenamiento.



Gráfica 6. Temperatura de funcionamiento correcto de los diferentes sistemas de almacenamiento [Radhika, 2013]

Los volantes soportan de nuevo el mayor rango de temperaturas, rango que va desde  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , en comparación con las baterías de plomo-ácido que tienen la menor rango de ( $-15^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ ). Los supercondensadores son el segundo mejor sistema al soportar una amplia gama de temperatura con un mínimo (similar a la de un volante de inercia) de  $-40^{\circ}\text{C}$  y máximo de  $70^{\circ}\text{C}$  en este aspecto podría llegar a reemplazar en cuanto a temperaturas de uso al volante de inercia. Aunque esta característica no es muy determinante ya que las temperaturas alcanzadas en automoción no son tan extremas, pero en según qué sistema podría ser importante por autocalentamiento del sistema.

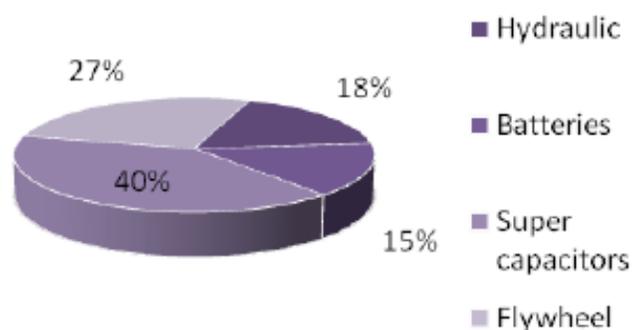
Una de las características más importantes para esta comparación es la eficiencia. La gráfica 7 muestra que los supercondensadores tienen la máxima eficacia junto con los dispositivos de almacenamiento hidráulicos, que no están demasiado lejos de ellos, y es seguido de cerca en la actualidad por el uso KERS mecánico (es decir, volante de inercia). Las baterías tienen la menor eficiencia debido a que su velocidad de descarga es más rápido en comparación con la velocidad a la que se carga. A pesar de que los supercondensadores tienen una alta eficiencia, no se pueden utilizar en Kers todavía porque a velocidad constante, no pueden capturar la energía cinética perdida durante el frenado.



Gráfica 7. Eficiencia de los sistemas energéticos [Radhika, 2013]

La reducción del consumo de combustible es el aspecto principal buscado en los automóviles. Esto es para conservar y proteger los recursos no renovables y los recursos naturales y por supuesto la economía personal de los usuarios de vehículos. Se tiene (gráfica 8 de porcentaje sobre el consumo reducido por cada uno) que el 40 % de reducción del consumo del combustible tiene lugar si se prioriza los supercondensadores como dispositivo de almacenamiento. Siendo segundo los volantes con 27 % seguido por el sistema de energía hidráulica y las baterías con la reducción de consumo de combustible 15 % y 18 % , respectivamente .

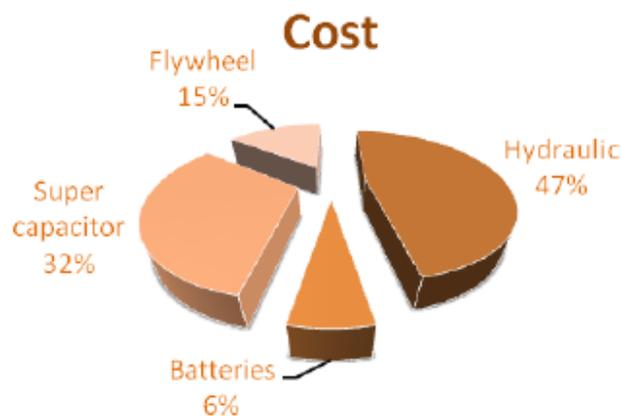
## FUEL CONSUMPTION



Gráfica 8. Reducción del consume de combustible según sistema [Radhika, 2013]

Las baterías contribuyen menos porque tienen una vida corta y menos capacidad de conversión en comparación con otros medios de almacenamiento, además son dispositivos con bajo rango de temperaturas de funcionamiento.

La gráfica 9 muestra que el sistema de volante de inercia es el más barato después de las baterías con un 15% y un 6 %. Sin embargo, los volantes que se utilizan en la actualidad, son los más baratos debido a la eficiencia que dan en este bajo costo. En las baterías no se pueden almacenar suficiente energía y por lo tanto, se cargan y descargan rápidamente. Los Sistemas Hidráulicos son los más caros de todos ellos seguido de los supercondensadores con un 47 % y un 32 % respectivamente .



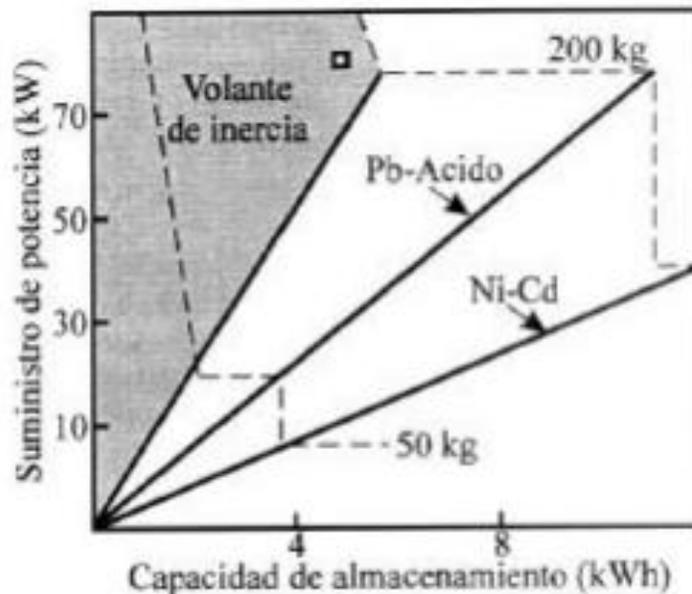
Gráfica 9. Coste en porcentaje de cada sistema [Radhika, 2013]

## Conclusion

El KERS es un tipo eficaz de frenado regenerativo que puede cumplir con el propósito principal de los vehículos que quieren reducir sus consumos, es decir, almacenar y reutilizar de la energía perdida durante el frenado. Los diversos tipos de Kers muestran diferentes maneras de almacenar y convertir la energía de una forma a otra. De acuerdo con el análisis, los volantes han demostrado ser el mejor tipo de KERS hasta ahora en términos de estabilidad de voltaje, rango de temperatura y eficiencia. Si no fuera por el gran tamaño necesario en un automóvil para que sean útil, y su elevado costo, los supercondensadores tendrían muchas posibilidades de sustituir el dispositivo de almacenamiento mecánico, aunque pasarán unos cuantos años hasta que se puedan equiparar en cuanto a eficiencia/coste.

## 6. Implementación de los sistemas de almacenamiento energético mecánico en la actualidad

Tras haber hecho un repaso de los tipos de sistemas de almacenamiento energético mecánicos, y su comparativa tanto en el mundo de las plantas de generación de energía como dentro del mundo de la automoción con los otros tipos de KERS, y haber probado su superioridad en varios aspectos (como se aprecia en la gráfica 10), se debe realizar un repaso de la implementación real de los sistemas energético basados en volantes de inercia.



Gráfica 10. Potencia disponible contra capacidad de almacenamiento

En la tabla 4 se tiene como cuadro resumen de las aplicaciones en las que es usado, teniendo relevancia su uso desde satélites y estaciones espaciales, a las plantas de generación de energía como aseguradores de la calidad de la misma, pasando por trenes y vehículos. Con tan variadas aplicaciones esta claro que la variabilidad de componentes es amplia teniendo entre todas las aplicaciones todos los volantes estudiados, tantos de alta (satélites) y baja velocidad (plantas de generación) así como los acoplados a un motor/generador (tren, estaciones espaciales) como los completamente mecánicos (como en los vehículos con CVT+Flywheel).

## ● Application-Specific Flywheel Battery Designs

	Peak power	Stored energy, MJ (kWh)	Maximum rotational velocity, rpm	Rim speed, m/s	Rotor material	Rotor mass, kg
Satellite	2 kW	1.4 (0.4)	53 000	900	Composite	30
Power quality	400 kW	4.7 (1.3)	10 000	400	Steel	1400
Hybrid bus	150 kW	7 (2)	40 000	900	Composite	60
Space station	3.6 kW	13 (3.7)	53 000			75
Hybrid combat vehicle	11 MW pulsed; 350 kW continuous	25 (14)	18 000	540	Composite/ metallic	280
Electromagnetic launcher	5-10 GW	50-150 (14-42)	10 000	450	Composite	4000
Train	2 MW	470 (130)	15 000	950		2500

Source: University of Texas

Tabla 4. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento energético mecánico según la Universidad de Texas [UPCT, 2008]

Solo queda ya por tanto, repasar su aplicación exclusivamente en el mundo de la automoción.

Como en muchos de los casos de mejoras tecnológicamente elevadas que han surgido en el mundo de la automoción, estas no son sino adaptaciones de las mejoras del mundo de la competición (en la mayoría de casos de la formula 1) a los vehículos serie de las diferentes marcas. Como no, en el caso de los sistemas de almacenamiento energético no iba a ser un excepción, y su aplicación en vehículos se deriva de la utilización del mismo en la F1 a partir de 2006, que fue cuando se empezó a hablar de la implementación de sistemas regenerativos en las frenadas.

Max Mosley anunció en el Gran Premio de Gran Bretaña en 2006 que quería que los coches de F1 desarrollaran sistemas de frenado regenerativo, sin embargo, él no pudo prever cuán directamente sus esperanzas en la iniciativa se convertirían en realidad; mientras pronunciaba estas palabras tomaba notas Jon Hilton, que ahora dirige el tipo de empresa pequeña y de alta tecnología, que Mosley esperaba que desarrollase los sistemas para la Fórmula 1, posicionándose como la primera empresa en proveer estos sistemas. Por otra parte, la compañía de Hilton, una vez que se posiciono como la empresa que lideraba el camino de las necesidades de la F1, está ahora activamente desarrollando aplicaciones para vehículos de carretera y están siendo esperados sus avances con mucho interés. Así que la esperanza de Mosley está cerca de ser realizada, a través de la tecnología desarrollada para la F1, que sea aplicada en los coches que conducimos en la carretera. Y todo esto sucedió en un tiempo record: debido a que los recortes a los que se vio sometido Renault para reducir sus gastos dejaron sin trabajo a Hilton y Doug Cross, los cuales formaron su propia empresa para producir estos sistemas: Flybrid Systems La pareja estaba fuera de Renault a partir del 1 de enero de ese año y así el 2 de enero entró en el Centro de Tecnología de Silverstone y comenzaron a trabajar.

La opción de desarrollar la solución del volante fue la elegida y esbozaron los aspectos básicos de un diseño, como se muestra en la figura 18.

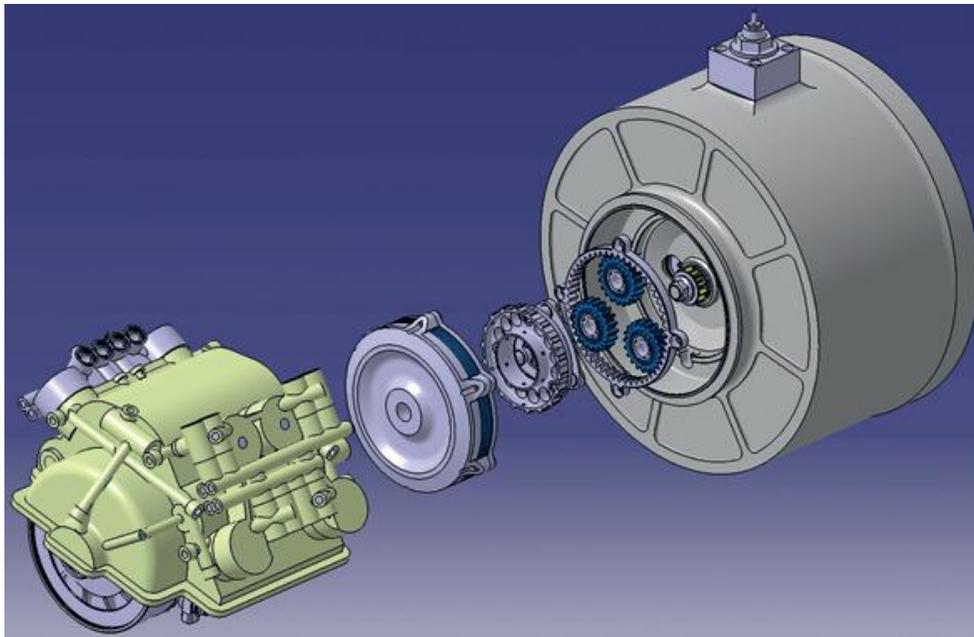


Figura 18. Desarrollo previo en CAD del sistema [Collins 2011]

La clave del producto de Flybrid consistía en abordar la necesidad de crear suficiente densidad de almacenamiento de energía en una unidad lo suficientemente pequeña y ligera como para su uso en la F1. Para ello se aumentó la velocidad del volante de forma masiva a 64.500 rpm, lo que permite un volante más pequeño y ligero, pero también significa que tiene que estar contenido en una estructura muy robusta en caso de fallo. Esta velocidad a su vez crea pérdidas por rozamiento con el aire y produce enormes cantidades de calor. La solución que Flybrid decidió, era moverlo en el vacío. Lo cual evita los problemas de fricción y el calor, pero planteaba el problema de conseguir la transmisión de par de dentro a fuera y de fuera a dentro sin fugas de aire; las soluciones eléctricas eran una posibilidad, pero la energía perdida en la transferencia de energía sería demasiado grande. En su lugar, el equipo optó por desarrollar un sello en el eje totalmente hermético.

Una vez que el proyecto se esbozó se determinó que la mayor parte de los retos planteados tenían soluciones en los libros existentes, ya completamente desarrollados, y que solo había cuatro áreas en las que la compañía iba a tener que inventar sus propias respuestas. Estos eran: una construcción del volante que asegurara la integridad a estas velocidades, la contención del mismo que mantenga los pedazos del rotor en caso de choque o un fallo catastrófico, un sello de vacío y una solución para los rodamientos.

El enfoque de Flybrid a estos problemas era inusual ya que la empresa se puso a diseñar tres soluciones para cada uno de estos problemas y llevarlos a todos a fabricar en paralelo. " Lo hicimos porque era más rápido ", dice Hilton. " No teníamos tiempo para hacer sólo nuestra solución favorita, pensamos que si no funcionaba a la primera, no se podría rediseñar y luego esperar otros ocho semanas para que llegaran las piezas nuevas a realizar. No creían que sobrasen dos o tres meses. Por otra parte, pensaron que no era un lujo demasiado caro. A pesar de que realizar piezas es caro, también es caro si se tarda mucho tiempo. Se gasta en alquiler de oficinas, electricidad y todos los otros gastos generales de negocio. Estaban seguros

de que no es la forma más cara, hacerlo de la manera que lo hicieron. Al final, todas las soluciones que intentaron las primeras funcionaron, excepto la del rodamiento.

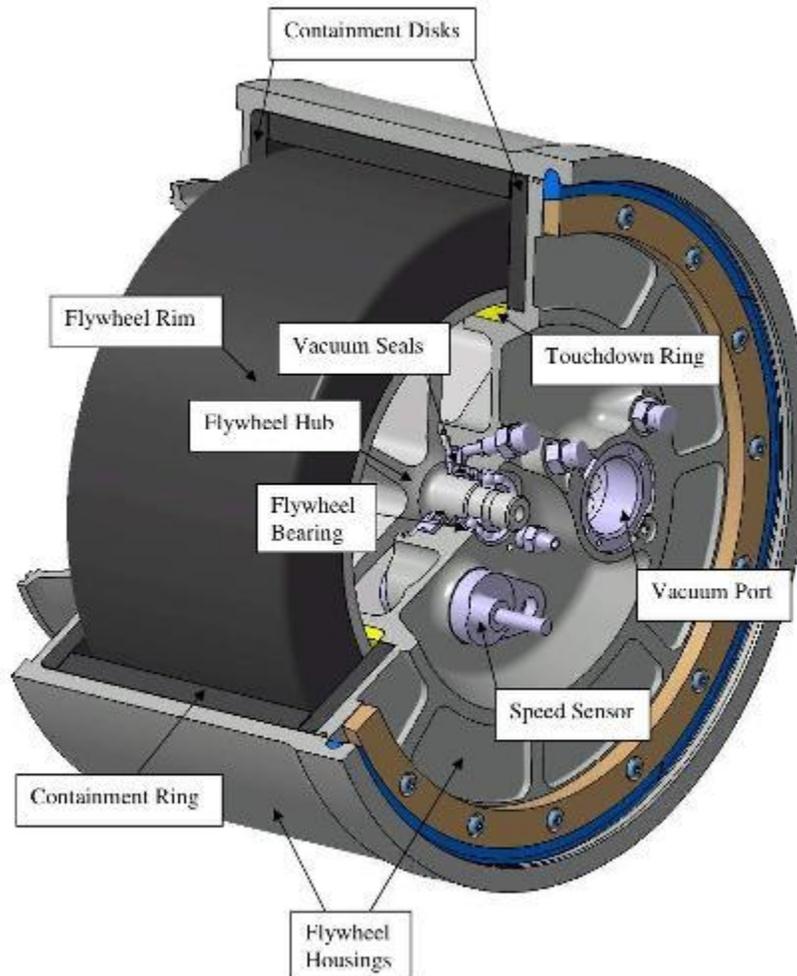


Figura 19. Esquema de componentes del volante y su carcasa [Collins 2011]

Como se puede apreciar en la figura 19, estas fueron las soluciones adaptadas:

#### Solución 1 - el volante de inercia

El volante está hecho de filamentos de carbono envueltos alrededor de un cilindro hueco de acero y pesa 5 kg. Lo más importante, la resistencia a la tracción del carbono impide que se rompa bajo las  $g$  que se soportan a velocidades tan altas. Flybrid ha generado un conjunto de herramientas de diseño genéricos y ha podido examinar todo, desde largos cilindros delgados y grandes, a “pancakes” finas. La realización de trabajos adicionales ha optimizado el diseño actual aún más. A pesar de que puede almacenar hasta 60 kW, la alta velocidad significa que par del eje es muy bajo, en no más de 18Nm.

#### Solución 2 - la carcasa

Obviamente, la empresa sabía que una lesión grave o la muerte asociada con el sistema podrían significar el fin de la tecnología y la empresa, por lo que la seguridad fue una prioridad en todo

el proyecto. Su solución de contención resultante es muy robusta y se probó de forma no voluntaria durante el fallo del rodamiento con el que se tuvo problemas. De hecho, el daño fue relativamente menor, se limitó a la rueda volante y los anillos de contención, mientras que el alojamiento estaba intacto y capaz de ser reutilizado.

### Solución 3 - el sello

El sello es un diseño propio con patente de la empresa y Hilton dijo que no se revelarían detalles hasta que la patente no se publicase a finales del año 2008. De la patente se extrae que funciona mediante dos cámaras de vacío diferenciadas. El logro conseguido "es algo para estar orgullosos", ya que puede mantener un vacío de  $1 \times 10^{-7}$  bar prácticamente de manera indefinida. Para tener una idea del vacío alcanzado, una molécula de aire tiene que recorrer de media a 45km al viajar por el interior de la carcasa del volante hasta que encuentra otra .

### Solución 4 - el rodamiento

Por último, el rodamiento se demostró como el mayor desafío de todos, o mejor dicho, la lubricación de los mismos, ya que obviamente no se puede poner lubricantes líquidos dentro de un vacío. Sin embargo, el fallo no planificado que se tuvo durante las pruebas resultó muy informativo ya que las unidades siempre fueron monitoreadas y registradas durante las pruebas. "Ahora que hemos tenido una rotura sabemos cómo se ven justo antes de que se rompan ", dice Hilton.

Esta es una parte importante de la estrategia de la fiabilidad, y las unidades se pueden evaluar en el coche con acelerómetros para buscar signos reveladores de fracaso inminente. Una unidad también superó una simulación de prueba de impacto frontal F1 con ningún daño al dispositivo.

Flybrid ofrece soluciones llave en mano para los equipos completos, con servicio técnico completo, y ya ha trabajado con uno de los socios F1 anónimo (en principio, luego se desveló que era Honda) quien encargó al equipo a diseñar un sistema a medida. Actualmente prefiere diseñar el acople a el coche aguas abajo de la transmisión, aunque hay ventajas para la aplicación de la transmisión directa al motor. Sin embargo, con la actual congelación del diseño del motor no sería posible volver a diseñar la transmisión para poder recuperar la energía.

Una vez que la empresa comenzó a desarrollar la tecnología, rápidamente quedó claro que Hilton y Cross que, si bien en la F1 ganara bastante de dinero, el crecimiento real estará en los coches de carretera. Y con esto en mente se han desarrollado diseños de volante que, si bien sacrifican un pequeño porcentaje de la eficiencia, reducen masivamente su carga y se convierten en mucho más barato de fabricar. La compañía ya está en conversaciones con los fabricantes de automóviles y un cliente potencial está solicitando dinero al gobierno para financiar un proyecto de desarrollo con Flybrid. Como Hilton señala [Collins 2011], esto es la clave para trabajar fuera de la F1, una vez que han desarrollado la tecnología tienen la obligación de diversificar en otros mercados.

Una versión para cliente particular del sistema flybrid fue desarrollada para “Prototipos Le Mans”. Se trata de una unidad completa que se encuentra entre el motor y la transmisión, como se puede apreciar en la figura 20.

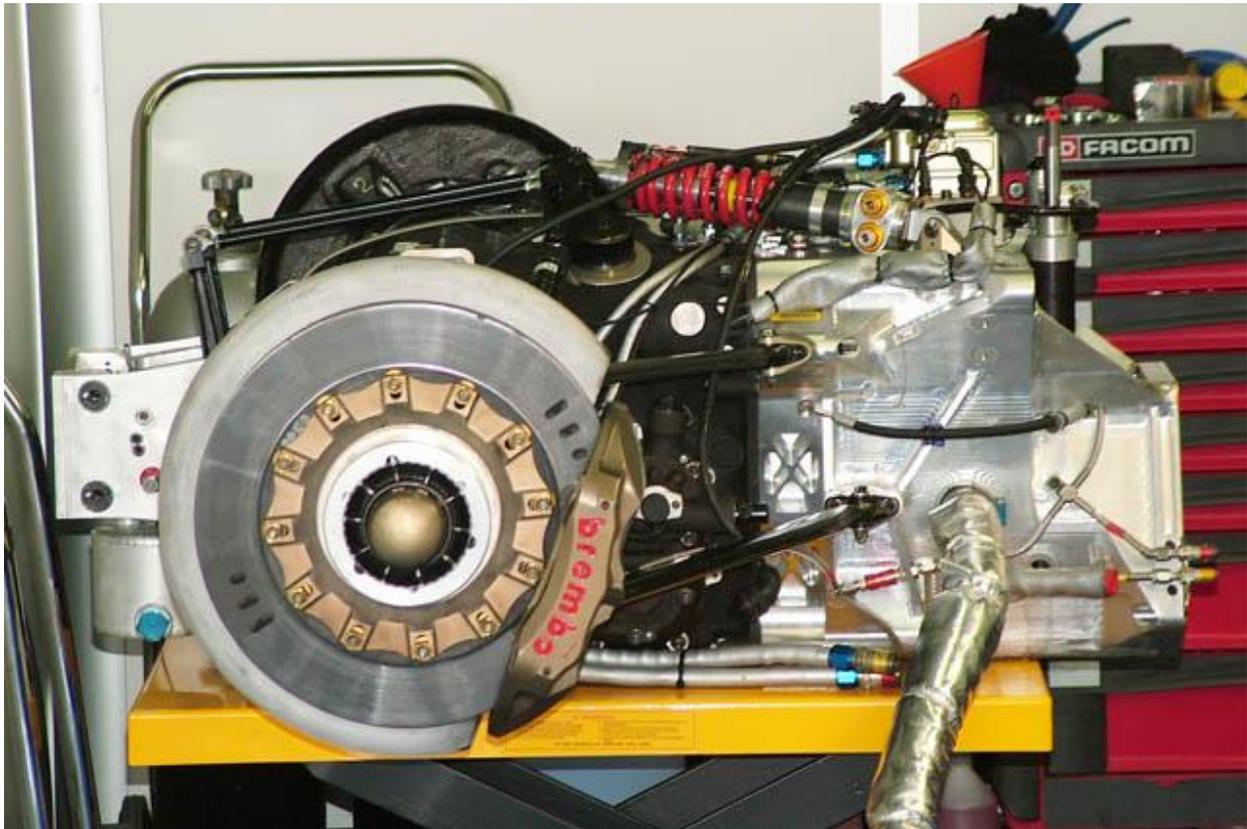


Figura 20. Configuración de la unidad motora del Volkswagen USA Hope Racing ORECA 01[Collins 2011]

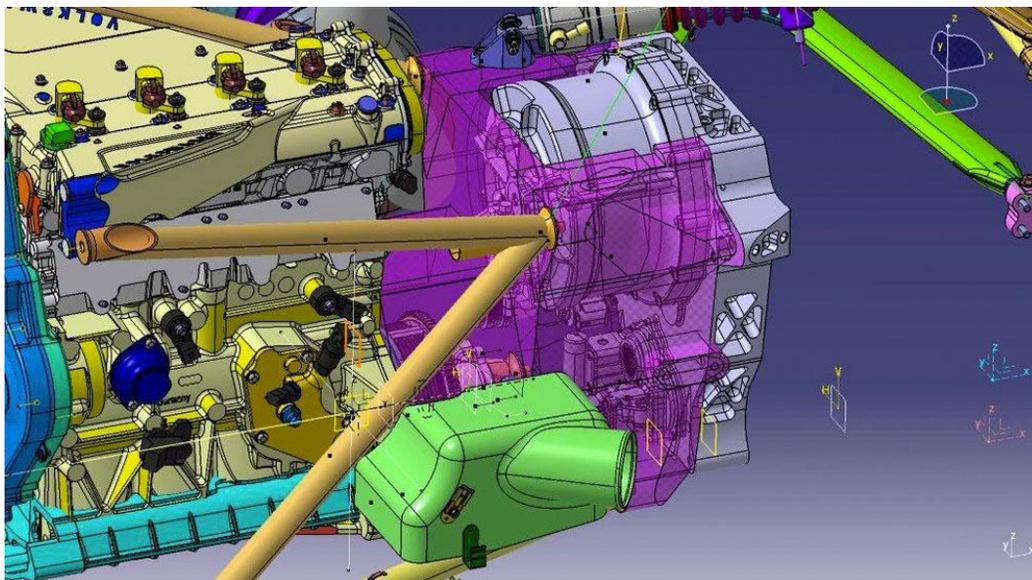


Figura 21. Posicionamiento dentro del vehículo del sistema [Collins 2011]

El volante en sí está situado en la carcasa de plata en el extremo más cercano a la transmisión (sección de color negro en la figura 20, en azul metálico en la 21). No es exactamente el mismo

que el sistema de F1 se ha descrito anteriormente, pero el principio es el mismo. Instalado se encuentra en el coche de HOPE lo que Flybrid llama Flywheel Transmisión embragable o CFT KERS. Se probó por primera vez en el banco de pruebas el viernes 25 de marzo de 2011.

En el corazón de la nueva Flybrid KERS para Le Mans 2011, (figura 22) la transmisión CFT es un componente clave de este sistema de recuperación de energía cinética de 100 kW ligero. El sistema utiliza una serie de pequeñas embragues para transmitir el par entre el volante y la caja de engranajes principal del vehículo y esta funcionalidad se puso a prueba en el banco de pruebas a plena carga de Flybrid.



Figura 22. CFT KERS de Flybrid [Collins 2011]

El CFT se dice que es la primera KERS verdaderamente segunda generación en llegar al mercado y representa un cambio en el tamaño, peso y costo de esta tecnología verde del futuro. Un sistema completo Flybrid CFT KERS de la Fórmula Uno es capaz de almacenar y transmitir 60 kW y 400 kJ por vuelta pesa menos de 18 kg y una sección vista en planta encaja en una pieza de papel A4.

Es adecuado tanto para la competición como para la aplicación en coche de carretera y reduce proporcionalmente a pequeños aumentos de potencia y pequeñas cantidades de almacenamiento, como sería necesario para un coche de la clase B.

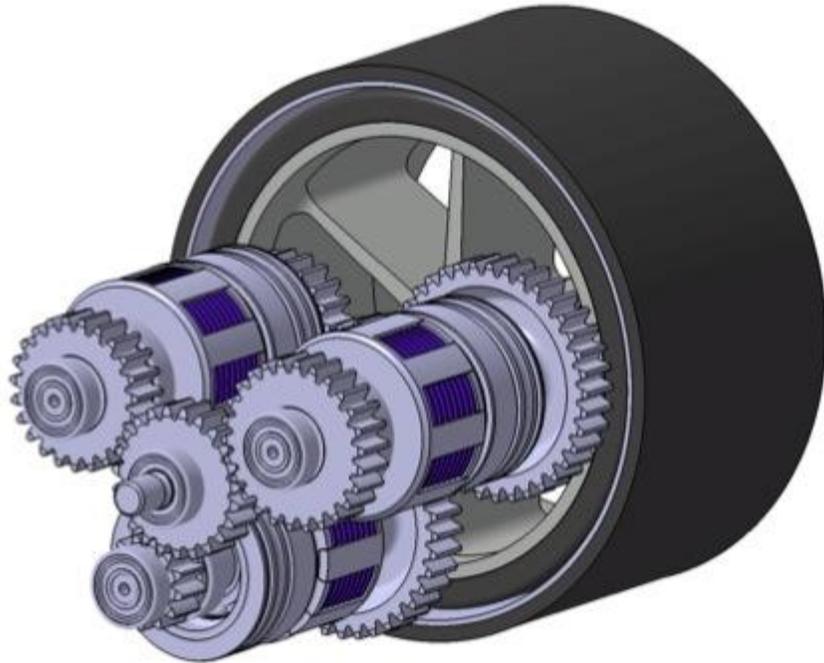


Figura 23. Esquema de los engranajes y el volante de inercia de la transmisión CFT [Collins 2011]

La transmisión CFT (figura 23) utiliza una serie de engranajes discretos y embragues de alta velocidad que realizan un deslizamiento controlado para transmitir el par. Cuando se conecta a un eje de la velocidad del motor dentro de la transmisión del vehículo los tres engranajes en el KERS CFT se multiplican por el número de engranajes en la transmisión principal vehículo para proporcionar un gran número de relaciones globales disponibles entre el volante y las ruedas. La eficiencia de un embrague de fricción depende de la velocidad a través de ella y con tantos engranajes para elegir una opción de alta eficiencia está siempre disponible.

Aplicado a un vehículo de la Fórmula Uno a las 21 velocidades disponibles (3 CFT KERS x 7 velocidades caja de cambios del coche) significa que durante una vuelta de las carreras típicas la eficiencia será de alrededor de 64 % de entre lo recibido y lo transmitido. En un coche típico utilitario la eficiencia general puede ser aún mayor por lo que el ahorro de combustible en el ciclo de conducción NEDC es comparable con los sistemas híbridos basados en volantes y CVT.

Cuando está en uso un controlador informático, se selecciona la marcha más adecuada mediante la participación parcial del embrague de alta velocidad asociada a ese engranaje. El sistema de control utiliza la presión hidráulica para cerrar las sujeciones normalmente abiertas y transmitir el par, sin problemas de cambio de una marcha a otra y sin interrupción del mismo, porque la velocidad necesaria para acoplar el embrague es cercana a cero.

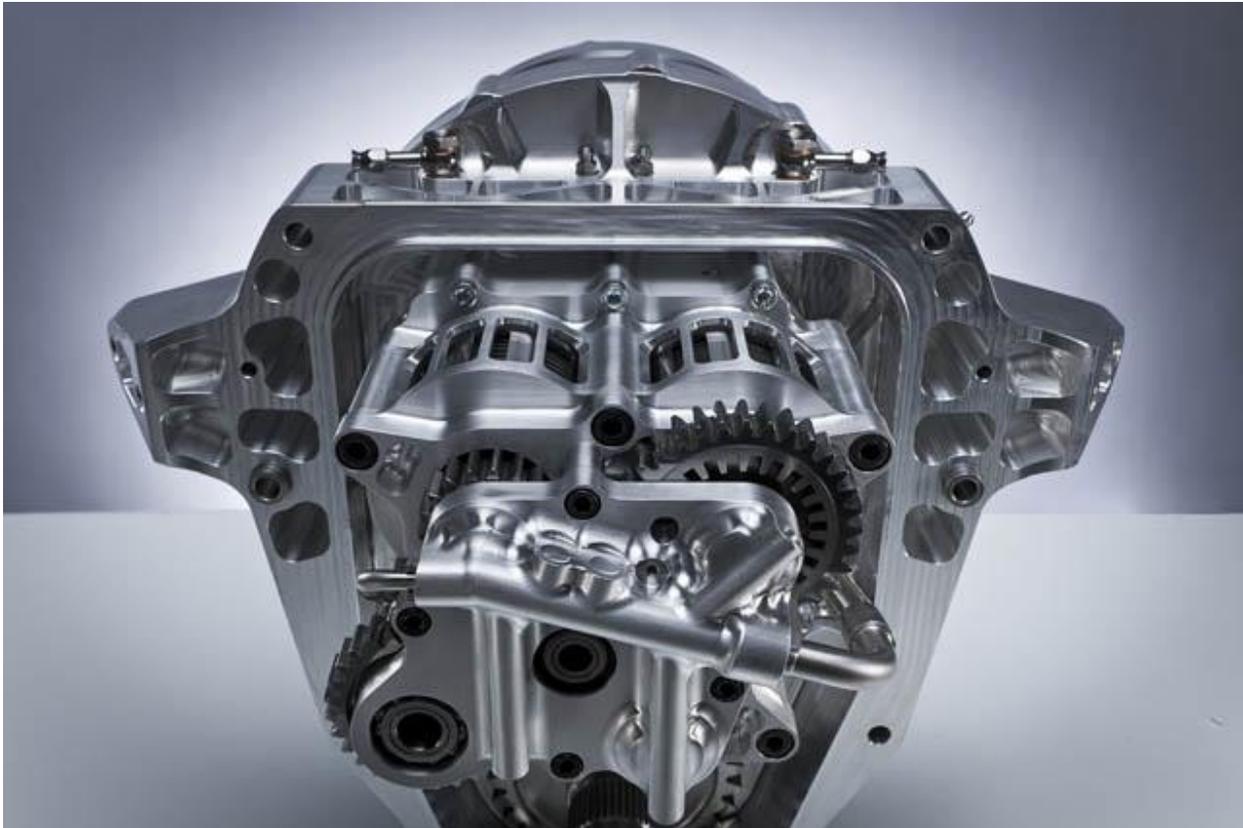


Figura 24. Vista real de la caja de transmisión CFT sin la carcasa sellada [Collins 2011]

El sistema hidráulico está completamente sellado para aplicaciones en F1 y es posible utilizar el sistema hidráulico de un coche normal. Para otras aplicaciones Flybrid fabrica y suministra su propio sistema hidráulico autónomo que incluye un pequeño desarrollo de Flybrid: una bomba hidráulica y un bloque de control de válvulas.

El KERS CFT utiliza lubricantes convencionales que funcionan a temperaturas de motor normales y el rechazo por calor promedio es bajo (sólo un promedio de 3.0 kW para una vuelta F1) por lo que es fácil de disipar el calor generado por los embragues de deslizamiento. Al dividir el calor entre los diferentes engranajes se disipa a mucho más fácil y la vida de los embragues se calcula en varios miles de ciclos a pleno rendimiento.

Flybrid han presentado solicitudes de patente para varias características de los KERS CFT, incluyendo la disposición general, así como los detalles del sistema de refrigeración y la lubricación necesaria para las garras de alta velocidad.

El dispositivo CFT KERS puede estar conectado a la transmisión del vehículo en cualquiera de las ubicaciones numeradas del 1 al 7 que se muestra en la figura 25. Al utilizar puntos de conexión 1 a la 4, existe la ventaja de multiplicar el número de marchas en el CFT por el número de marchas en la caja de cambios del vehículo. En los lugares 5 a 7 el KERS CFT puede estar configurado con más de tres engranajes y las pérdidas de entrada y salida para la recuperación de energía cinética son más bajas debido a la proximidad de la conexión a las ruedas del vehículo.

### Locations for Energy Storage & Recovery Device

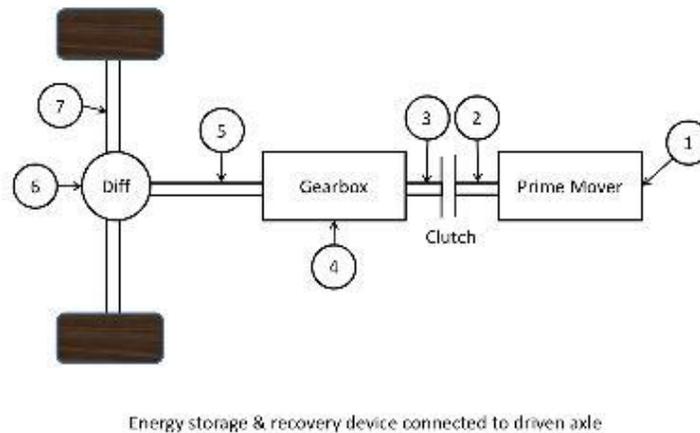


Figura 25. Posibles localizaciones de la caja de transmisión CFT [Collins 2011]

Flybrid, fue recientemente adquirida por la compañía TOROTRAK, que tiene su marco de negocio en el mundo de la ingeniería de la automoción. Con la compra de flybrid, ha implementado a la transmisión CFT desarrollada por flybrid, y su propia caja de cambios CVT, ampliando las posibilidades de su sistema de recuperación de energía. El objetivo de TOROTRAK no es solo hacer del Flybrid una tecnología de los vehículos de carretera particulares, y que sea introducido ampliamente en el mundo de los transportes públicos urbanos, de los que ya han desarrollado vehículos (figura 26) y estiman unos ahorros en combustible de alrededor del 20 por ciento.



Figura 26. Autobús desarrollado por TOROTRAK con sistema de recuperación energética mecánica en las frenadas. [Torotrak, 2013]

Como comentan en la propia página de Torotrak estas son los principales aspectos y beneficios del KERS

#### Características del KERS

- Alta eficiencia del par " de ida y vuelta " - como un sistema puramente mecánico, el KERS evita las pérdidas inevitables que ocurren cuando los sistemas basados en baterías cambian la energía de una forma a otra (es decir, mecánica en corriente alterna, en CC, a agentes químicos), lo que hace más energía disponible para devolver a la transmisión
- Alta densidad de potencia - KERS es un pequeño paquete de sistema que se incorpora fácilmente en los coches y vehículos comerciales
- Bajo Peso –El KERS pesa típicamente alrededor de 1/3 del peso de una batería de un sistema híbrido eléctrico, con un peso de alrededor de 60 kg
- Larga vida del sistema - incluso con altas descargas de potencia, trabaja sin problema en un amplio rango de temperaturas y ciclos de trabajo
- Transmisión Variable - KERS está disponible con la transmisión de Torotrak ( CVT) o la propia transmisión de Flybrid (CFT ), cada uno con sus propias ventajas particulares , ofreciendo a los clientes más posibilidades de elección

#### Beneficios KERS

- Reducción de Emisiones de CO<sub>2</sub> / Contaminantes - mediante la recuperación y la reutilización de la energía, el KERS reduce el uso de combustible , ahorra dinero y reduce la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminantes emitido por el vehículo
- Bajo costo y práctico – con un coste de alrededor de 1/3 del costo de un sistema eléctrico de potencia equivalente, el KERS también pueden integrarse en la arquitecturas de vehículos existentes en la actualidad, e instalarse al lado de la línea principal de ensamblaje de los fabricantes de vehículos , e incluso se pueden adaptar a los vehículos existentes ya en servicio
- Significativamente más corto periodo de amortización - un sistema eléctrico equivalente montado en un autobús por lo general requiere de toda la vida útil del vehículo (o incluso más) con el fin de recuperar la inversión , mientras que el KERS puede proporcionar un retorno de la inversión en menos de 5 años
- Eco-friendly -El KERS se recicla fácilmente y tiene un bajo contenido de CO<sub>2</sub> incorporado, sin metales de tierras raras o ácidos de baterías altamente procesados como a menudo se encuentran en los HEV
- Mejora de rendimiento – El KERS puede mejorar el rendimiento del vehículo durante períodos cortos de tiempo con el mismo consumo de combustible, y también pueden ofrecer beneficios de estabilidad y tracción en todas las ruedas
- Facilidad y seguridad de Fabricación - todos los componentes y los materiales son comúnmente disponible , seguros y fáciles de trabajar , y fácilmente reciclables , además de que no requieren una formación o equipos especiales.

Otro de los pequeños fabricantes/desarrolladores (en comparación con las grandes marcas generalistas) es RICARDO.

RICARDO, ha desarrollado un sistema de almacenamiento energético muy similar en cuanto a prestaciones del volante de inercia, a la de flybrid/torotrak, pero implementando algunas soluciones que mejoran aun más el rendimiento del mismo. Cabe destacar que Ricardo no fabrica sus propias CVT si no que las adquiere al que ahora es su competidor Torotrak

Ricardo se percató de que había dos tipos de pérdidas en el diseño original, la primera, que por muy precisos que sean los rodamientos, su uso llevaba intrínseco un rozamiento, por muy pequeño que este fuese. Es por ello que desarrollaron unos rodamientos magnéticos que producen una levitación del volante de inercia dentro de la propia carcasa, evitando así el rozamiento y un posible desgaste de los mismos.

Por otro lado, se observó que la salida de un eje para transmitir el par, de una carcasa en la que se había hecho el vacío suponía que habría unas pérdidas, o más bien ganancias de aire, que habría que extraer mediante una bomba de vacío, u otro dispositivo que significaría la aplicación de una energía extra para este fin. Para evitar esto, desarrollaron una carcasa completamente estanca en la que se realizaba el vacío en su fabricación y no era necesario realizarlo de nuevo nunca más, para poder transmitir el par del volante al eje de transmisión y viceversa, se crearon unos engranajes mediante imanes permanentes que producen una transmisión de par sin necesidad de ningún tipo de contacto, simplificando mucho así todo el sistema y reduciéndolo a su mínima expresión.

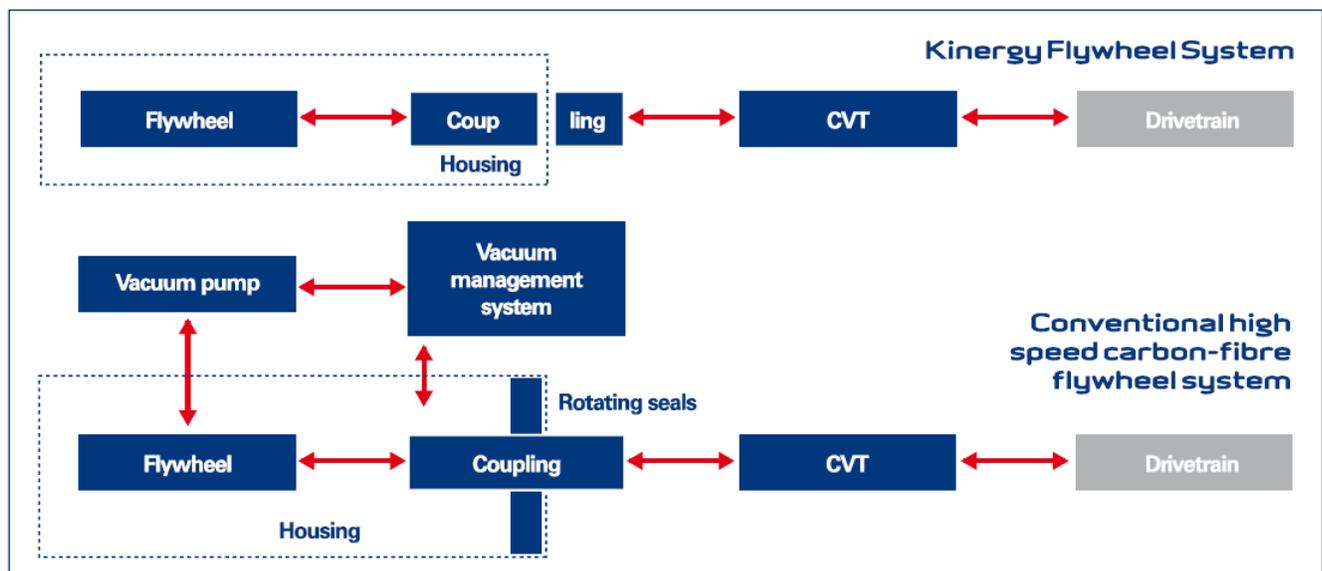


Figura 27. Comparativa entre el sistema desarrollado por Ricardo y el "tradicional" con transmisión por contacto. [Ricardo, 2013]

Dentro de las marcas generalistas que están implantando, o en vías de implantación en los modelos serie nos encontramos sobre todo con Volvo, a pesar de que otras marcas están aplicando los KERS de las marcas anteriormente comentadas en prototipos: Land Rover, Jaguar, Porsche...

Volvo ha desarrollado su propio KERS (figura 28), desde 2011 que comenzó su investigación y desarrollo auspiciados por el gobierno sueco con 700.000 €, aunque algunas fuentes apuntan a que la inversión podría haber llegado a los 20 millones de coronas secas (2.200.00€) y parece que el proyecto ha sido satisfactorio, porque ya ha podido ser probado por diferentes periodistas del mundo de la automoción, aunque parece que aunque está en fase de desarrollo el vehículo probado era completamente funcional y con las prestaciones prometidas.



Figura28. KERS desarrollado por Volvo

Al igual que los KERS anteriores, parece que las limitaciones de la física hacen que las prestaciones de los diferentes tipos de KERS aquí estudiados sean muy parecidas.



Figura 29. El volante realizado en fibra de carbon y acero [Bingley, 2013]

El volante (figura 29), al igual que los anteriores, esta hecho por un anillo de 20 centímetros de diámetro y 6 kilogramos de peso hecho de acero ensamblado mediante un corazón o “llanta” de fibra de carbono que le otorga la integridad estructural a altas velocidades. Como rota a una velocidad de 60000 revoluciones por minutos el borde exterior se desplaza a una velocidad de 1400mp/h (2253.1km/h) lo que equivale a una velocidad de 1.9 mach, superando en casi dos veces la velocidad del sonido. La cual superaría si hubiese sonido que transmitir en el interior de la carcasa (figura 30), cosa imposible ya que en ella se ha hecho el vacío. Esta además, se ha hecho con materiales específicos para soportar una rotura improbable del volante.

# FLYWHEEL KERS

## FLYWHEEL MODULE

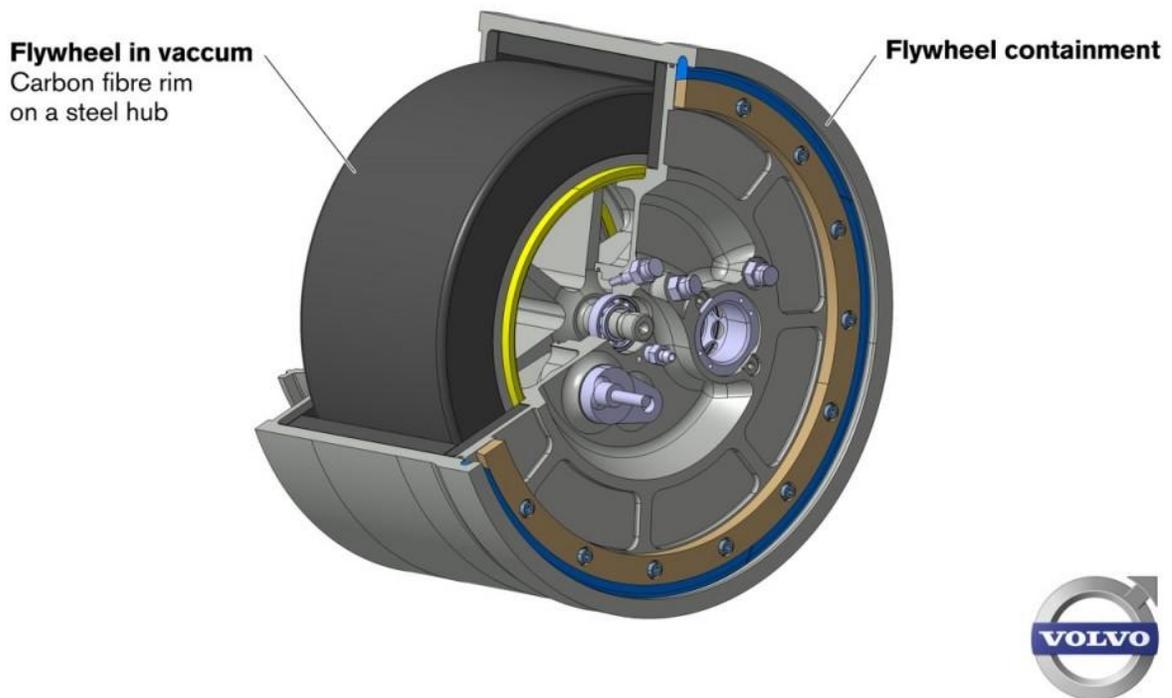


Figura 10. Esquema del volante y su carcasa

De manera contraria que otros KERS mecánicos, este volante se acopla al eje trasero del vehículo (como se puede apreciar en la figura 31 y mas claramente en la 32), no como los otros KERS, que se acoplan al eje de transmisión, pero al igual que ellos, que son exclusivamente mecánicos, se acopla mediante una caja de transmisión variable (CVT) accionada de manera hidráulica. Por tanto, el par transmitido se aplicara sobre las ruedas traseras. Para evitar perdidas de tracción, deslizamientos y derrapes, se ha programado a la centralita del coche con un control de tracción especial, que permite el uso del kers hasta en curvas resbaladizas. Además de tener los colectores necesarios que generan el vacio en la carcasa.

# FLYWHEEL KERS

## COMPONENT DETAILS

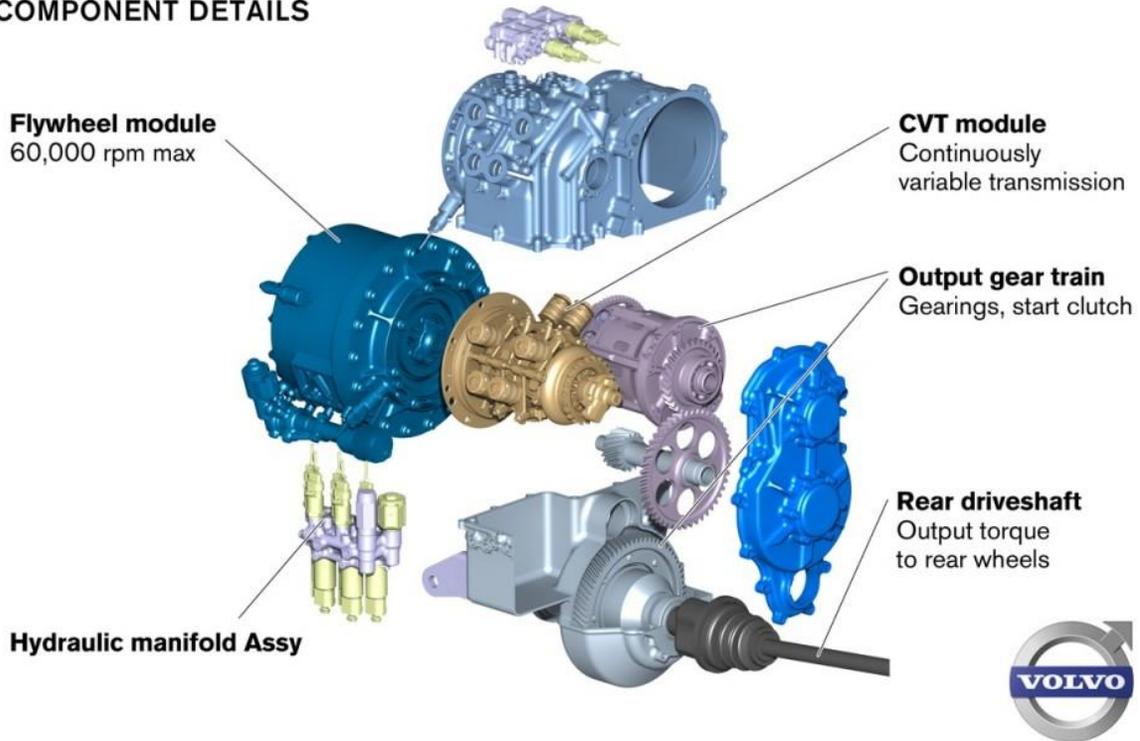


Figura 11. Esquema de componentes del sistema de Volvo en CAD

# FLYWHEEL KERS

## SYSTEM LAYOUT

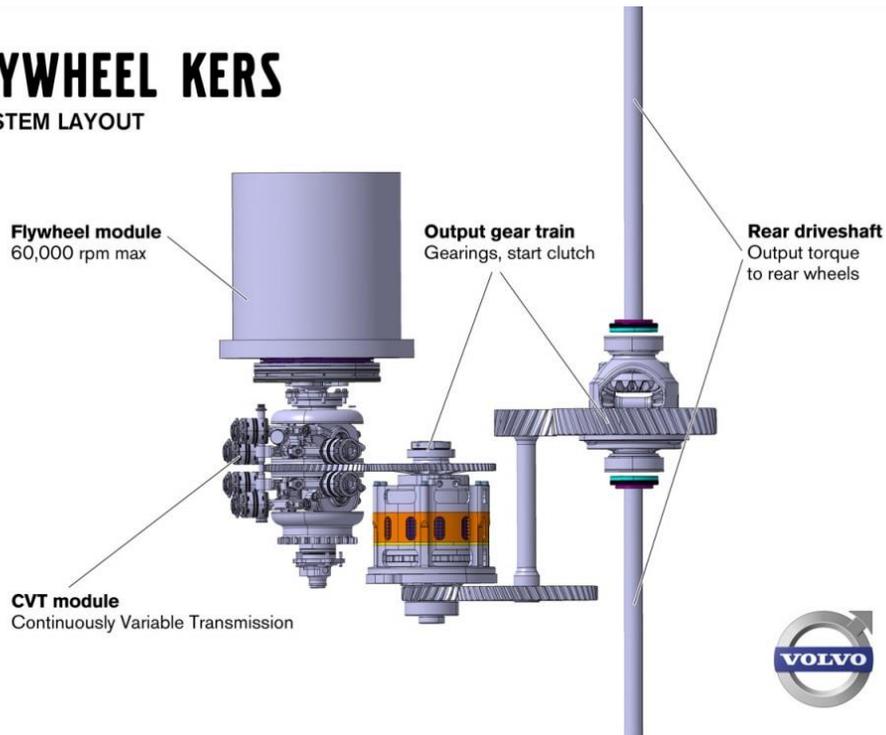


Figura 12. Distribución del sistema de Volvo

Otra diferencia respecto a los Kers de los demás fabricantes es que este dispone de dos modos seleccionables por el usuario, en la cual se selecciona entre modo económico y modo potencia/deportivo. Además en el controlador (figura 33) se puede apreciar el par suministrado (o tomado) en cada eje y el nivel de carga del volante de inercia. En el modo económico se consiguen ahorros impresionantes de hasta un 25% según tests NEDC (New European Drive Cycle), el cual se conseguirá en ciclo urbano o en rutas que requieran deceleraciones constantes, no siendo determinante en autovías.

El segundo modo potencia o deportivo, consiste en la aplicación de toda la potencia que puede generar el Kers al eje trasero, que equivale a unos 80 caballos extras durante aproximadamente 6 segundos. Esto equivale a reducir en 1.5 segundos el 0-a 100km/h en los motores volvo de 5 cilindros hasta unos muy bajos 5.5 segundos de 0 a cien, y una reducción de hasta 2,5 segundos en el 0 a-100 km/h en los motores volvo de cuatro cilindros, por supuesto, se puede utilizar para realizar adelantamientos con mucha mas agilidad.

Ya sea en un modo o en el otro, la mejora de prestaciones es mas que cuantificable y supone un cambio respecto los modelos sin hibridizar. Además la cifras de CO2 se rebajan en 20g/Km, consiguiendo hacer mas ecológicos vehículos de serie.



Figura 13. Vista del controlador del sistema, una pantalla táctil [Bingley, 2013]

Por las pruebas realizadas por especialistas, y contrastando las opiniones de dos medios diferentes, se extrae que el modelo probado es completamente funcional, aunque debido a la instalación del Kers en el vehículo se adivina que todavía son modelos preserie, instalados de una manera “mas precaria”. A pesar de ello, se apreciaba en el ordenador de abordo el ahorro de combustible y en el modo deportivo es, según palabras de los periodistas “como si la mitad

del peso del coche desapareciera, como si se apretara el turbo del batmovil”. Como único inconveniente que le encuentra, y que se presupone por la instalación precaria (figura 34) o la falta de una carcasa diseñada como aislante acústico, es el ruido “como de una lavadora centrifugando” aunque sin llegar a ser molesto.



Figura 14. Montaje provisional del sistema en el maletero. [Bingley, 2013]

#### Fabricación en serie

Según palabras de Volvo la primera fase del desarrollo del Kers para vehículo de calle ha terminado, y su idea es añadirlo como opcional dentro de las características de venta del vehículo en el periodo de tiempo más corto posible. El único problema para que este suministro sea inminente es el problema de la cadena de suministro, ya que actualmente, y según palabras de Volvo, no hay ningún fabricante capaz de producir diez mil unidades de volantes de fibra de carbono-acero, con la altísima precisión necesaria, para alimentar la cadena de producción de Volvo con sus tiempos de fabricación.

## 7. Conclusiones

### a. Conclusiones

Después de este estudio más o menos pormenorizado de los sistemas de almacenamiento energético mecánico, se pueden extraer varias conclusiones.

- Aunque sea un mecanismo conocido desde hace muchos años, su modernización y aplicación de componentes de última generación le da muchas más posibilidades de uso en varios sectores, en el caso central de este proyecto, el de la automoción, puede salir particularmente beneficiado por las características del mismo.
- Dentro del mundo de la automoción, resulta uno de los Kers mas atractivos que hay por sus características intrínsecas, puede tanto absorber como liberar mucha potencia de manera casi instantánea, su peso y tamaño es muy reducido en comparación con baterías, depósitos de aire comprimido..., su desgaste es prácticamente nulo y cumplirá con creces toda la vida útil del vehículo en el que este acoplado, sus componentes son respetuosos con el medio ambiente y su reciclado es muy sencillo, y su precio, una vez que se encuentre en producción fase serie, se estima de alrededor de 1000€ muy por debajo del conjunto de baterías, que además pierden rendimiento y hay que sustituir cada cierto tiempo. Además el ahorro de combustible de hasta un 25% en ciudad hace que se amortice en menos de dos años con un uso habitual del vehículo Por todo ello es un avance muy importante en el mundo de la automoción y que no debería ser obviado por el resto de fabricantes generalistas.

### b. Líneas futuras de trabajo

Como temas para estudios posteriores se propone, la investigación de la aplicación de este tipo de dispositivos, o evoluciones del mismo, en aquellos vehículos que estén sometidos a un uso habitual de aceleraciones y frenadas, entre los cuales destacaría las motocicletas y los camiones de reparto en el ámbito de la ciudad.

Otro de los estudios podría consistir en el desarrollo de un kers de bajo coste, en el que mediante la reducción de sus prestaciones pudiese abarataarse hasta ser posible su uso en todos los vehículos, y cuantificar la mejora de características del vehiculo con el kers “low cost”, y compararla respecto la de un Kers “ de alta gama”

## Referencias:

- Fotografía Museo del ferrocarril de Madrid 12/2013, ([http://www.museodelferrocarril.org/colecciones/gal\\_vehic\\_electricas.asp](http://www.museodelferrocarril.org/colecciones/gal_vehic_electricas.asp))
- Copex, J.P., Le gyrobus d'Yverdon fête ses 50 ans, Tram magazine, No76 pp34-46/12.2003-02.2004.
- Kamm, P, Der Trolleybus in Zürich, Verein Tram Museum Zürich, , pp162-167 2008.
- Sontoro L. Post Ciencia y Educación: Batería inercial y girobús. (<http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14613423/Bateria-Inercial-y-Girobus.html>)
- Rosen B. Ben Rosen Blog 12/2007. (<http://www.benrosen.com/2007/12/car-of-future.html>)
- Bottiglione F, Carbone G, De Novellis L, Mangialardi L, Mantriota G, Mechanical Hybrid KERS Based on Toroidal Traction Drives: An Example of Smart Tribological Design to Improve Terrestrial Vehicle Performance, Hindawi Publishing Corporation. Advances in Tribology Article ID 918387 Volume 2013.
- Radhika K, Mallika P. Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III , WCE 2013 London, Uk, July 3 - 5, 2013,.
- Ripoll, L. *ANÁLISIS Y DISEÑO DE VOLANTES DE INERCIA DE MATERIALES COMPUESTOS*, UdG, Girona 2005.
- Apuntes Doctorado en Tecnologías Industriales de la Universidad Politécnica de Cartagena: Recursos Energéticos Distribuidos, 2008.
- Powerthru webpage Carbon Fiber Flywheel Technology, 2013. ([http://www.powerthru.com/carbon\\_fiber\\_flywheel\\_technology.html](http://www.powerthru.com/carbon_fiber_flywheel_technology.html))
- Collins S, Racecar Engineering: Flywheel Hybrid System, 2011. (<http://www.racecar-engineering.com/articles/f1/flywheel-hybrid-systems-kers/>)
- Bingley L, Recombu Volvo KERS prototype-first test drive, 2013. (<http://recombu.com/cars/reviews/volvo-kers-prototype-first-test-drive>)
- Flybrid Automotive Limited, 2013 (<http://www.flybridsystems.com/>)

- Torotrak Company, 2013. (<http://www.torotrak.com/>)
- Ricardo Company 2013. (<http://www.ricardo.com/>)
- Weiss C, Gizmaz: Automotive Volvo confirms fuel savings of 25 percent with flywheel KERS, 2013. (<http://www.gizmag.com/volvo-flywheel-kers-testing/27273/>)

