



KERS

Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética perdida durante la Frenada en la Fórmula 1



Alberto Sáenz Gonzalo 554273@unizar.es

Javier Tresaco Vidaller 553302@unizar.es

2009-2010

Automóviles Eléctricos e Híbridos

Ingeniería en Informática

Centro Politécnico Superior

Universidad de Zaragoza

Aragón, España

Proyecto:

Sáenz Gonzalo A. & Tresaco Vidaller J. *KERS. Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética perdida durante la Frenada en la Fórmula 1* (2010), Ing. Informática, CPS, Universidad de Zaragoza, Aragón, España

Asignatura:

Automóviles Eléctricos e Híbridos

Carácter:

Optativa de libre elección departamental.

Departamento y Área:

Dpto.: Ingeniería Mecánica

Área: Ingeniería e Infraestructura de los Transportes

Profesor:

Emilio Larrodé Pellicer

Nota: Todas las imágenes mostradas en el informe que contienen eventos de la competición automovilística de la F1 son propiedad intelectual de la FIA.

ÍNDICE

1. Introducción	Págs. 1-4
2. Funcionamiento	Págs. 4-20
2.1 <u>¿Qué es el KERS? Tipos: Eléctrico y Mecánico</u>	Págs. 4-6
2.2 <u>Funcionamiento interno</u>	Págs. 6-17
2.2.1 <u>Obtención de energía</u>	Págs. 7-8
2.2.2 <u>Componentes del KERS eléctrico</u>	Págs. 8-9
2.2.3 <u>Proceso de carga</u>	Págs. 9-10
2.2.4 <u>Entrega de potencia</u>	Págs. 11-17
2.2.4.1 <u>Del volante a la ECU</u>	Págs. 11-13
2.2.4.2 <u>Del volante al motor eléctrico</u>	Págs. 13-14
2.2.4.3 <u>Del KERS a la transmisión</u>	Págs. 15-17
2.3 <u>Fabricación</u>	Págs. 18-19
2.4 <u>Uso del KERS</u>	Pág. 20
3. Normativa	Págs. 21-24
3.1 <u>Normativa FIA</u>	Págs. 21-22
3.2 <u>Precauciones</u>	Págs. 22-24
4. Problemas con el KERS	Págs. 24-33
4.1 <u>Electrocución</u>	Págs. 24-26
4.2 <u>Incendio en la fábrica de Red Bull</u>	Pág. 26
4.3 <u>Incendios y averías en pista</u>	Págs. 26-28
4.4 <u>Balance del coche</u>	Págs. 28-33
5. Futuro del KERS	Págs. 33-38
5.1 <u>Descartado por la FOTA</u>	Pág. 33
5.2 <u>Otras competiciones</u>	Págs. 33-35
5.2.1 <u>Motociclismo</u>	Pág. 34
5.2.2 <u>Peugeot y Le Mans</u>	Págs. 34-35
5.3 <u>Coches de calle</u>	Págs. 35-38
5.3.1 <u>Efficient Dynamics BMW</u>	Págs. 35-36
5.3.2 <u>Ferrari f450</u>	Págs. 36-37
5.3.3 <u>Abandono de desarrollo = Descartado coches baja gama</u>	Págs. 37-38
6. Conclusiones	Págs. 38-42

Anexo: Bibliografía y Documentación

KERS

Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética perdida durante la Frenada en la Fórmula 1

Alberto Sáenz Gonzalo

Javier Tresaco Vidaller

*Ingeniería en Informática, Centro Politécnico Superior
Universidad de Zaragoza, Aragón, España*

554273@unizar.es

553302@unizar.es

Resumen

En una disciplina tan popular y tan criticada por su poca eficiencia energética, es posible que haya una vía abierta que lleve a los monoplazas a convertirse en máquinas más comprometidas con el medio ambiente augurando para ellas un futuro híbrido y, quién sabe si en un futuro lejano podamos olvidarnos del característico rugido de los híper-revolucionados motores de Fórmula 1 por silenciosos dispositivos eléctricos. Es por ello, que este trabajo ahonda en el *cuándo*, *cómo* y *porqué* funciona este ingenio así como las posibilidades de su desarrollo en un futuro cercano.

Palabras Clave: *KERS, Freno Regenerativo, Push to pass, Fórmula 1, Híbrido, Motor Eléctrico, Flywheel*

1. Introducción

Numerosas han sido las quejas que ha recibido la *Fórmula 1*, por ser un deporte poco comprometido con el medio ambiente y en algunos casos, incluso aburrido debido a la dificultad de los adelantamientos. Es por ello, que sus ingenieros y dirigentes se dispusieron a buscar posibles soluciones para mitigar estos dos problemas.

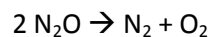
En la reglamentación se incluyeron modificaciones como la reducción de la carga aerodinámica generada por los monoplazas, la recuperación de los neumáticos lisos o *Slicks* y la introducción de un nuevo sistema de entrega de potencia extra llamado *Push to pass*.

Esta última novedad consiste en la pulsación de un botón que acciona un dispositivo que incrementa la potencia del vehículo permitiendo al monoplaza alcanzar una mayor velocidad punta y adelantar con mayor facilidad. Esta tecnología fue desarrollada en las fórmulas estadounidenses *Indy* y *Champ Car* (**ver Fig. 1**).



Fig.1 Fórmula Indy. Competición donde el *Push to Pass* es ampliamente usado. © Indy Car Series

En estas modalidades, este dispositivo se basa en la adición de Óxido Nitroso (N_2O) (**ver Ref. 1**); este gas (que a altas presiones se licua) al ser inyectado en el motor, provoca un repentino aumento de la potencia del mismo durante un corto periodo de tiempo. Esto se debe a que a las condiciones en las que se produce la inyección ($300^{\circ}C$) se da un proceso por el cual las moléculas de de Óxido Nitroso se descomponen (**Ref.2**) en:



Al separarse el oxígeno, la mezcla se hace más rica con lo que se puede quemar más combustible en un instante, además el nitrógeno, hace de pantalla y enfría la temperatura del motor en $20^{\circ}C$ evitando el sobrecalentamiento. Pero el gran problema del uso de este compuesto radica en las emisiones que provoca, y que es un gas de *efecto invernadero*. Como mucha gente sabe, tradicionalmente la visión de la contaminación en EEUU es menos estricta que en Europa (aunque es tendencia ha cambiado radicalmente en muchos estados norteamericanos); aunque el espíritu de la idea era bueno; no las formas a los ojos de la Fórmula 1. Aunque en 2009 se ha introducido un sistema basado en revoluciones extra llamado Power Boost.

La razón por la que se desechó emplear N_2O como sistema de propulsión extra es porque la F1, en Europa, es frecuentemente acusada de ser un deporte tremendamente ineficiente desde el punto de vista energético. Además en los tiempos de inestabilidad económica que corren, es muy difícil conseguir un buen patrocinador para sufragar los gastos en los que incurre una escudería a lo largo de la temporada: desplazamiento, evoluciones, etc. No hay que olvidar que este deporte tiene detrás de él una gran maquinaria propagandista; incluso el desaparecido equipo *Honda F1* (posterior *Brawn GP* y actual *Mercedes-Benz GP*) lanzó una campaña para concienciar sobre la importancia de la ecología, renunciando al patrocinio de cualquier *sponsor*, pintando sus coches con los del planeta Tierra (**Ref. 4**).



Fig. 2 Colores de la Tierra pintados en la carrocería del *Honda RA107* © Honda Racing

Y ni que decir tiene que los puristas de la F1 consideran que emplear este gas licuado como método de obtención de potencia extra, es una adulteración del deporte que presume de ser el más puntero del mundo. La última razón que se esgrimió a favor de este mecanismo es que podría hacer a este negocio más barato, porque a medida que fuera aumentando su potencia y calidad, el uso de motores térmicos sería más innecesario con el tiempo, terminando éstos por ser menos potentes (menos coste de desarrollo por tanto) y consumiendo mucho menos combustible. Es por ello que se buscó una solución basada en el *freno regenerativo*; y qué mejor campo de investigación que los circuitos de carreras.

Muchos vieron un esperanzador futuro para esta disciplina, soñando con una Fórmula 1 más limpia e incluso híbrida. La solución implantada se denominó *KERS (Kinetic Energy Recovery System)*, que recupera la energía cinética perdida en las frenadas transformándola en eléctrica o bien manteniéndola cinética en otro dispositivo diferente a las ruedas.

2. Funcionamiento

En este apartado, quizá el más importante de todo el trabajo, se explicará las diferentes clases del dispositivo existentes, el funcionamiento físico del mismo, sus implicaciones y su manejo.

2.1 ¿Qué es el KERS? Tipos: Eléctrico y Mecánico

A menudo, cuando nos encontramos conduciendo nuestros automóviles, nos vemos envueltos en situaciones de frenadas, que incluso a veces son de una tremenda brusquedad. En estas ocasiones, el vehículo sufre una deceleración o aceleración negativa. Esa aceleración se transforma en cada momento en energía.



Fig.3 Pasada de frenada de Lewis Hamilton. © FIA

En esas frenadas, el vehículo pierde velocidad y por tanto, también pierde *Energía Cinética* (recordemos que $E_c = 0'5mv^2$), que por el *principio de conservación de la energía*, se transforma en *Energía Térmica* a través de los frenos de carbono incandescentes; siendo de mayor magnitud esta “degradación” de energía en la Fórmula 1, dónde las frenadas son más violentas, alcanzando los discos de freno altísimas temperaturas. Los ingenieros del “gran circo”, ávidos de una constante mejora, siempre se habían preguntado cómo recuperar esa energía degradada.



Fig.4 Frenos de carbono incandescentes ante una frenada. © Renault F1 Team

La solución propuesta se basa en el uso de un *volante de inercia* o *flywheel*, que aprovechando el giro del diferencial trasero (que transmite el movimiento circular a los palieres) en las frenadas, gire a altas revoluciones almacenando energía cinética o bien, transformándola a energía eléctrica. La lógica nos induce erróneamente a pensar que lo que se hace es recoger el calor que emana de los frenos y convertirlo en electricidad, en realidad el sistema de recuperación de energía cinética propuesto en la Fórmula 1 se basa en dos ideas:

- I. Generación de energía eléctrica con la ayuda de un volante de inercia a partir de un dispositivo basado en una batería inercial y, que pueda funcionar como dinamo-alternador, o bien como motor eléctrico. Este sistema es el llamado *KERS eléctrico*.
- II. Almacenamiento de energía cinética en un volante de inercia, en condiciones de vacío, que aumenta su energía cinética en las frenadas al transmitirle el giro de la corona cónica de la transmisión trasera del monoplace y por tanto aumentando su velocidad de giro (y por tanto también su energía cinética). Al estar “al vacío”, puede mantener un estado de giro “casi perpetuo” debido a la inercia generada, que solo se pierde en fases de aceleración cuando la energía cinética de dicho *flywheel* retorna corona cónica (**ver Refs. 22 y 39**). Este sistema, es el llamado *KERS mecánico*. No transformando la energía cinética en eléctrica, y por tanto no necesita ningún tipo de motor eléctrico o batería.

En un principio, parecía que el sistema que iba a ser adoptado era el mecánico, por ser menos pesado que el eléctrico (5 kg frente a 20-35kg por la ausencia de baterías o motor eléctrico) y por ser más eficiente energéticamente (74% frente a un 34%), pero por problemas de complejidad conceptual y de dinámica vehicular, finalmente solo fue usado sobre la pista el sistema eléctrico, por ser en un principio, más sencillo de manipular y, por basarse en una tecnología sobre la que ya había mucho terreno recorrido. A partir de ahora, por esta última razón y por estar más relacionado con los contenidos de la asignatura, el presente trabajo se centrará en exponer el funcionamiento del KERS *eléctrico* así como su aplicación fuera de los circuitos de carreras.

2.2 *Funcionamiento interno*

El KERS eléctrico, que se basa los principios de funcionamiento (**ver Ref. 39**) de una batería inercial (**ver Fig. 5**), puede actuar como dinamo-alternador en fases de frenada, y como motor eléctrico de corriente continua en fases de aceleración.

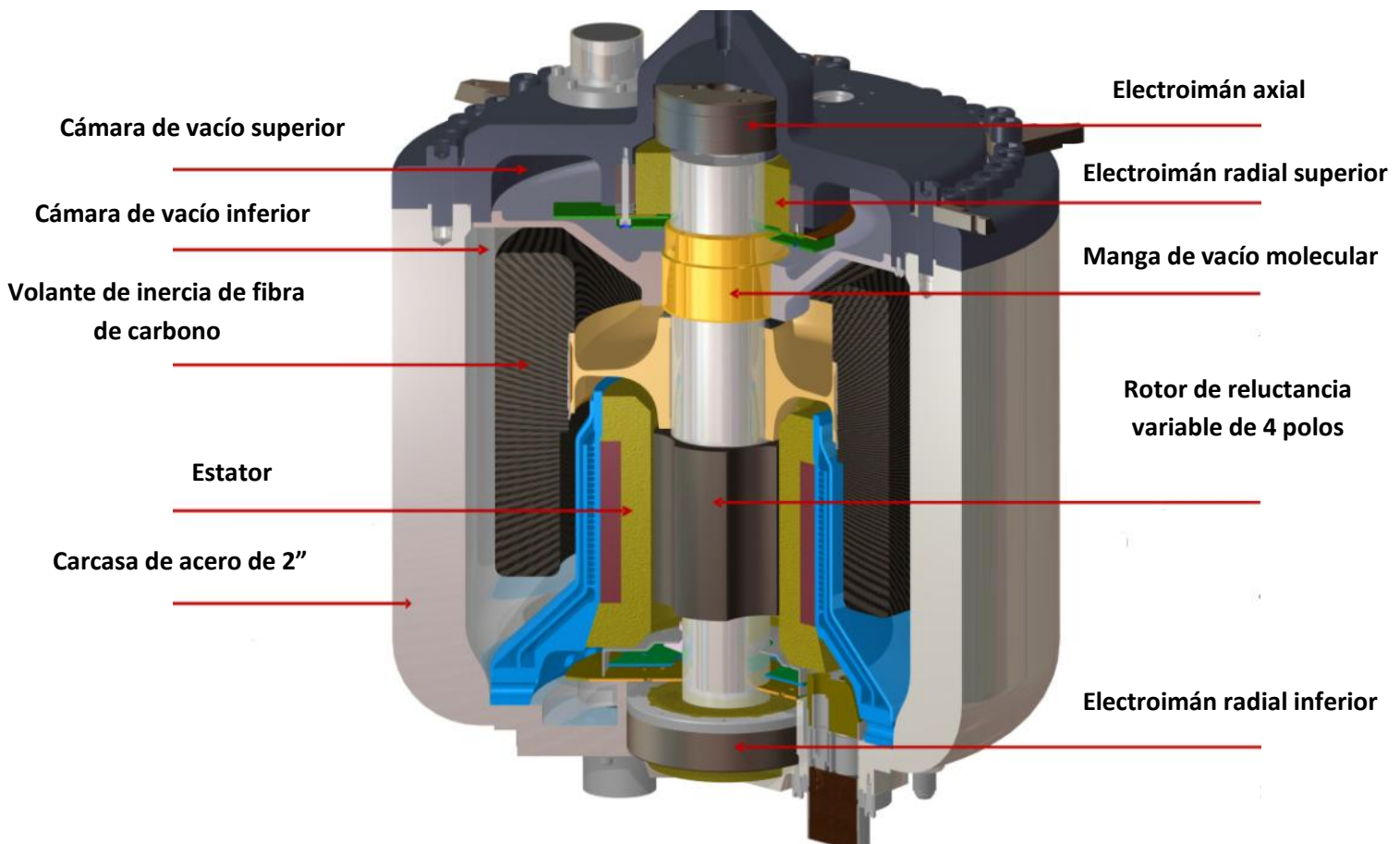


Fig.5 Interior de una batería inercial genérica

Pero a diferencia de la versión mecánica, el KERS eléctrico puede tener o no baterías químicas para almacenar energía. *Flybrid* (empresa pionera en el desarrollo del KERS) en colaboración con *Magnetti Marelli* desarrolló un dispositivo híbrido (**ver Fig. 6**) entre el eléctrico y el mecánico de 27kg (**ver Ref. 22**); esta versión del KERS almacena en una cámara de vacío, un volante de inercia que gira libre de rozamientos gracias a la energía cinética recuperada en las frenadas, que puede producir el giro de un rotor de reluctancia variable sobre un estator, generando corriente alterna que rectificada a continua, alimenta a un motor eléctrico.



Fig.6 KERS Híbrido desarrollado por *Flybrid* y *Magnetti Marelli*. © *Flybrid*

La versión eléctrica convencional se basa un motor eléctrico de continua que puede funcionar también como dinamo alternador, cuyo rotor gira gracias al movimiento transmitido por la corona cónica a la que está conectado gracias a un piñón cónico. Para favorecer el giro del rotor, también puede incorporar un volante de inercia, aunque no tiene mucho sentido por el peso y por un posible efecto giroscópico.

2.2.1 Obtención de energía

El KERS eléctrico “híbrido” ya queda explicado en el anterior punto que contiene a este sub-apartado; el convencional se basa en el funcionamiento de un motor eléctrico de continua que también puede funcionar de dinamo-alternador.

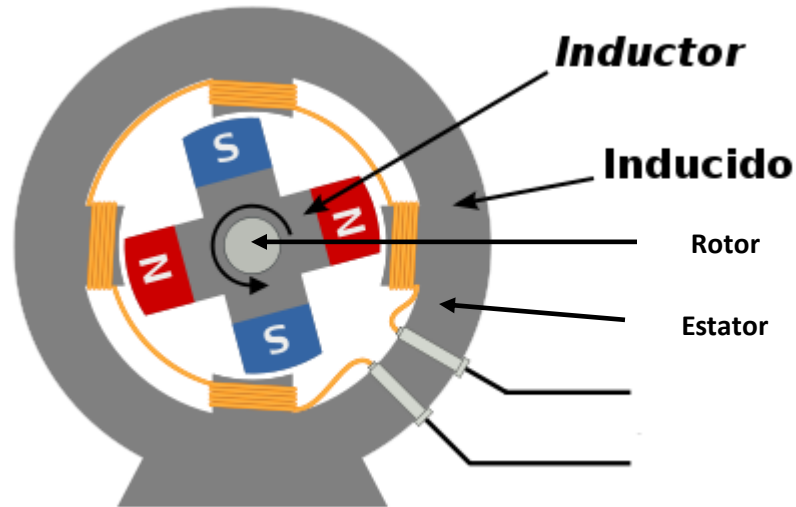


Fig.7 Alternador

El rotor, que es al mismo tiempo el inductor, es el elemento que gira en el alternador, gracias al movimiento giratorio recogido de la corona cónica, está conformado por un eje con un número par de polos magnéticos fijos; mientras que el inducido, que coincide con el estator, está compuesto por un grupo de polos magnéticos distribuidos de manera alterna con un bobinado en torno a un núcleo de un material ferromagnético.

Explicado de forma sencilla, el movimiento del inductor, gracias al piñón cónico de la salida del KERS, produce una variación de flujo magnético que atraviesa las espiras, generando una *Fuerza Electromotriz Inducida* que se refleja en una corriente alterna circulando por las espiras. En cambio cuando aplicamos una tensión continua sobre el inducido, se provoca un giro del inductor, produciéndose así un par de torsión.

En fases de aceleración, los dos diseños, han de desconectarse para que no generen más energía eléctrica o cinética de la permitida por la normativa, que la acota una normativa oficial que marca que sólo se puede obtener energía eléctrica en fases de frenada. Únicamente cuando el piloto presiona el botón de *P2P*, el motor eléctrico actúa en fases de aceleración, liberando la energía almacenada.

2.2.2 Componentes del KERS eléctrico

Tanto el eléctrico "híbrido" como el convencional están gobernados por una unidad basada en la electrónica de potencia, que bien puede estar integrada en la ECU, o estar alojada como un periférico gobernado por la centralita. Ambos están formados por un motor eléctrico de continua, sólo que en la versión híbrida no actúa como alternador, mientras que en la puramente convencional sí es capaz.

La principal diferencia, como ya se ha esbozado con anterioridad, está en el uso de baterías químicas (en este caso de ión litio) en el KERS “corriente” frente al almacenamiento de energía cinética en un volante de inercia; característica correspondiente de la versión híbrida.

2.2.3 Proceso de carga

Como ya se ha expuesto, cuando se recupera la Energía Cinética de las frenadas para transformarla en eléctrica, lo hacemos en forma de corriente eléctrica alterna, funcionando el KERS en modo alternador, pero, cuando funciona en modo motor, necesita corriente continua de las baterías del KERS. Por ello, es necesario hacer una conversión AC/DC (alterna-continua) como la haríamos cuando cargamos las baterías de ión-litio de nuestros móviles. (Ver Fig. 8)



Fig.8 Cargador/Convertor AC/DC de un teléfono móvil

Un método sencillo y explicativo, es el basado en un rectificador de onda completa (ver Ref. 30) mediante puente de diodos; filtrado mediante condensador y estabilización por zéner. (Ver Fig. 9)

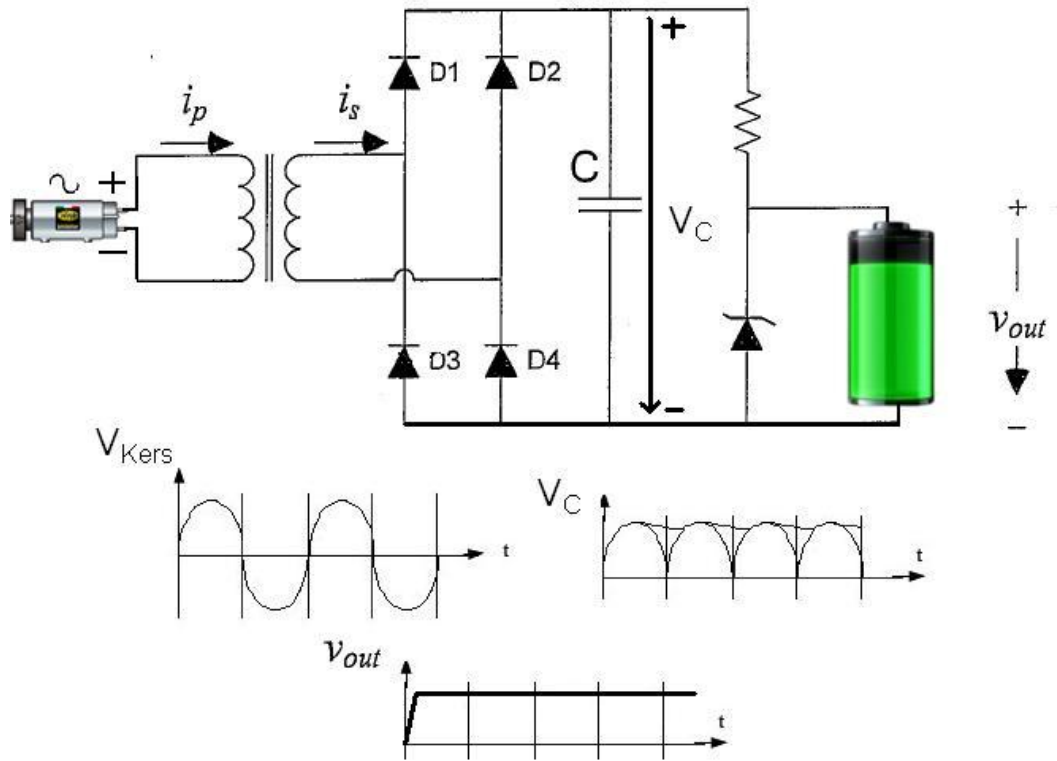


Fig.9 Conversor AC/DC

En los vehículos eléctricos generalmente, acoplado a un puente de diodos, se coloca un conversor DC/DC de tipo *Buck* (ver Ref.32 pág. 300).

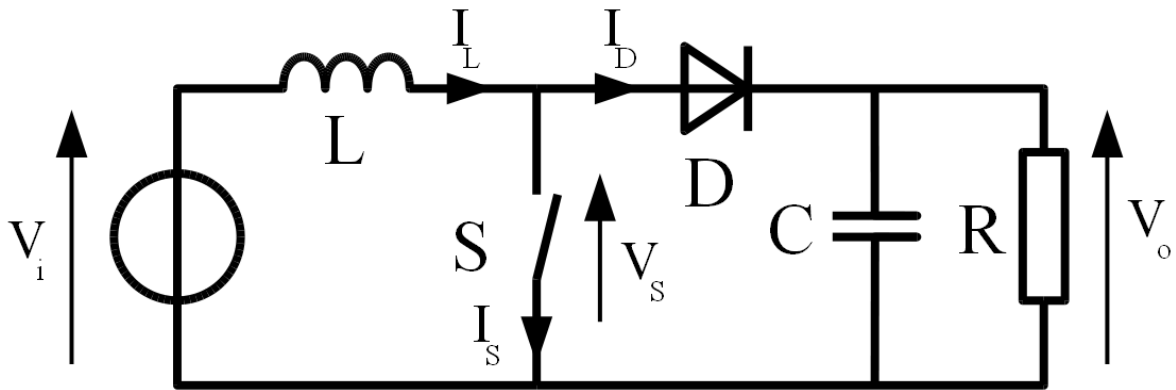


Fig.10 Conversor de tipo *Buck*

El interruptor *S* (ver Fig. 10) puede estar formado por un transistor bipolar, quizá más adecuado para sistemas que manejan altas tensiones, en vez de MOSFET que corren más peligro de fundirse con voltajes de una notable magnitud.

2.2.4 Entrega de Potencia

Desde que el piloto pulsa el botón de *Push to Pass* hasta que el KERS comienza a funcionar transcurren varias etapas (ver Fig. 11). No suceden los mismos fenómenos entre el volante y la ECU y entre ésta y el KERS. Todo el proceso ha de producirse en milésimas de segundo, teniendo en cuenta que a un fórmula 1, cambiar de marcha le cuesta en entre 25 y 30 ms.

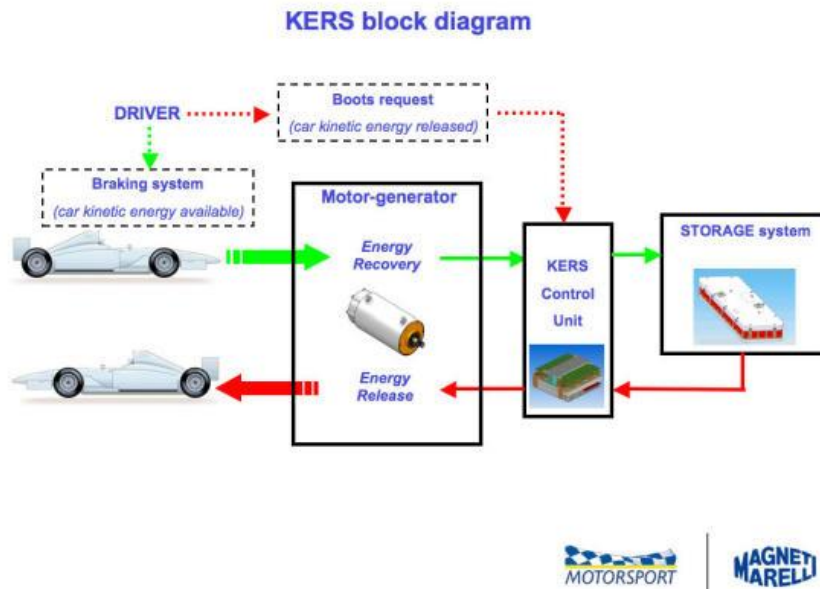


Fig.11 Esquemático del funcionamiento del KERS. © Magnetti Marelli

2.2.4.1 Del volante a la ECU

La primera, consiste en mandar una orden, desde el volante a la ECU, que ésta ha de interpretar. En función del nivel de entrega de potencia que queramos en el KERS, la CPU regulará el nivel de potencia que entregará el motor eléctrico; pero ¿cómo sucede todo esto?

En el momento que se presiona el botón de *P2P*, se activa en pulso de señal directo entre éste y la centralita electrónica, e inmediatamente la ECU comprueba con el sensor pertinente (ver Fig. 12), para así de esta manera, si todavía queda carga eléctrica almacenada, alimentar al dispositivo KERS en modo motor eléctrico o no, ya que su uso está limitado, como se verá más adelante, durante intervalo acotado según normativa FIA (ver Refs. 9 y 10).



Fig.12 Sensor de nivel de carga de una batería eléctrica. © McLaren Electronics

La siguiente pregunta a realizarse sería saber cómo se determina el nivel de potencia que ha de entregar el KERS. La respuesta a esta incógnita se ha de aclarar en dos pasos.

Primero, hay que conocer cómo la ECU determina ese nivel. Por lo general, todo los sistemas eléctricos controlados por un dispositivo electrónico, y a los cuales, podemos regular su potencia; son manipulados gracias a un *contador temporal de duración de pulso* (ver Ref. 34) (Lo lógico puede parecer pensar que funcionase con un potenciómetro como lo hace con un acelerador de un automóvil). Dicho dispositivo se basa en una línea que siempre permanece inactiva y que al pulsar el botón, automáticamente pasa a estado activo y en función del número de instantes de tiempo iguales que permanezca en este estado (ver Fig. 13), la ECU determina el nivel de potencia que ha de entregar al sistema.

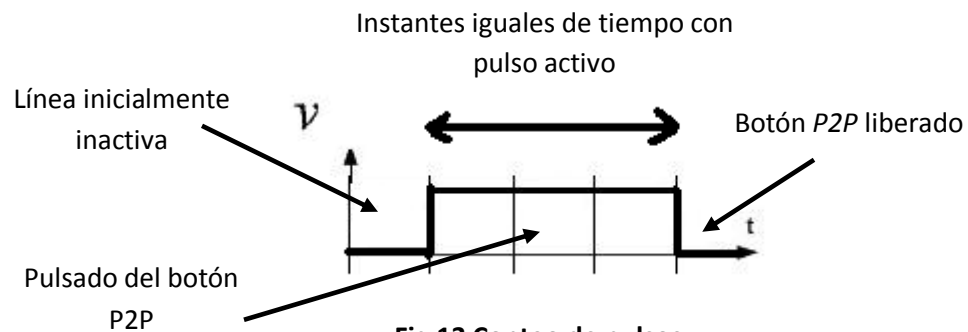


Fig.13 Conteo de pulsos

Este “conteo de pulsos” es usado en muchos de los electrodomésticos que tenemos en nuestras casas como: hornos, placas de vitro-cerámica, lavadoras, batidoras...De esta manera, una vez conocido el nivel de potencia que se quiere entregar en función de la duración del pulso (lo más corriente es mayor longitud del pulso, petición de mayor nivel de potencia), la centralita de control electrónico almacenar este valor en algún dispositivo de memoria temporal (registro de n-bytes, RAM...)

2.2.4.2 De la ECU al Motor Eléctrico

El segundo paso, y el más importante, se produce determinar realmente el nivel de alimentación del motor eléctrico de continua. Si en el punto anterior enfocábamos un concepto desde el campo de la *Electrónica Digital*, ahora hemos de explicar otro desde la *Electrónica de Potencia*.

Esta regulación de potencia la conseguimos mediante un *Troceador de Alimentación Continua Fija* (ver Fig. 14), que permite obtener una tensión variable aplicada al motor con el fin de regular su velocidad de giro (ver Ref.32 págs. 197-200).

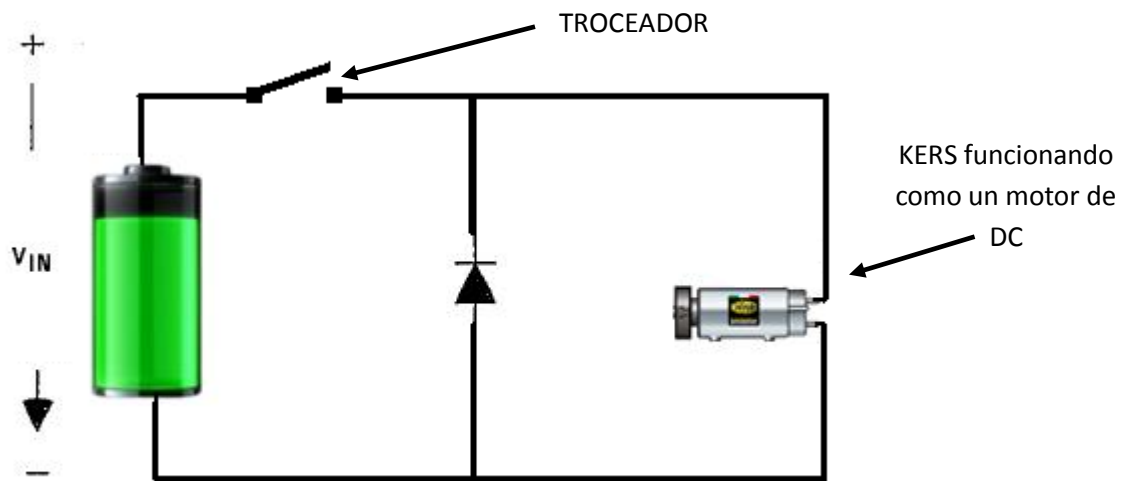


Fig.14 Principio de funcionamiento del Troceador de Alimentación Continua Fija

Cuando el interruptor cierra el circuito (conduciendo el troceador), el diodo se sitúa en modo OFF (no deja pasar corriente de cátodo a ánodo), circulando corriente desde la batería hasta el motor eléctrico. En cambio, al abrirse el interruptor (que se produciría en el instante en el que el piloto suelta el botón de P2P) se anula la tensión aplicada al motor y éste, a continuación, empieza a perder velocidad de giro.

Quien desempeña el control del *troceador* es la ECU (generalmente a través del algún periférico asociado a la misma, como en el KERS de *Magnetti Marelli* (ver Fig. 24)) que puede realizar la regulación de dos maneras:

- **Frecuencia constante:** El período (tiempo de duración de un ciclo de apertura-cierra del troceador), $T = 1/f$, puede mantenerse constante, mientras que la tensión que alimenta al motor se regular variando la duración de τ (tiempo que permanece cerrado el interruptor).
- **Frecuencia variable:** El período, $T = 1/f$, será variable; sin embargo, el intervalo temporal τ , durante el cual el interruptor permanece cerrado, no variará, manteniéndose fijo.

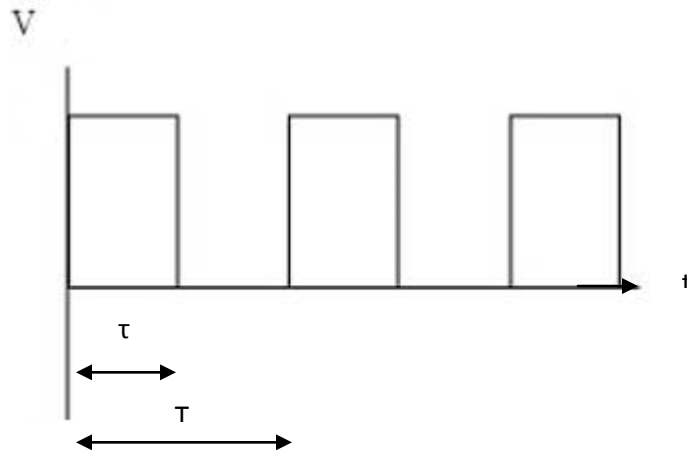


Fig.15 Onda de tensión que alimenta al KERS en modo motor

Para explicar con más detalle las características de los dispositivos troceadores (basado en tiristores) conviene consultar la bibliografía con más detenimiento (ver Ref.32 Págs. 200-207), por ser conceptos más avanzados de la *Electrónica de Potencia*, que pueden desviarnos de la temática general del trabajo.

Otro sistema más sencillo para controlar la velocidad del giro el KERS en modo motor, consiste en la variación de la tensión que lo alimenta, regulando el acoplamiento de resistencias variables conectadas en serie.

2.2.4.3 *Del KERS a la transmisión*

El KERS está conectado a la corona cónica (y ésta a su vez al diferencial), de la transmisión trasera, mediante otro piñón reductor cónico de pocos dientes, formando un *engranaje cónico hipoide* (ver Figs. 16,17 y 18), típico de los vehículos con propulsión (ver Ref. 35). Siendo este mecanismo muy adecuado para vehículos con un centro de gravedad bajo, como el de un Fórmula 1, manteniendo la característica estabilidad del vehículo. Además, la disposición helicoidal del dentado, permite un mayor contacto entre los dientes del piñón con los de la corona, obteniéndose una transmisión más consistente.



Figs.16, 17 y 18 Engranaje cónico hipoide formado por la salida del KERS y la corona cónica

La caja de cambios, al estar conectada de igual manera a la corona, y al estar situada en su otro extremo; tiene que girar necesariamente en sentido contrario al piñón de la salida del KERS; y conectado a la corona, en el lado opuesto, se encuentra el piñón del KERS; para que así se pueda mantener el sentido del giro de la corona. Ahora el problema nos surge cuándo se engrana la marcha atrás; en ese caso, el KERS dispone de un dispositivo de embrague (ver Fig. 20) que lo desconecta de la corona, también haciéndolo cuando el piloto se encuentra en fases de aceleración para evitar que el rozamiento mecánico afecte al avance del vehículo.

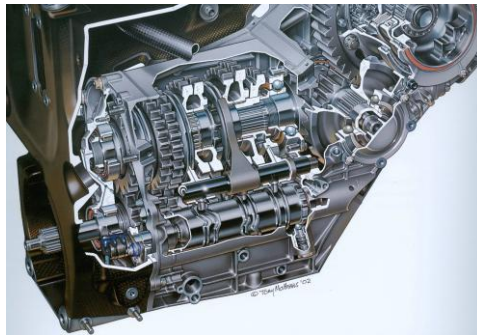


Fig.19 Caja de cambios de un Fórmula 1. © Tommy Mathews

La disposición híbrida, finalmente adoptada por los equipos y que menos afectaba al balance del coche, es la siguiente:

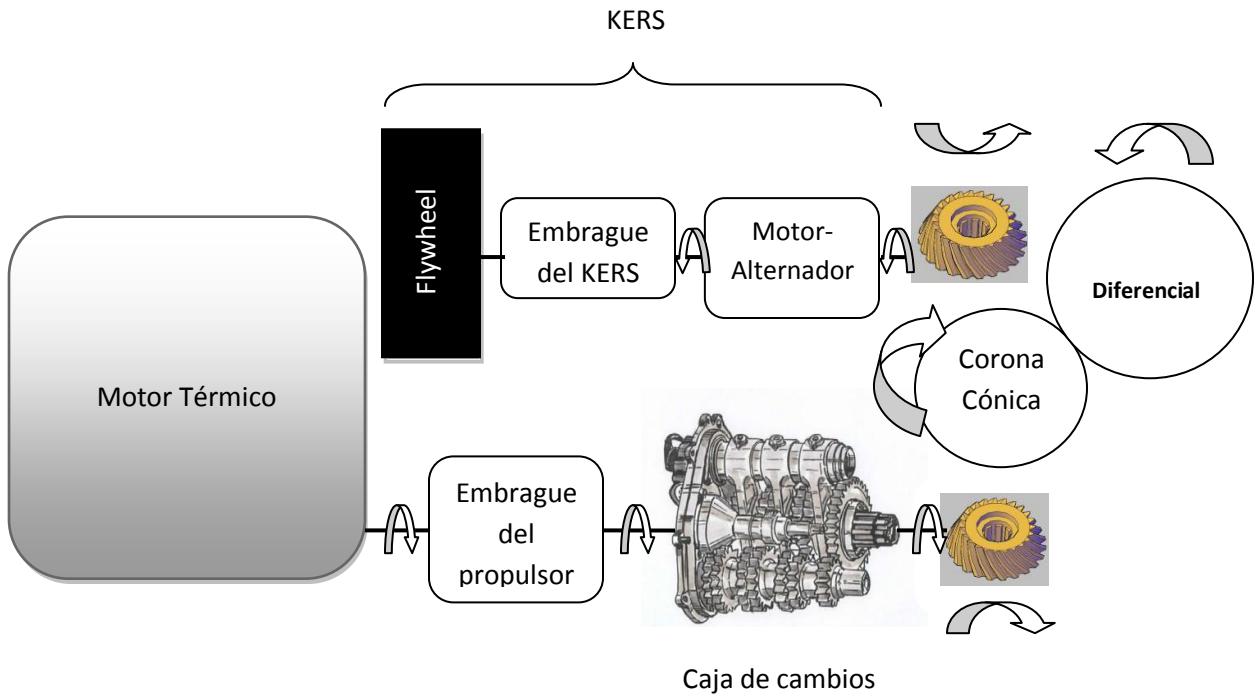


Fig.20 Disposición híbrida de un Fórmula 1. © Alberto Sáenz Gonzalo

Entre el embrague del KERS y su piñón cónico, se encuentra el variador, gracias al cual podemos regular la velocidad de giro del motor eléctrico. Resultando la velocidad de giro (al igual que en el resto de motores DC) del KERS determinada por la fórmula (ver Ref.32 y Fig. 21):

$$N = \frac{U - I \cdot r}{K \cdot \phi}$$

N = velocidad de giro del motor

U = tensión aplicada al motor (en V)

I = tensión del inducido (en A)

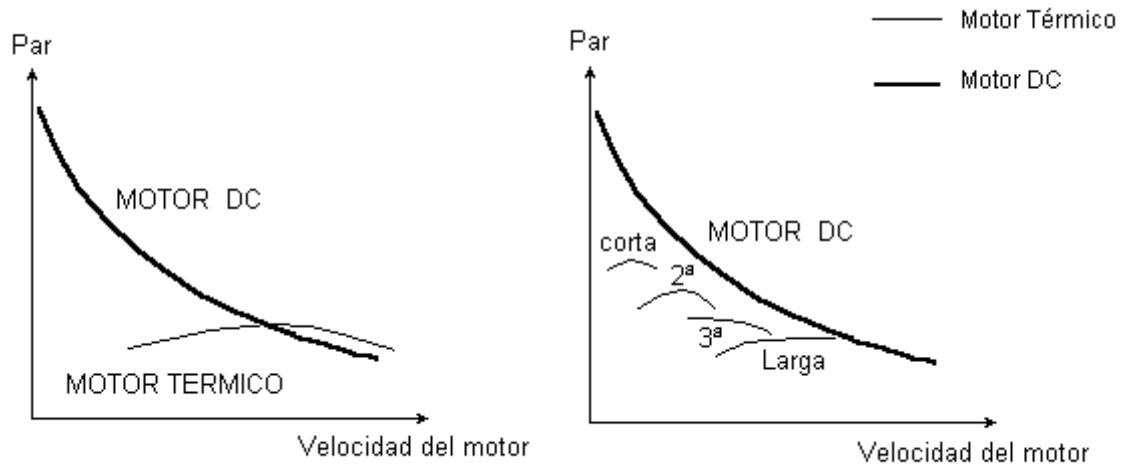
r = pérdida óhmica del motor (en Ω)

K = constante del motor para la fuerza electromotriz

Φ = Flujo magnético del inducido (en Wb)

Fig.21 Fórmula para determinar la velocidad de giro del KERS en modo motor.

En este sub-apartado, hay que aclarar que porque el KERS rinda 80CV y el V8 de 2.4l rinda 700CV, no significa que actuando juntos, el vehículo esté desarrollando 780CV de potencia. En las primeras fases de aceleración, el KERS desarrolla un par motor mayor que el motor térmico del monoplaça (característica de los motores DC eléctricos (ver Fig. 22)).



Figs.22 Curvas de par de un motor DC frente a un motor térmico (izquierda) y relación de marchas de un motor DC (derecha) © Emilio Larrodé Pellicer

Con lo que cuando el piloto pulse el botón de *P2P*, en la primeras fases de aceleración, si el par generado por el motor eléctrico es mayor que el del térmico, quien realmente está propulsando al vehículo es el KERS (esto sucede por encontrarse tanto el eje de la caja de cambios, como el piñón cónico del KERS, conectados a un mismo acople. Sucede en cierta parte incluso habiendo un sumador de pares) y no el motor térmico. Pongamos un ejemplo sencillo; imaginemos que nuestro coche se ha quedado sin batería, y en ese caso, no nos queda más remedio que arrancarlo a “empujón”; si nos ayuda nuestro hijo, o nuestro hermano pequeño, su ayuda es simbólica, quien realmente empuja al coche son los adultos. Trasladado a la Fórmula 1, en el momento que un dispositivo gire con más par, arrastrará al otro.

De este modo, es necesario un control de la ECU, que detecte en todo momento qué dispositivo está generando más par, para así no descargar inútilmente las baterías o gastar combustible de forma inútil.

2.3 Fabricación

Importantes compañías privadas de automoción se han unido al desarrollo del KERS, como proveedoras del sistema, pero también trabajando codo con codo con las escuderías conociendo de primera mano cuál era la evolución y rendimiento del dispositivo. En un principio, la primera compañía en desarrollar el sistema, fue la británica *Flybrid Systems* (ver Ref.22 y Fig.23) en colaboración con la también británica Torotrack.



Fig.23 KERS desarrollado por *Flybrid Systems*. © *Flybrid Systems*



Fig.24 KERS y periférico para su control. © Magnetti Marelli

La italiana *Magnetti Marelli* (ver Ref. 23), proveyó de este mecanismo (ver Fig. 24) a *Ferrari* y a *Renault*, sus competidoras tampoco se quedaron rezagadas. La alemana *Bosch*, por su parte, mediante un comunicado oficial (ver Ref. 24), anunció que iba a fabricar el sistema (ver Figs. 25 y 26) para diversas categorías como la F1, el DTM o las *Le Mans Series*. *BMW*, en pro de promocionar y dar apoyo a su tecnología híbrida *Efficient Dynamics*, aprovechando su experiencia, decidió fabricar su propio KERS.



Figs.25 y 26 Flywheel y ECU de BOSCH. © BOSCH

Por último, el que a la postre se reveló como el mejor de todos los dispositivos: el de *McLaren Mercedes*, que fue fabricado por la empresa de automoción británica *Zytek*; además, el equipo inglés jugaba con la ventaja de conocer mejor que nadie la actual ECU usada en los monoplazas, fabricada por su propio departamento de electrónica (ver Ref. 26), que gobierna el funcionamiento del KERS, además este departamento, tiene una amplia experiencia fabricando alternadores eléctricos.



Fig.27 Alternador fabricado por McLaren. © McLaren Electronics

2.4 Uso del KERS

Como se verá más adelante, la normativa fija que el manejo del *KERS* queda estrictamente ligado al piloto, siendo éste el único que lo puede accionar durante la competición. Obviamente, hubo que modificar los volantes de los monoplazas, introduciendo nuevos botones (ver fig. 28). Como ejemplo, mostramos el usado por Fernando Alonso en la temporada 2009.



Fig.28 Volante del Renault R29 © Renault F1 Team

En la esquina superior izquierda, en azul, se encuentra el botón de accionamiento del *Push to Pass*; el piloto lo pulsa para conseguir potencia extra; dependiendo de la duración del pulsado se produce una mayor o menor descarga de las baterías del sistema. El porcentaje del nivel de energía restante en las baterías se indica en el *display BCD* de cuatro dígitos (superior centro izquierda, al lado del indicador de marcha) cada vez que se pulsa el botón P2P. También se posibilita ajustar la cantidad de carga que se puede almacenar en cada frenada, regulada mediante la ruleta *KERS CHRG*; ya que hay que tener cuidado con la temperatura del dispositivo, puesto que si intentamos seguir cargándolo cuando el nivel de energía almacenado está al completo, pueden surgir problemas de sobrecalentamiento. Al igual que la cantidad de energía eléctrica que se puede almacenar, también es posible determinar la cantidad de potencia que rendirá el sistema; gracias a la ruleta *KERS REL*, esto se debe a que en condiciones de asfalto mojado o húmedo no es aconsejable hacer rendir al máximo al *KERS* por posible problemas de patinaje de ruedas, por no haber suficiente fricción en la pista.

3. Normativa

Un sistema tan complicado como este, al igual que otros campos de la ingeniería, necesita unas reglas bien definidas proporcionadas por un organismo oficial como la FIA. En la presente sección se procederá a explicar los párrafos más importantes que definen el correcto uso de este mecanismo.

3.1 Normativa FIA

La FIA ha elaborado una serie de normas que se encuentran recogidas en su reglamento técnico (**ver Refs. 9 y 10**):

Sobre el **reglamento de competición** en carrera (**ver ref. 9**):

Artículo 34.1 Parque Cerrado después de Calificación: *“...Una vez inspeccionado el vehículo, en el parque cerrado, por el delegado técnico de la FIA, el nivel de energía almacenado, durante la calificación, será respetado para la salida de la carrera, pese a ser retirado durante la noche...”*

Sobre el **reglamento de especificaciones técnicas** de la F1 (**ver ref. 10**):

Artículo 5.2.2 *“...Con la excepción de un KERS totalmente cargado, la cantidad total de energía recuperada y que se puede almacenar en el coche no debe exceder 300kJ. El ritmo de recuperación de energía cinética, en un instante, que sea mayor a 2 KW no debe exceder 20 KJ de carga en total...”*

Artículo 5.2.3 *“...La potencia máxima entregada por cualquier sistema KERS no deberá exceder los 60 KW. La energía liberada por el KERS, a lo largo de una vuelta no podrá exceder de 400 KJ. Las mediciones se tomarán en la conexión con el tren de transmisión de la rueda trasera...”*

Artículo 5.2.4 *“...La cantidad de energía almacenada en cualquier sistema KERS no podrá aumentar, mientras el coche esté parado durante un pit stop. La liberación de energía, de cualquier sistema de este tipo, debe permanecer bajo el control total del piloto en todo momento en el que el coche permanezca en pista...”*

Artículo 8.2.1 *“...Todos los componentes del motor: caja de cambios, embrague, diferencial y el sistema KERS, además de todos los actuadores asociados; deben ser controlados por una unidad de control electrónico (ECU), que ha sido fabricada por un proveedor designado por la FIA (McLaren Electronics)...”*

Artículo 9.9.1 *“...El sistema KERS debe estar conectado en cualquier punto en el tren de propulsión, antes que el diferencial...”*

Artículo 9.9.2 *“...El sistema será considerado cerrado cuando toda la energía esté contenida dentro del sistema KERS, y no se pueda darse una descarga de alto voltaje en cualquier parte externa al KERS. El proceso de desactivación no ha de exceder los dos segundos...”*

3.2 Precauciones

Como en cualquier otro ámbito profesional, en la Fórmula 1, hubo que desarrollar legislación para evitar los accidentes laborales. Para ello la FIA elaboró una serie de artículos y medidas preventivas.

Sobre el **reglamento de competición** en carrera:

Artículo 30.5 *“...Un conductor que abandone un coche, debe dejar el vehículo en punto muerto o con el motor desembragado, con el KERS cerrado y con el volante en su lugar...”*

Sobre el **reglamento de especificaciones técnicas** de la F1

Artículo 9.4 *“...en caso de avería, el coche debe de disponer de un dispositivo instalado que permita la desconexión del KERS...”*

Artículo 9.9.3 *“...Debe ser posible apagar el sistema KERS a través de los siguientes medios:*

- ➔ *El conductor, sentado normalmente, con los cinturones de seguridad abrochados y el volante en su lugar, debe ser capaz de cortar los circuitos eléctricos para el encendido, todas las bombas de combustible y la luz trasera, por medio de un interruptor. Este interruptor debe estar situado en el salpicadero y debe estar claramente marcado con un símbolo en color rojo...*

Artículo 9.9.4 *“...El KERS debe desactivarse cuando la ECU activa el sistema anti-calado...”*

Artículo 9.9.5 *“...Todos los vehículos deberán estar equipados con señalizaciones y una luz que indiquen el estado del KERS:*

- *Esté en funcionamiento durante todo el evento, aunque los principales sistemas hidráulicos, neumáticos o eléctricos en el coche hayan fallado...”*

“ ...

- Luzca con un color verde en caso de que el sistema KERS se apague.
- En caso de que el automóvil no se encuentre encendido, las luces indicadoras del KERS han de tener alimentación al menos durante 15 minutos.
- Debe existir una señal de “Alto Voltaje”...” (Ver Fig. 29)



Fig.29 Señal de Alto Voltaje en el Ferrari F60. © FIA

Además, los equipos han creado un sistema de símbolos, más o menos estándar, para advertir a los mecánicos y comisarios, para conocer cuándo tocar un coche es seguro y cuando supone un peligro para la integridad física; dicho sistema, se basa en señales de colores para advertir cuando el KERS está cargado (ver Fig. 31), y por tanto es peligroso la manipulación del coche o cuando no hay ningún tipo de riesgo (ver Fig. 30).

KERS descargado por lo que el coche puede ser tocado de forma segura.



Fig.30 Indicador de KERS descargado. © FIA

KERS cargado, el coche no puede tocarse en este estado.



Fig.31 Indicador de KERS cargado. © FIA

Y por si no fuera poco, es obligatorio el uso de guantes aislantes homologados, sobre todo para estado de precaución (**ver Fig. 32**), por parte del personal nombrado anteriormente. Comisarios, mecánicos, e incluso personal médico; deberán llevarlos puestos para protegerse de posibles descargas al entrar en contacto con el coche. Esta medida no fue muy bien aceptada por la asociación de pilotos (*GPDA*), ya que criticaban la posible limitación para el personal médico en caso de accidente (**ver Ref. 11**).



Fig.32 Mecánico de Renault enfundándose los guantes obligatorios para manipular un monoplaza con KERS. © FIA

Debemos darnos cuenta que, como indicó Bob Bell, *Team Principal* de *Renault F1*, se trata de descargas de varios cientos de voltios y una corriente de más de 10 *Amperios*, lo que puede ser letal; es más, estamos hablando de corriente continua, por lo que en caso de accidente, no es posible soltarse, a diferencia de la corriente alterna de los hogares (**ver Ref. 12**). Después de ver todas las precauciones a tomar, el sistema KERS provoca más de un quebradero de cabeza.

4. Problemas con el KERS

Como era de esperar, han sucedido varios problemas y accidentes durante el desarrollo y actuación del mecanismo; pasando desde la electrocución hasta los incendios.

4.1 Electrocción

Un sistema que produce tales cargas de electricidad, puede ser muy peligroso para las personas, por eso como ya se ha explicado, existen normas para el manejo dicho sistema. En este apartado, se detallará uno de los sucesos más controvertidos relacionados con el *KERS*.

Durante los test de 2008 para el desarrollo del *KERS*, Christian Klien, piloto de pruebas de *BMW-Sauber*, dio tres vueltas al circuito de Jerez a bordo del *BMW F1.08*, equipado con una versión preliminar del *KERS* y regresó a boxes. Cuando uno de los mecánicos tocó el automóvil (**ver Fig. 34**), recibió una fuerte descarga eléctrica que lo dejó tendido en el suelo.

Afortunadamente, las heridas que sufrió en su mano y brazo fueron leves. En ese momento BMW detuvo sus pruebas mientras se investigaban las posibles causas del suceso, que podría deberse a algo tan sencillo como un deficiente sistema de conexión a tierra; derivando a tierra la carga gracias al efecto masa creado por el cuerpo del mecánico con la tierra, creándose así una diferencia de potencial.



Fig.33 Incidente del mecánico de BMW. © Sutton

Más tarde, el equipo *BMW-Sauber* confirmó que la descarga eléctrica se debió a un pico de *Corriente Alterna* entre los puntos de contacto (ver Ref. 13). El director del departamento de *Mecanismo de Transmisión* de BMW, Markus Duesmann, explicó que el mecánico sufrió la descarga eléctrica "después de tocar el lateral del monoplaza y el volante".

La nota oficial emitida por el equipo bávaro, ante los hechos acontecidos (ver Fig. 33), consistió en el siguiente comunicado (ver Ref. 13):

"Se produjo una alta frecuencia de voltaje AC entre esos puntos de contacto, cuya origen estuvo en la unidad de control KERS y en un acoplamiento capacitivo esporádico de la red de alto voltaje a la red de 12 voltios. El voltaje pasó por la instalación eléctrica de la red de 12 voltios al volante y por el chasis de carbono de vuelta a la unidad de control".



Fig.34 Mecánicos el equipo BMW-Sauber metiendo el monoplaza al box del equipo ©FIA

El equipo alemán también explicó que en ningún momento el piloto y el mecánico estuvieron en peligro, pues "sólo una pequeña cantidad de energía puede pasar por ese efecto de acoplamiento capacitivo. Aún así, la energía es suficiente para causar una reacción muy dolorosa. El piloto estaba aislado del coche por su mono y guantes, y por ello no corrió ningún peligro". Además en cuanto a la seguridad del mecánico, tuvo suerte de que el pico de tensión fuese de alterna, pudiéndose soltar en el acto, en cambio si hubiera sido de continua podría haberse quedado fijado al coche, pudiendo haber sufrido consecuencias mucho peores.

Este hecho aislado permitió avisar al resto de equipos de la necesidad de proteger a sus mecánicos y pilotos del peligro que el KERS podía producir sino se trataba con la máxima precaución. Siendo de esta manera, totalmente indispensable, la toma de medidas para la prevención de riesgos laborales. Un claro ejemplo de ello, es el uso de guantes aislantes.

4.2 Incendio en la fábrica de Red Bull

En Julio de 2008, saltaron todas las alarmas en la fábrica de *Red Bull Racing* (ver Fig. 35), por la evacuación repentina de la fábrica debido al incendio y emanación de gases peligrosos debidos a la manipulación de las inestable baterías *ión-Litio* del KERS. Hasta cuatro unidades del Cuerpo de Bomberos de Milton-Keynes tuvieron que acudir para sofocar el incendio. Christian Horner, *Team Principal* del equipo, aseguró en declaraciones a la revista *Autosport*, que no le terminaba de convencer la idea de colocar un dispositivo de alto voltaje tan cerca del tanque de combustible de un F1.



Fig.35 Fábrica de *Red Bull Racing* en Milton-Keynes (Reino Unido). © Red Bull Racing

4.3 Incendios y averías en pista

Los técnicos del *Departamento de Ingeniería Eléctrica*, de cada uno de los equipos ya advirtieron la posibilidad de riesgo para los pilotos y de incendios en carrera probablemente provocados por el KERS.

Como medida de precaución, se advirtió a los pilotos, que en caso de avería o fallo en el sistema de *Recuperación de la Energía Cinética de la Frenada*, debían saltar del coche con los dos pies a la vez, evitando poner un pie en tierra, mientras así el otro permanecía en el monoplaza; de este modo se evita el siguiente efecto (ver Fig. 36) en caso de descarga estática provocada por el KERS:



Fig.36 El piloto hace de circuito entre el coche y tierra

Por el cual, si existe una carga estática significativa en el coche, al poner el piloto un pie en tierra, y permanecer el otro en el vehículo, podría crearse una diferencia de potencial circulando corriente a través del cuerpo del piloto. Pretendiéndose evitar fenómenos parecidos a los del mecánico de BMW.

La primera alarma saltó en los tests invernales de Jerez en Febrero de 2009. Sebastian Vettel, vio como su vehículo se detenía en mitad de la pista con el indicador de fallo de KERS encendido, por lo que se vio obligado a abandonar el vehículo saltando con los dos pies en el aire (ver Fig. 37).



Fig.37 Sebastian Vettel abandona el monoplaza saltando con los dos pies. © Sutton

Aunque en esta ocasión no sucedió nada afortunadamente, y todo resulto ser una falsa alarma. En cambio, en el GP de Malasia de 2009, un cortocircuito en el sistema, unido a las duras condiciones de calor y humedad del lugar junto con la inestabilidad de las baterías de Ión-Litio causaron un incendio en el monoplaza y nuevamente, el piloto, esta vez el finlandés Kimi Raikkonen, tuvo que saltar con los dos pies en el aire (**ver Figs. 38 y 39**). Este incidente demuestra la susceptibilidad del sistema a condiciones extremas.



Figs.38 y 39 Abandono y posterior incendio del Ferrari de Kimi Raikkonen. © Sutton

4. 4 Balance del coche

Como el resto de componentes del monoplaza, el KERS también posee una masa y volumen, que según se distribuyan, también afectarán a la dinámica vehicular del bólido. Para comenzar, la masa total del dispositivo supone un lastre que produce una penalización de 1 s/vuelta. En un principio, no tiene mucho sentido correr con él cuando es posible conseguir los mismos tiempos sin necesidad de instalar este mecanismo y, los riesgos que entraña su funcionamiento para el resto del monoplaza y el personal correspondiente: mecánicos, comisarios, pilotos y personal médico.

Además para la temporada 2009, la FIA decidió bajar el peso mínimo de los vehículos con el piloto a 600Kg, medida que favoreció a los equipos que no incorporaron el KERS. Esta decisión produjo un gran descontento entre las otras escuderías que sí decidieron equiparlo, de hecho, BMW, mediante una protesta formal (**ver Ref. 15**), pidió que se aumentara la masa mínima de cada bólido hasta los 650Kg para que aquellas escuderías que no equiparan el ingenio, llegaran al peso mínimo exigido con lastres de plomo colocados por distintas zonas del vehículo. No sólo eso, sino que todavía más, las escuderías con KERS, pese a colocarlo en un punto de gravedad bajo, todavía tienen que instalar lastres de 25 Kg para estabilizar el reparto de pesos en el tren delantero.

El reparto de potencia de la frenada, normalmente y en casi todos los circuitos, es de un 58% en el tren delantero y un 42% en el trasero; por ello lo lógico sería colocar el *Flywheel* en la parte delantera, pero no tiene mucho sentido, debido a las dificultades de espacio, y además se desequilibraría el balance de pesos del coche así como la estabilidad de la frenada en el frontal del F1. De esta manera, aunque las frenadas sean menos violentas en la parte trasera, al disiparse menos calor, no queda más remedio que instalarlo en el tren trasero por temas de dinámica vehicular (ver Fig. 40).

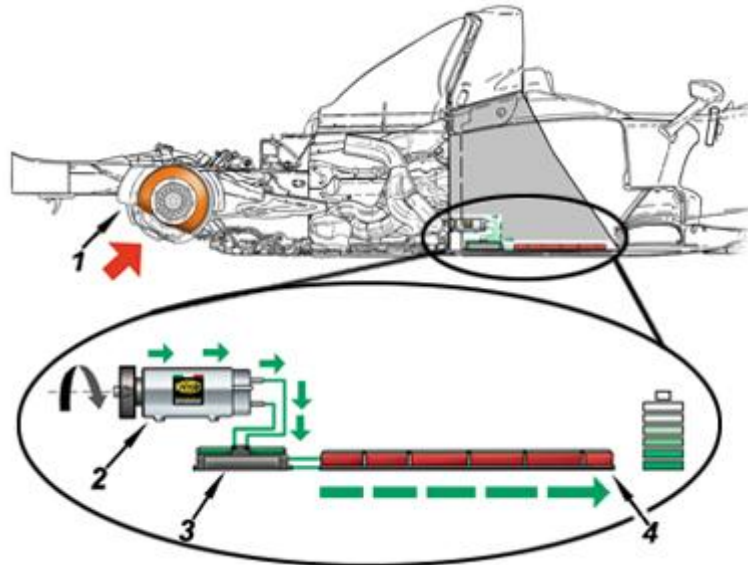


Fig. 40 Recuperación de la Energía Cinética del tren trasero. © Magneti Marelli

Con lo que el sistema ya parte con la desventaja inicial de no funcionar de la manera más óptima posible.

Otra de las desventajas que afectan al uso del KERS es el *efecto giroscópico* (ver Ref. 27), provocado por el *flywheel* del sistema. Ya que al fin y al cabo, un volante de inercia (ver Fig. 41) es un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje de rotación. Cuando se le somete a un momento de fuerza, el eje de rotación tiende a cambiar su posición de forma paradójica.

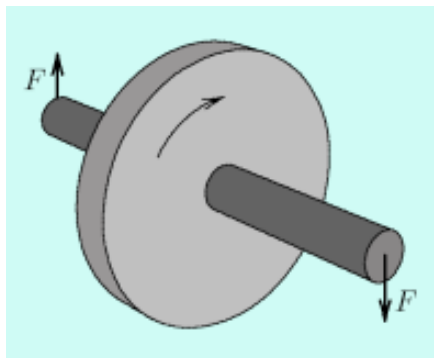
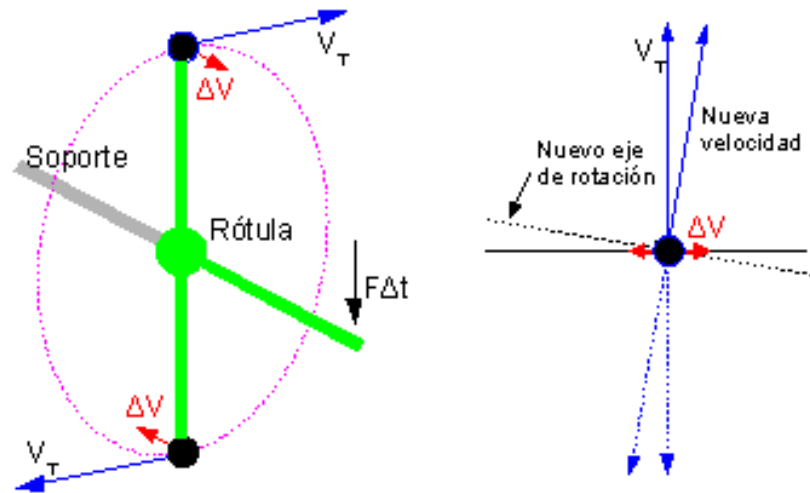


Fig.41 Flywheel girando

Veamos un sencillo ejemplo (**ver Figs. 41 y 42**), supongamos que tomamos dos puntos de masa (**en negro**) del volante de inercia, ambas sujetas por una barra en forma T (en verde) de masa despreciable y de total rigidez al eje de rotación. El movimiento circular se produce gracias a una rótula en medio del eje que permita a la T girar sobre cualquier eje.



Figs.42 Efecto giroscópico

Las masas giran en el sentido indicado con una velocidad tangencial V_T ; si en el momento que se encuentran en la posición mostrada en la figura (**ver Fig. 42**) aplicamos una pequeña fuerza hacia abajo sobre el extremo horizontal de la T, vemos que aparece, perpendicular al vector de la velocidad tangencial, una nueva y pequeña componente de velocidad ΔV , que calculando la resultante obtenemos (**ver Fig. 42**) un nuevo vector resultante de velocidad hacia la derecha y hacia fuera.

Imaginemos pues, que se pueden producir problemas de sub-viraje o sobre viraje en ciertas curvas (dependiendo de las características del circuito) escupiendo el monoplaza hacia fuera o hacia dentro de una curva. Además de su posicionamiento vertical, que finalmente fue el adoptado, Williams estudió el uso de un volante de inercia (**ver Figs. 43 y 44**) girando en posición horizontal, pero no llegó a usarse por dudas de un mayor efecto giroscópico pudiendo, como algunos catastrofistas pronosticaban, “hincar” o hacer “despegar” el vehículo durante su funcionamiento, y además sobre un centro de gravedad alto, detrás del reposacabezas del piloto.

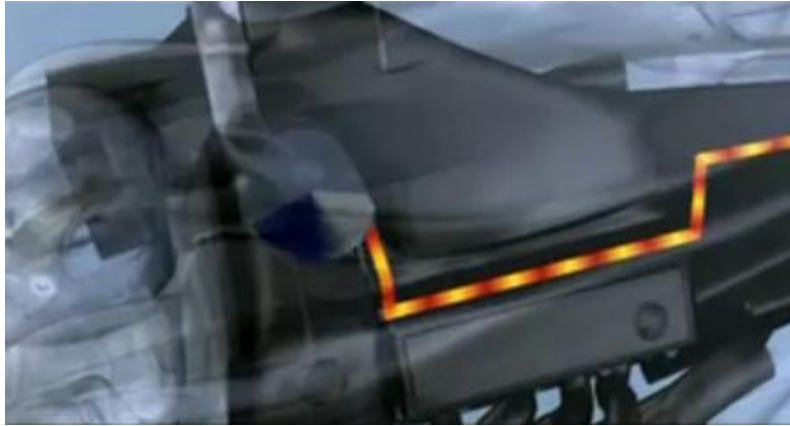


Fig.43 Flywheel de Williams F1 girando en posición horizontal. © Williams F1 Team

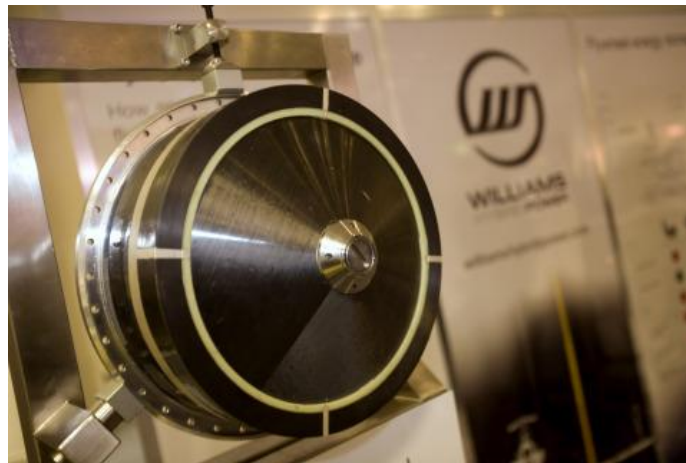


Fig.44 Flywheel de Williams © Williams F1 Team

Se pueden hacer cálculos previos sobre el papel, previamente estimando la geometría de un trazado, pero ¿qué podemos hacer en curvas como *Eau Rouge*? Ésta (**ver Ref. 29**) es una curva ciega con un más de un 10% de desnivel y que se pasa a 320 Km/h y que además hace un zigzag (**ver Fig. 45**), entonces, ¿qué tenemos que vencer? ¿sobre-viraje, sub-viraje, hincado, despegue? En cualquier caso, como el efecto giroscópico acaba dependiendo de la masa y de la velocidad de giro, los ingenieros encargados de desarrollar este sistema, se cubrieron las espaldas creando un flywheel no demasiado pesado combinando el acero y la fibra de carbono (**ver Ref. 22**).



Fig.45 Fernando Alonso superando la curva de Eau Rouge, GP Bélgica 2006. © FIA

Pese a no poder estimar a priori el efecto giroscópico sobre la dinámica de un Fórmula 1; sí podríamos mejorarla con apoyo aerodinámico y el control de tracción, para evitar los efectos del sub/sobre-viraje, pero coincidiendo con la introducción del KERS en la F1; también se introdujo la reducción aerodinámica (ver Fig. 46) y la eliminación del control de tracción en 2008 (ver Fig. 47).



Fig.46 Reducción aerodinámica 2009. Ferrari F2008 vs F60 © Ferrari

De esta manera, unida a la crisis económica, el *Sistema de Recuperación de la Energía Cinética*, entró a formar parte de la Fórmula 1 en uno de los peores momentos posibles.

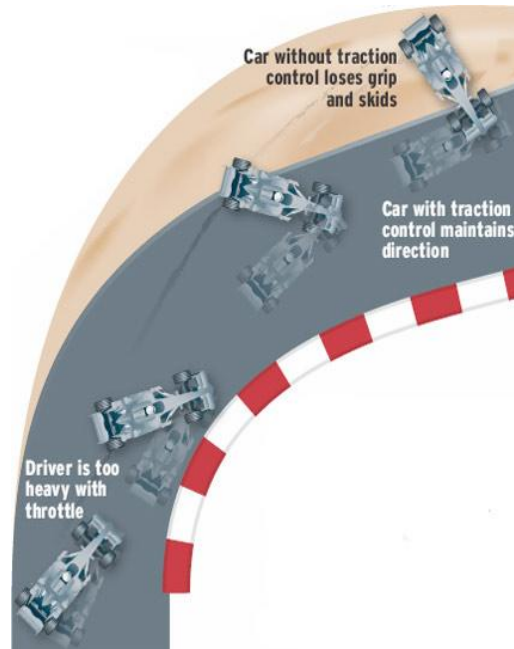


Fig.47 Efectos de un F1 sin control de tracción ante una conducción descuidada

5. Futuro del KERS

En este punto, analizaremos cuál es el futuro del KERS tanto dentro como fuera de las pistas, presentando un panorama más o menos favorable dependiendo de su campo de actuación.

5.1 Descartado por la FOTA

La *Asociación de Equipos de Fórmula 1 (FOTA)* anuncio en el GP Japón de 2009, mediante una rueda de prensa, un pacto de caballeros por el cual, ningún equipo usaría en sus monoplazas el *Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética*. (**Ver Ref. 16**)

Entre las razones argumentadas, destacan el escaso beneficio obtenido en carrera, la falta de consenso entre los equipos para introducir el mecanismo, la mala coyuntura económica y el haber sido “obligados” a utilizar el *KERS*.

Pese a todo, la *FIA* sigue manteniendo una puerta abierta a este sistema, y su uso sigue recogido en el reglamento para 2010.

5.2 Otras competiciones

Aunque pueda parecer lo contrario, el *KERS* no es patrimonio exclusivo de la Fórmula 1, se ha investigado su introducción en otras disciplinas del deporte del motor, como el mundo de las dos ruedas, o las pruebas de resistencia.

5.2.1 Motociclismo

La introducción del sistema KERS en motocicletas de competición, se produjo por parte de Harald Bartol, *Director Técnico* de *KTM Road Racing*. Se pudo ver en el Gran Premio de 125cc de la Comunidad Valenciana del año 2008 (**ver Ref. 17**), donde el piloto japonés Tomoyoshi Koyama partiendo de la posición 15ª, adelantó 10 puestos antes de la primera curva gracias al novedoso sistema KERS.

Una de las limitaciones que de momento está tratando de solucionar KTM, es que el sistema KERS sólo funciona a partir de la tercera marcha y en determinadas zonas del circuito seleccionadas previamente. Además cuando entra en funcionamiento provoca que la moto sea muy inestable y el freno motor que simula hace que la rueda trasera patine con demasiada facilidad.

Este sistema supone una gran ventaja para los pilotos que tienen que llevar lastre en la moto para alcanzar el peso mínimo, ya que podrían sustituir el lastre por el sistema KERS que además le suministraría 3 CV de potencia extra.

El mecanismo lleva siendo estudiado desde 2003 por KTM (tan pronto o incluso antes que en la F1) y no se descarta que en un futuro sea usado en el resto de categorías o incluso en motos de calle.

5.2.2 Peugeot y Le Mans

Donde el KERS está siendo un auténtico éxito es en el *Peugeot 908 HY* de las *Le Mans Series*. Se optó por desarrollar el coche con un motor Diesel V12, sumado al sistema de frenado regenerativo KERS (**ver Ref. 17**).

Este último sistema se sabe que tendrá una potencia de 60kW e ira ubicado entre el motor HDI V12 y la caja de cambios en contacto con ambos, para la suma de ambos pares. Llevará un sistema de almacenamiento de 600 células de iones de Litio formando un conjunto de baterías de 10 packs. Dichos packs irán en la falsa plaza de copiloto (6 packs) y en el plano inferior del coche de la parte lateral izquierda (4 packs). La centralita electrónica que controla el sistema irá colocada detrás de la rueda delantera izquierda. El tiempo de carga de las baterías será de entre 20 y 30 segundos.

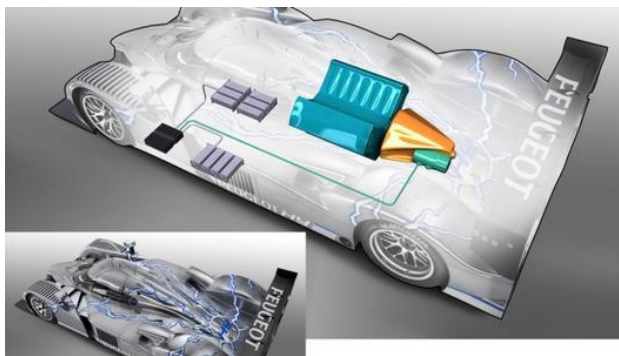


Fig.48 Distribución del sistema KERS Peugeot 908 HY. © Peugeot

El gran logro de Peugeot es que dicho prototipo puede funcionar de varias formas:

- i) De forma automática, apoyando al motor cuando se detectan recuperaciones o aceleraciones tras haber decelerado, ahorrando esfuerzo extra al motor térmico, y por tanto consumo de combustible, de gran importancia en las pruebas de resistencia. Es el modo más inteligente y autónomo, pues va actuando en mayor o menor medida, a pleno rendimiento o parcialmente según lo que el piloto requiera del coche en su pilotaje normal. Además, de esta manera, gracias al control de la ECU se evita que el sistema nunca permanezca ocioso, apoyando en todo momento al motor térmico.
- ii) Según el piloto lo necesite. En esta circunstancia el motor entregará 80 CV extra, que podrán ser utilizados en adelantamientos o rectas.
- iii) Recorrer el *Pit-Lane* en los repostajes solamente con el motor eléctrico. De tal forma, en los 20-30 segundos que invierten tan sólo en entrar y recorrer el pit a unos 80 km/h, y nuevamente no se consuma más combustible.

Con este sistema Peugeot da un gran paso en la utilización del KERS y da pie a que en otras competiciones también se aproveche la idea.

5.3 Coches de Calle

Conocido el coste de desarrollo de este sistema, es necesario saber cómo se va a amortizar. Una de las principales razones por la cual los grandes fabricantes, del sector de la automoción, compiten es por aplicar los descubrimientos de estas “fórmulas” a sus coches de calle; que es dónde realmente se obtienen los verdaderos beneficios.

5.3.1 *Efficient Dynamics* BMW

El fabricante de automóviles alemán BMW, ha diseñado una gama de coches para la venta al público que incluyen un sistema similar al KERS. El llamado *Efficient Dynamics* (ver Ref. 19) basado en la tecnología *Brake Energy Regeneration*. Se acciona el alternador que recarga la batería cuando se levanta el pie del acelerador (freno regenerativo aprovechando el freno motor) o se pisa el pedal del freno, donde se pierde Energía Térmica o degrada, que en ambos casos no es sino energía cinética residual transformada en eléctrica. De esta forma se produce electricidad sin consumir combustible para luego poderla usar.

Ya ha salido a la venta varios turismos que equipan esta ventaja, e incluso BMW está desarrollando el prototipo *Vision Efficient Dynamics* (ver Fig. 49), un prototipo que reúne tecnología híbrida en una carrocería y chasis totalmente deportivos. El BMW *Vision Efficient Dynamics*, equipa un sistema, basado en dos motores eléctricos que rinden hasta 80CV y 34 CV respectivamente, y un diesel tri-cilíndrico con un cubitaje 1,5L de 163cv potencia y que entrega un par motor 290Nm.

Trabajando los 3 motores a la vez, la potencia desarrollada es de 356cv y 800Nm de par máximo. A lo que hay que sumar un increíble consumo de 3,76 L/100Kmh y una emisión de CO₂ 99 g/Km.

Además del *frenado regenerativo* y el enchufado de las baterías a la red eléctrica, este modelo incluso genera electricidad a partir del calor de los gases de escape mediante un generador eléctrico de 200W.



Fig.49 BMW Vision Efficient Dynamics. © BMW

No se descarta que nuevos coches de calle vayan incluyendo el sistema KERS a un nivel más bajo que el visto en la F1. Peugeot parece que también lo montará en futuros coches.

5.3 .2 Ferrari f450

No solo BMW ha incorporado a sus coches de calle las ideas plasmadas en el KERS. Incluso la marca del *Cavallino Rampante*, ha incorporado esta tecnología a sus deportivos de calle. El modelo que ha recibido el conocimiento sobre el KERS desarrollado en la F1 es el nuevo modelo que será lanzado en 2010; el *f450* (ver fig. 50).



Fig.50 Ferrari f450 © Ferrari

En este vehículo se han conseguido cifras increíbles para un coche de la gama *Gran Turismo*; todo ello gracias a la hibridación, por lo que este coche tiene un consumo mixto de 13,3l. Puede parecer excesivo para un coche de calle, pero si tenemos en cuenta que se ha mejorado la eficiencia energética de los bólidos rojos en un 50%, y que cuenta con un motor térmico que rinde 520 CV, gracias a un propulsor cuya configuración es de V8, con una cilindrada de 4500 cm³ (**ver ref. 20**).

5.3.3 Abandono Desarrollo = Descartado en coches de baja gama.

Que los constructores de F1 descarten el uso del sistema KERS supone un gran traspie para un futuro uso de este sistema en coches de calle. Ya que si es verdad que coches como el BMW Efficient Dynamics y el Ferrari F460 lo incorporan, podríamos considerar a estos como coches de gama alta. Ya que su precio va de 30.000€ en adelante.

Ahora mismo el KERS es concebido como un sistema auxiliar que puede ayudar al motor térmico en momentos puntuales, pero con el abandono del desarrollo de este sistema se está perdiendo una gran oportunidad para conseguir energía que a día de hoy se desaprovecha. Energía que se podría usar en exclusiva tanto para propulsar, o para sistemas auxiliares.

Aunque el abandono provisional de este sistema por los equipos F1 no supone la desaparición de éste, ya que como hemos visto, se está desarrollando para otras competiciones y sigue recogido en la normativa. Pero de cara al gran público, su uso en la categoría reina del motor, es una medida de presión y de *marketing*, para ser visto con buenos ojos por parte del consumidor, que hasta ahora estaba dando una mala reputación para un futuro uso en coches de calle, debido a la polémica surgida en torno al sistema por accidentes, disputas legales...

Ya que si adquiriera popularidad, el gran público podría estar dispuesto a desembolsar más dinero para adquirir vehículos que poseen un coste superior, que si aumentase su volumen de fabricación, en un futuro bajaría el coste de venta de los vehículos por mejorar la tecnología de producción por tratarse de un caso de *Economía de Escala*.

6. Conclusiones

Es bastante probable que el abandono temporal del KERS haya supuesto perder una oportunidad histórica para hacer de la Fórmula 1 un deporte realmente comprometido con el medio ambiente y aunque muchos no lo crean; más barato.

Pese a que el calentamiento global no entiende de crisis económicas, la actual coyuntura no es la más idónea para implantar un nuevo sistema, novedoso y sofisticado, que requiere de una gran inversión, de hasta 50 millones de € (**ref.**) y además de la manera que fue impuesta por la FIA para luego permitir a otros equipos no usarla por acabar siendo contraproducente. Muchos equipos han visto seriamente como su imagen de marca ha sido dañada por esta tecnología; un claro ejemplo de ello es el equipo *BMW-Sauber* (principal impulsor del KERS) para publicitar su tecnología *Efficient Dynamics* (**ref.**) en la venta de sus coches de calle; teniendo que retirar rápidamente la publicidad de este sistema del exterior de sus monoplazas para evitar quedar en entredicho, y con posterioridad incluso llegando a abandonar la competición.

Desde el punto de vista económico pese a ser un desastre, se podía vislumbrar que el desarrollo del KERS, a medida que mejorase su tecnología de producción, iba a permitir la reducción de costes debido a que se preveía que la potencia de este mecanismo aumentaría con los años, mientras que la potencia del motor térmico disminuiría, necesitando así por tanto menos combustible para alimentar la propulsión del monoplaza, así pues disminuiría el coste incurrido en su consumo y en su logística, ya que se tendría que desplazar menos cantidad de combustible a los circuitos; además los motores térmicos soportarían un estrés menor, por estar más repartido el esfuerzo de autopropulsión entre el dispositivo electromecánico y el “convencional”, por lo que la probabilidad de “romper” disminuiría y también el nº de motores a fabricar, pudiendo reutilizarlos en más carreras, disminuyendo también el coste de estas dos maneras.



Fig.51 Plan de implantación del KERS previsto por la FIA. © Infografía AS

Además, las “escuderías cliente” (aquellas que no son garajistas y motorizadoras al mismo tiempo, por ejemplo: *Red Bull, Williams...*) ante el dudoso rendimiento en pista mostrado, no estaban dispuestas a invertir dinero en un sistema que sólo podría repercutir beneficios a aquellas escuderías con presencia en el sector comercial: *Ferrari, McLaren-Mercedes, Renault, BMW y Toyota*. Por poder aplicar esta novedad es sus cadenas de montaje. Por otra parte, muchas escuderías ante el desarrollo de una nueva normativa aerodinámica, vieron una vía de escape (ver Fig. 52) más barata para conseguir ser más competitivos: *el doble difusor*. Consiguiendo una ventaja en carrera, mientras las escuderías “tradicionales” que se centraron en el desarrollo del KERS por prestigio de marca y en aras de un futuro comercial. De esta manera, las “escuderías cliente” desarrollaron una inteligente estrategia empresarial.

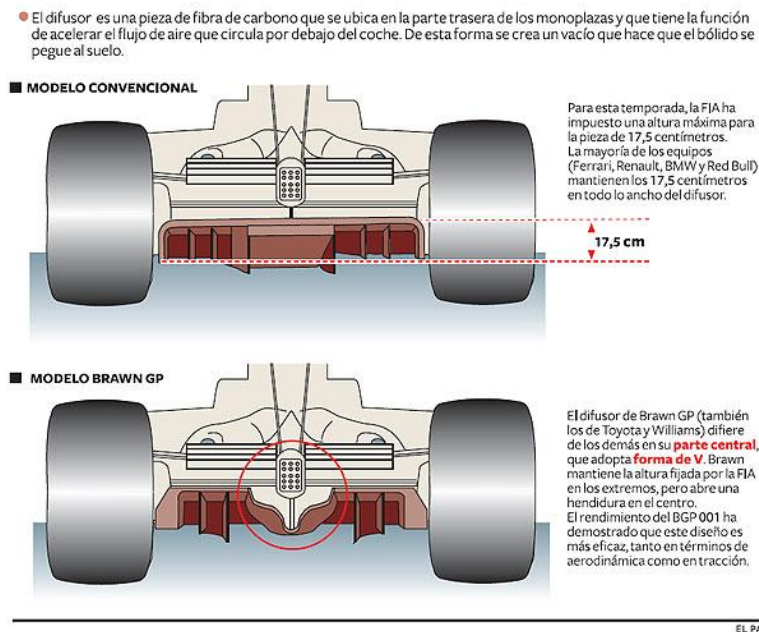


Fig.52 Comparación entre el “doble difusor” y el “convencional”. © El País

Desde el punto de vista deportivo, los aficionados creen que esta invención va en contra del espíritu de la F1, por considerarlo una adulteración de la más pura esencia de la filosofía del mundo del motor. Los equipos no han visto un rendimiento significativo en esta tecnología, salvo el equipo *McLaren Mercedes* al final de la temporada con una mejora en las evoluciones de su monoplaça, y el resto de equipos en las largas rectas, para ser evitados por equipos que desearon el *KERS* desde el principio de la temporada como *Red Bull* o *Brawn GP*. Es paradójico que un sistema que iba a mejorar la actuación de los coches, ha resultado contraproducente, ya que complicaba tremendamente el balance del automóvil de competición por ser situado en punto con centro de gravedad alto.

Desde el punto de vista técnico, el uso del *KERS* bajo gobierno de *P2P* no tiene ningún sentido, teniendo en cuenta el orden de crecimiento de la curva de par de un Fórmula 1 (ver Fig. 53), que aunque al principio la del motor eléctrico sea más elevada (ver Fig. 22), en seguida, el par de torsión que se impone es el generado por el motor térmico, además hay que tener en cuenta que un Fórmula 1 pasa de 0-200Km/h en 3,8s y casi "al ralenti", puede entregar casi 100cv y el *KERS* actual como máximo rinde 80cv.

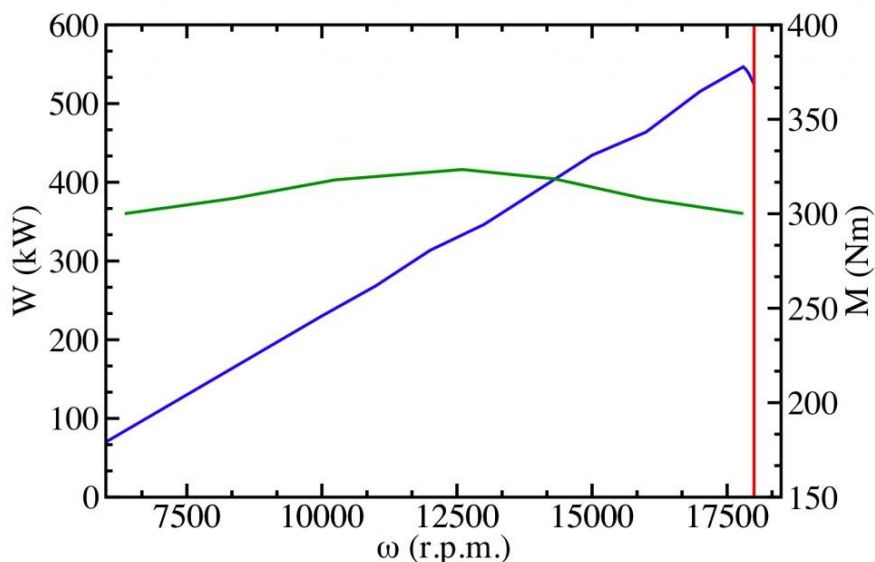


Fig.53 Curvas de par (verde) y potencia (azul) de un Fórmula 1

Así, vistos estos datos, el uso del *KERS* cuando el coche ya está lanzado en una recta es inútil; el dispositivo únicamente es interesante en la salida de las curvas cuando se toma el rebufo (ver Fig. 54) del coche que tenemos inmediatamente delante para adelantarlo, ahora sí funcionando como push to pass, pero el intervalo de tiempo que tenemos ventaja puede ser muy corto, hasta que el motor térmico alcance al eléctrico.

¿Cuánto dura este intervalo? ¿1/2 segundo? ¿Quizá menos? (Aunque medio segundo puede ser clave en la F1 para rebasar al monoplaza que se tiene delante) Tampoco es un sistema útil para neutralizar las pérdidas en los cambios de marcha, cuando un Fórmula 1 recupera en cuestión de centésimas de segundo.



Fig.54 Felipe Massa a rebufo de Kimi Raikkonen. © FIA

De este modo, en caso de haber adelantamiento, la ventaja se produce al principio y no al final de la maniobra de adelantamiento cuando los coches ya están emparejados; contrariamente a lo que uno pueda creer.



Fig.55 Adelantamiento entre Fernando Alonso, David Coulthard y Nick Heidfeld. © FIA

Como última conclusión a tomar, vistos los argumentos y a favor en contra, queda muy claro que el KERS estuvo mal enfocado desde el principio utilizándolo como *P2P*, es mucho más efectivo su control bajo gobierno de la ECU y no del piloto, ya que este último no conoce con exactitud hasta cuándo el par del KERS es mayor que el del propulsor térmico. Para así, poder utilizarlo como propulsor, en momentos en los que el vehículo no requiere de alta potencia ni velocidad, como por ejemplo, en los momentos con coche de seguridad en pista (**ver Fig. 56**), o en *pit stops*. Tal y como se gobierna Peugeot en las 24 de Le Mans. Con lo que concluimos que el verdadero fin del KERS debe ser el ahorro (tan necesario en esta época) y no la velocidad.



Fig.56 Safety Car en pista. GP Singapur 2008 © FIA

Por último, todavía sin resolver, queda por conocer el factor social, ¿alguien se imagina este deporte sin el particular bramido de sus motores? Quizá el *Gran Circo* perdería parte de su magia si los motores fueran tan silenciosos como en un *Toyota Prius*.

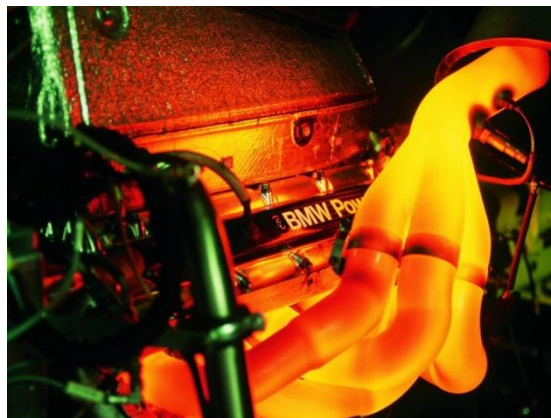


Fig.57 Motor BMW P86/9 funcionando al máximo de revoluciones en banco de pruebas. ©

BMW

Anexo: Bibliografía y Documentación

Referencia 1 - http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_nitroso

Artículo de la mayor enciclopedia online sobre el Óxido Nitroso

Referencia 2 - http://www.tuningpedia.org/Oxido_nitroso

Mayor enciclopedia especializada online en castellano, en ella, es posible encontrar claras y breves explicaciones de la terminología usada en el mundo del Tuning.

Referencia 3 -

http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/physical_science/chemistry/nitrogen_oxides.sp.html&edu=high

Artículo sobre el óxido nitroso de la *University Corporation Atmospheric Research*. Ésta, es una fundación universitaria para la e investigación y lucha contra el calentamiento global. Este organismo está formado por una un conglomerado de universidades de EEUU como: Harvard, MIT...

Referencia 4 –

<http://www.thef1.com/noticias/noticias-2008/diciembre-2008/honda-niega-que-earth-dreams-sea-la-causante-de-su-retirada>

Artículo de www.thef1.com, portal de F1 de la revista *Car & Driver*, sobre la campaña fallida de *Earth Dreams* de Honda, posible causante de su bancarrota

Referencia 5 - <http://es.f1-live.com/f1/es/actualidad/noticias/detail/080717111626.shtml>

Artículo de www.f1-live.com, portal de F1 de ESPN, en el que se relata el incendio ocurrido en la fábrica de Red Bull Racing

Referencia 6 –

<http://www.thef1.com/noticias/noticias-2009/febrero-2009/los-pilotos-sufriran-riesgo-de-electrocucion-con-el-kers-en-2009>

Artículo de www.thef1.com, portal de F1 de la revista *Car & Driver*, sobre las precauciones a tomar por los pilotos a la hora de abandonar el vehículo

Referencia 7 –

<http://momento24.com/2009/04/03/formula-1-gp-malasia-2009-raikkonen-sufre-un-cortocircuito-en-el-kers/>

Artículo del portal argentino de deportes *Momento 24*, en el que se detalla lo sucedido en el incendio del coche nº 4 en el GP Malasia de 2009

Referencia 8 –

http://www.abc.es/hemeroteca/historico-06-10-2009/sevilla/Deportes/el-kers-muere-en-siete-meses-la-inversion-mas-costosa-%2850-millones-por-equipo%29-no-llega-al-a%C3%B1o-de-vida_103418297062.html

Artículo del diario *ABC* informando de la fallida inversión en el *KERS* y abandono del mismo por parte de los equipos pertenecientes a la *FOTA*. A fecha de 6-10-2009

Referencia 9 –

[http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/AAE9C10693C293F7C12575AF004512DC/\\$FILE/1-2009%20F1%20SPORTING%20REGULATIONS%20%28Showing%20Alterations%29%2024-03-2009.pdf](http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/AAE9C10693C293F7C12575AF004512DC/$FILE/1-2009%20F1%20SPORTING%20REGULATIONS%20%28Showing%20Alterations%29%2024-03-2009.pdf)

Reglamento de carrera oficial de la FIA aplicado en la Fórmula 1

Referencia 10 –

[http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/7C4F8D883039AF6AC125757D00369C58/\\$FILE/1-2009_F1_TECHNICAL_REGULATIONS_Showing-Alterations_17-03-2009.pdf](http://argent.fia.com/web/fia-public.nsf/7C4F8D883039AF6AC125757D00369C58/$FILE/1-2009_F1_TECHNICAL_REGULATIONS_Showing-Alterations_17-03-2009.pdf)

Reglamento técnico oficial de la FIA aplicado en la Fórmula 1

Referencia 11 –

<http://www.thef1.com/noticias/noticias-2009/marzo-2009/los-comisarios-llevaran-guantes-en-melbourne>

Artículo de www.thef1.com, portal de F1 de la revista *Car & Driver*, en el que se informa de la queja llevada a cabo por la *Asociación de Pilotos de Grandes Premios (GPDA)*, sobre el uso de guantes aislantes para la manipulación de los monoplazas

Referencia 12 - <http://www.elperiodicoextremadura.com/noticias/noticia.asp?pkid=422030>

Entrevista del diario *El Periódico de Extremadura* (grupo *El Periódico de Cataluña*) a Bob Bell, *Team Principal* de *Renault F1*, en el que éste declara los riesgos y precauciones a tomar por la implantación del sistema *KERS*. A fecha de 21-1-2009

Referencia 13 - <http://es.f1-live.com/f1/es/actualidad/noticias/detail/080821165046.shtml>

Entrevista a Mark Duesmann, en el portal de F1 <http://www.f1-live.com> perteneciente al canal de TV de EEUU *ESPN*, en el que se explican las causas del accidente sufrido por el mecánico de BMW durante el desarrollo del *KERS*

Referencia 14 - <http://www.teamsassociation.org/>

Sitio web de la *FOTA (Formula One Teams Association)*

Referencia 15 –

<http://www.thef1.com/noticias/noticias-2009/marzo-2009/bmw-quiere-aumentar-el-peso-minimo-del-coche>

Artículo de www.thef1.com, portal de F1 de la revista *Car & Driver*, en el que se informa de la petición de BMW de subir el peso mínimo de los vehículos a 650Kg

Referencia 16 –

<http://www.thef1.com/noticias/noticias-2009/octubre-2009/los-equipos-acuerdan-el-abandono-del-kers>

Artículo de www.thef1.com, portal de F1 de la revista *Car & Driver*, en el que se informa de la rueda de prensa dada por la FOTA en el GP Japón para abandonar el uso del KERS

Referencia 17 -

<http://www.motociclismo.es/Deporte/moto-gp/ktm-incorpora-kers-motogp/6622>

Artículo de la revista *Motociclismo*, en el que se explica el funcionamiento del KERS de KTM en el Campeonato del Mundo de 125 cm³

Referencia 18 - http://en.wikipedia.org/wiki/Peugeot_908_HDi_FAP

Artículo de Wikipedia donde se explica las características principales del *Peugeot 908 HDI*, automóvil que compete en las *24h de Le Mans*

Referencia 19 –

http://www.bmw.com/es/es/insights/technology/efficient_dynamics/phase_2/howcan.html

Web del fabricante de automóviles *BMW* que explica el funcionamiento de su tecnología *Efficient Dynamics*

Referencia 20 –

<http://www.caranddriver.es/Novedades-y-pruebas/Top-secret/Ferrari-F450-32424/>

Artículo de la revista *Car & Driver* en el que se anuncia el lanzamiento del *Ferrari F450*

Referencia 21 –

<http://motor.terra.es/novedades-coches/articulo/bmw-vision-efficientdynamics-51052.htm>

Artículo de *Terra Motor* en el que se detalla las prestaciones y características del *BMW Vision Efficient Dynamics*

- Referencia 22 - <http://www.flybridsystems.com/>
Página web oficial de *Flybrid Systems*, empresa británica encargada del primer desarrollo del KERS.
- Referencia 23 - <http://motorsport.magnetimarelli.com/>
Catálogo de los productos ofrecidos por la división deportiva de *Magnetti Marelli*
- Referencia 24 - <http://www.bosch-motorsport.de/content/language2/html/3766.htm>
Anuncio oficial, de la compañía alemana, *Bosch* manifestando su intención de fabricar y comercializar el KERS para diversas competiciones: F1, Le Mans, DTM...
- Referencia 25 - <http://www.zytekgroup.co.uk/Default.aspx?tid=254>
Anuncio oficial, de la compañía británica de automoción, *Zytek* anunciando su intención fabricar y comercializar el KERS. *Zytek* es el actual proveedor de del equipo *Vodafone McLaren Mercedes*
- Referencia 26 - <http://www.mclarenelectronics.com/>
Página web oficial del departamento de electrónica de McLaren
- Referencia 27 - <http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo>
Artículo de *Wikipedia* en el que se explica el funcionamiento del giróscopo
- Referencia 28 - <http://www.pedrodelarosa.com/castellano/index.php>
Web oficial del piloto español de *McLaren Mercedes* Pedro Martínez de la Rosa
- Referencia 29 - http://es.wikipedia.org/wiki/Eau_Rouge
Artículo de *Wikipedia* en el que se explica las características de la curva de Eau Rouge en el circuito belga de Spa-Francorchamps
- Referencia 30 – Oyarbide Usabiaga E. (2006) *Fundamentos de la Electrónica*, Servicio de Reprografía, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, Aragón, España
- Referencia 31 – Bayod Rújula A. A. (2002) *Principios de Electromagnetismo*, PUZ, Zaragoza, Aragón, España
- Referencia 32 – Larrodé Pellicer E. (1997) *Automóviles Eléctricos*, INO Reproducciones, Zaragoza, Aragón, España

- Referencia 33 – Luque P. & Álvarez. D & Vera C. (2005), *Ingeniería del automóvil. Sistemas y Comportamiento Dinámico*, Thomson, Madrid, España
- Referencia 34 – Barragán Pérez L.A. & Artigas I. (2001), *Electrónica digital: aplicaciones y problemas con VHDL*, Prentice Hall, Madrid, España
- Referencia 35 - http://es.wikipedia.org/wiki/Engranaje#Engranaje_c3.B3nico_hipoide
Artículo de Wikipedia explicando el funcionamiento y razón de ser de un *engranaje cónico hipoide*.
- Referencia 36 - http://es.wikipedia.org/wiki/Inercia_mec%C3%A1nica
Artículo de Wikipedia que explica el efecto de la *Inercia Mecánica*
- Referencia 37 - http://www.youtube.com/watch?v=wr_77ZtdW6I
Vídeo del diario deportivo italiano *La Gazzetta dello Sport* que explica el funcionamiento del KERS *mecánico*
- Referencia 38 - <http://www.youtube.com/watch?v=4Pclt0FPvWQ>
Vídeo del programa *Autoline Detroit* (perteneciente al canal norteamericano *Speed TV*) en el que Chris Brockbank, *business manager* de *ToroTrack* (una de las empresas que desarrollaron el KERS *mecánico*), explica el funcionamiento del dispositivo mecánico
- Referencia 39 - http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_inercial
Artículo de Wikipedia explicando el funcionamiento de una batería inercial