

La electrónica en la Fórmula 1

Pedro Martín Mateos
pedromartinmateos@gmail.com

Este artículo se distribuye bajo la licencia Reconocimiento 3.0 de Creative Commons, disponible en <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/es/>

Resumen—Desde su creación hace ya más de 50 años, la Fórmula 1 ha sido aceptada por todo el mundo como la máxima expresión del automovilismo. Es, por lo tanto, el escenario ideal para la utilización de la más alta tecnología en todos sus campos de aplicación.

El desarrollo sufrido por las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC) en las últimas décadas ha sido desmedido e irrefrenable. Como no podía ser de otro modo, a principios de los años 80 se produjo su irrupción en el automovilismo. La “electrónica”, como es conocida en el mundillo, ha condicionado hasta tal punto el diseño y funcionamiento de los monoplazas que se haría imposible imaginar la Fórmula 1 de nuestros días sin sus aportaciones.

Cada vez que se celebra un Gran Premio oímos hablar de telemetría, de mapas de motor, escuchamos las conversaciones entre el piloto y sus ingenieros y vemos los innumerables botones e indicadores que posee el volante del monoplaza. En este artículo se trata de dar a conocer los fundamentos de todas estas herramientas, y otras muchas, que basan su funcionamiento en la aplicación que se ha hecho de las TIC al mundo del automovilismo.

I. INTRODUCCIÓN

EN un Fórmula 1 hay instalados entorno a 250 sensores, repartidos a lo largo y ancho del monoplaza. Dichos sensores se encargan de medir todos los parámetros de funcionamiento del coche, desde los más básicos, como la presión de cada rueda, hasta los más complejos, como el comportamiento de la caja de cambios.



Figura 1. Kimi Räikkönen, Ferrari F2008. GP España 2008

Así mismo, el monoplaza posee un importante número de dispositivos pertenecientes a otro conjunto, el de los actuadores. Los únicos elementos sobre los que las órdenes del

piloto tienen acción directa son la dirección y los frenos, por motivos de seguridad, el resto de elementos del Fórmula 1 son controlados por los actuadores. Es un actuador hidráulico el encargado de engranar cada marcha de la caja de cambios, del mismo modo, otro se encarga de accionar el embrague. Las bombas que llevan el combustible hasta el motor también son controladas por actuadores, al igual que todo el sistema de alimentación y encendido del motor.

Llegados a este punto, tenemos el conocimiento de la existencia de sensores, capaces de medir todos los parámetros de funcionamiento del monoplaza, y actuadores, capaces de controlar la mayoría de elementos del mismo. El círculo se cierra con la aparición de la Unidad Electrónica de Control (ECU). La ECU utiliza los datos de los sensores para, en base a las acciones del piloto, manejar los actuadores que gobiernan el funcionamiento de los distintos sistemas del coche. Dicho gobierno, se realiza siempre de acuerdo a un modelo matemático o a un mapa de funcionamiento más o menos complejo [1].

La ECU no tiene como única función el control de los actuadores. También es la encargada de hacer llegar toda la información del monoplaza, aportada por los sensores, al equipo de ingenieros. Esta utilidad, que recibe el nombre de telemetría, se ha convertido en imprescindible en la Fórmula 1 actual.

II. SENSORES

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar la variación de alguna magnitud física en una variación de una magnitud electrónica. Por ejemplo, una galga extensiométrica transforma una deformación de un medio en una variación de resistencia, del mismo modo un termopar transforma una diferencia de temperatura en una cierta diferencia de tensión.

Como ya se ha comentado, la gran cantidad de datos necesarios para el control y análisis del funcionamiento de un monoplaza de Fórmula 1 se obtiene gracias a la utilización de múltiples sensores. A continuación, se analizan los distintos sensores utilizados, organizados en función de la magnitud física que consiguen medir [2].

II-A. Posición

Los sensores de posición miden desplazamientos, bien lineales o bien rotacionales. Con unos rangos de medida que oscilan entre una micra y veinte centímetros. Hay diferentes tecnologías de construcción de sensores de posición y cada una es empleada allí donde resulta más útil su aplicación.

Los sensores de posición potenciométricos se basan en el desplazamiento de un resorte móvil sobre un material resistivo. Si el extremo móvil se fija, por ejemplo, a la barra de la dirección, el sensor ofrece una resistencia proporcional al ángulo de giro del volante. Además de la posición del volante, sensores de posición potenciométricos como los mostrados en las figuras 2 y 3 permiten medir los desplazamientos sufridos por las suspensiones y la posición del acelerador respectivamente [3].

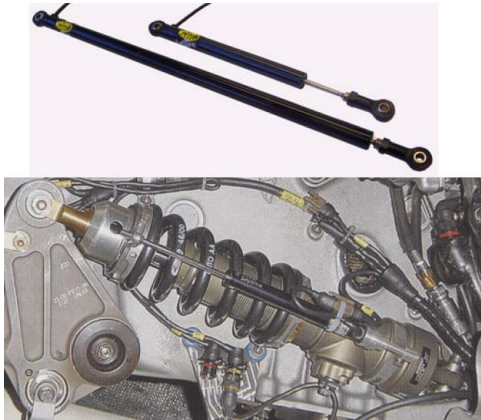


Figura 2. Sensor de posición potenciométrico lineal

El LVDT (Transformador Diferencial de Variación Lineal) utiliza un núcleo móvil sometido al desplazamiento que se pretende medir, alrededor del cual, se colocan tres bobinas. Los desplazamientos del núcleo varían los coeficientes de acople entre bobinas, de un modo tal que permiten conocer la magnitud de dicho desplazamiento. Este tipo de sensores es utilizado en zonas con condiciones ambientales extremas de temperatura y vibraciones, como los frenos del monoplaça.



Figura 3. Sensor de posición potenciométrico rotacional

Los sensores de efecto Hall utilizan una pequeña lámina de material semiconductor recorrida por una corriente constante. La aplicación de un campo magnético induce una cierta tensión entre los extremos del semiconductor. Estos sensores se utilizan principalmente para detección de posición sin contacto. Son empleados para determinar la velocidad de giro de cada una de las ruedas y de los diferentes elementos de la transmisión.

Los sensores láser basan su funcionamiento en la utilización de luz de una cierta longitud de onda. Un emisor láser ilumina

la zona a donde se encuentra el objeto cuya posición se desea medir y un fotodetector capta la luz reflejada. El desfase entre las señales transmitida y recibida será proporcional a la distancia al objeto, pudiendo medir de este modo su posición sin necesidad de un contacto físico con el mismo. Este tipo de sensores son muy útiles para conocer de modo preciso la altura del monoplaça con respecto al suelo.



Figura 4. Sensor de presión diferencial

II-B. Presión

Los sensores de presión más utilizados convierten la presión a medir en la deformación de una membrana que separa dos cavidades independientes. La deformación puede captarse mediante una galga extensiométrica, un condensador o incluso un cristal piezoeléctrico. La medida de presión puede ser absoluta, si se toma con respecto a una presión igual a cero, manométrica, si se toma con respecto a la presión ambiente, o diferencial, si se toma con respecto a una segunda presión. En la figura 4 podemos ver un sensor de presión diferencial, cuya tensión de salida es proporcional a la diferencia de presión entre los dos conductos de entrada [4].



Figura 5. Tubo de Pitot

En un Fórmula 1 se miden multitud de presiones, por ejemplo la del aceite del motor y de la caja de cambios, la de los líquidos de refrigeración del motor y la de las pinzas de los frenos. También es necesario conocer la presión de cada una de las ruedas del monoplaça, ya que es un aspecto vital en el comportamiento del mismo. Para este fin, se utilizan pequeños sensores de presión inalámbricos colocados en la válvula del neumático [4]. Estos transmiten utilizando ondas de radio la

presión detectada a un receptor y es dicho receptor el que se conecta a la ECU.

Basta con echar un vistazo a un Fórmula 1 para darse cuenta de hasta que punto la aerodinámica es un factor vital en el funcionamiento del mismo. Por lo tanto, el conocimiento de la velocidad del coche con respecto al aire es fundamental para comprender el porqué de sus reacciones. Con este fin, se utiliza un sensor de presión diferencial conectado a un Tubo de Pitot colocado en la parte alta del morro del monoplaza, figura 5.

II-C. Dinámica del Monoplaza

Este tipo de sensores consigue medir aceleraciones y vibraciones transformándolas en deformaciones o desplazamientos de una masa suspendida. Captando el desplazamiento sufrido por la masa podemos obtener la aceleración a la que está siendo sometida. Tenemos distintos tipos de sensores para captar convenientemente la dinámica del monoplaza, como son los acelerómetros de uno, dos o tres ejes, giroscopios, IMUs (Unidades de medida inercial) y sensores ópticos sin contacto.



Figura 6. Acelerómetro

El sensor más utilizado es el acelerómetro de tecnología MEMS (Sistema Micro Electromecánico) piezoresistivo. Estos sensores captan los desplazamientos de una minúscula masa con la ayuda de un cristal de silicio cuya resistencia es función de la deformación a la que se ve sometido. Tenemos un ejemplo de este tipo de sensor en la figura 6 y se trata de un acelerómetro de un eje, lo que quiere decir que sólo capta las aceleraciones sufridas en una determinada dirección y en ambos sentidos [3]. Puede utilizarse, por ejemplo, para medir las fuerzas de frenado y aceleración, también para la medida de las aceleraciones laterales, o bien para las verticales. Un sensor de tres ejes permitiría obtener todos estos datos utilizando un sólo dispositivo.

II-D. Par Motor

Podemos definir el par motor como la fuerza que el motor es capaz de ejercer en cada giro. Al igual que en los casos anteriores, la medición se realiza transformando el par en una deformación.

La medida del par se utiliza para analizar la eficiencia de funcionamiento del motor, para caracterizar la calidad de

la transmisión y para conocer las torsiones del chasis y el comportamiento del mismo en lo que a conducción se refiere. Además, es uno de los parámetros en los que se basa la ECU al optimizar la gestión que realiza del motor.

II-E. Temperatura

En automovilismo se utilizan un buen número tecnologías de fabricación de sensores de temperatura.



Figura 7. Termopar

El primer sensor de temperatura que se analizará y uno de los más utilizados es el termopar. Un termopar consiste en la unión de los extremos de dos hilos metálicos diferentes. Deben su funcionamiento al denominado efecto Seebeck, por el cual al juntarse dos hilos conductores de distinta naturaleza y cuyos extremos se encuentran a distinta temperatura, se induce una tensión proporcional a dicha diferencia de temperatura entre extremos. Teniendo conocimiento de la temperatura en uno de los extremos y la tensión inducida en los conductores, podemos determinar la temperatura en el otro extremo, llamado sonda, que estará colocado en el lugar cuya temperatura se desea medir.



Figura 8. Sensor de Temperatura RTD

Dado que la sonda del termopar únicamente está formada por la unión de dos metales, una adecuada elección de los mismos puede conseguir temperaturas máximas de medida superiores a los 1000°C. Con este rango de temperatura, los termopares son muy adecuados para, entre otras cosas, medir

la temperatura de los gases de salida del motor. Como ejemplo, el sensor mostrado en la figura 7 fue diseñado para tal efecto. En la parte de abajo de dicha figura se puede ver su instalación en uno de los tubos de escape del motor de un Fórmula 1 [5]. Se trata del sensor de menor sección, está colocado junto a un sensor Lambda, de mayor grosor, y cuya función se detalla unas líneas más adelante.

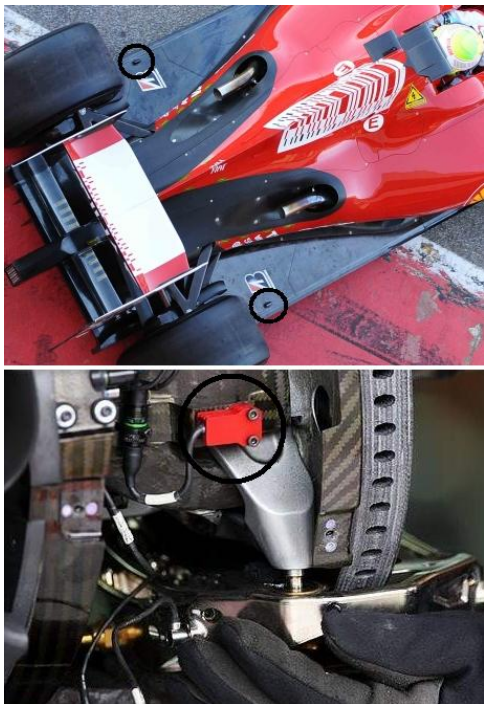


Figura 9. Sensores IR de Temperatura

Otro tipo de sensor de temperatura es el RTD (Detector de Temperatura Resistivo) y se construye mediante un hilo o una película de un cierto metal. El más empleado para todo tipo de aplicaciones es el platino, los sensores RTD de platino se conocen como PTC. Un RTD ofrece una resistencia eléctrica proporcional a la temperatura a la que se encuentra. La figura 8 muestra el aspecto de un sensor de este tipo.

Los sensores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo) o termistores están contruidos mediante óxidos metálicos semiconductores, con lo que su resistencia disminuye al aumentar la temperatura. Exteriormente son similares a los sensores RTD.

Tanto los sensores NTC como los PTC se usan para medir la temperatura del aire, del agua, del aceite y la gasolina, en el intento optimizar el funcionamiento del motor.

Cuando se necesitan medidas sin contacto se usan los sensores IR (Infrarrojo), que miden la temperatura detectando la radiación electromagnética emitida por el objeto al que enfocan. Todo cuerpo a más de 0°K emite radiación, y según la ley de Wien, la longitud de onda a la cual el cuerpo emite su máximo de radiación es inversamente proporcional a su temperatura. Este es el motivo por el que un metal a medida que aumenta su temperatura comienza a tomar un color rojizo: la longitud de onda de su máximo de radiación comienza a acercarse al color rojo del espectro visible. Los objetos tienen

su máximo de radiación en la banda de infrarrojo y detectando la longitud de onda a la que aparece dicho máximo, podemos conocer su temperatura.

Este tipo de sensores es muy útil en la medición de la temperatura de elementos móviles como discos de frenos y neumáticos [4]. Es vital que sean colocados en lugares donde se tenga una buena visión del objeto y no se ensucien en exceso, ya que dicho ensuciamiento podría inutilizarlos. Los sensores mostrados en la parte superior de la figura 9 se utilizan para medir la temperatura de los neumáticos traseros y tienen un rango de funcionamiento que abarca entre 0°C y 180°C. Los sensores diseñados para medir la temperatura de los frenos (parte inferior de la figura 9) tienen el mismo funcionamiento, pero con temperatura máxima medible superior a 1200°C. En lo que al comportamiento del coche se refiere, tanto el estado de los frenos como la adecuada temperatura de los neumáticos juegan un papel fundamental y aquí radica la gran importancia de estos sensores.

II-F. Sensores Lambda

Los sensores Lambda son capaces de medir la cantidad de oxígeno existente en los gases de salida del motor mediante su colocación en el tubo de escape. Utilizan un compuesto cerámico de Dióxido de Zirconio que está en contacto con los gases de escape en uno de sus extremos y en contacto con la atmósfera en el otro, además, dentro de cada una de las partes hay una determinada cavidad. La relación entre el contenido de O_2 en los gases de escape y del aire de referencia produce una cierta diferencia tensión entre las dos cavidades que se extrae utilizando dos electrodos [4]. El compuesto de Dióxido de Zirconio es permeable a los iones de oxígeno sólo cuando se encuentra a altas temperaturas, por lo que los sensores lambda suelen emplear calentadores para proporcionar un correcto funcionamiento en todas las situaciones.



Figura 10. Sensor Lambda

La relación entre aire y combustible, en peso, que entra en los cilindros del motor recibe el nombre de lambda, y es de aquí de donde procede el nombre que se les da a estos sensores. Se conoce como mezcla estequiométrica el valor lambda que permite que se queme todo el combustible que se introduce en el motor, siendo esta la relación 14.57:1 y para la misma, lambda tiene el valor 1. El nivel de oxígeno en los gases de escape del motor nos permite conocer el valor de lambda, un valor igual a 1 significa que el motor está alimentado del modo en el que más potencia puede entregar. Para una mezcla rica la cantidad de combustible es

mayor que la óptima y λ es mayor que 1, mientras que en una mezcla pobre la cantidad de combustible es inferior a la óptima y λ es menor que 1.

Estos sensores son los más importantes en la gestión del motor y por ello la mayoría de ECU's posee entradas específicamente diseñadas para los mismos. En la figura 7 podemos ver un sensor λ colocado junto a otro de temperatura en un tubo de escape del motor, mientras que en la figura 10 podemos verlo desmontado. En esta segunda figura se pueden apreciar las zonas donde están las dos cavidades separadas por la tuerca que se utiliza en su fijación, ambas zonas están recubiertas para evitar su rotura.

III. ACTUADORES

La ECU estándar que introdujo se introdujo en el año 2008, y que se utiliza actualmente, ha de poder controlar los siguientes dispositivos [6]:

- Un motor de 8 cilindros.
- Una caja de cambios semi-automática secuencial de 6 o 7 velocidades y un embrague hidráulico multidisco.
- Un diferencial hidráulico.
- Un sistema de recuperación de energía.

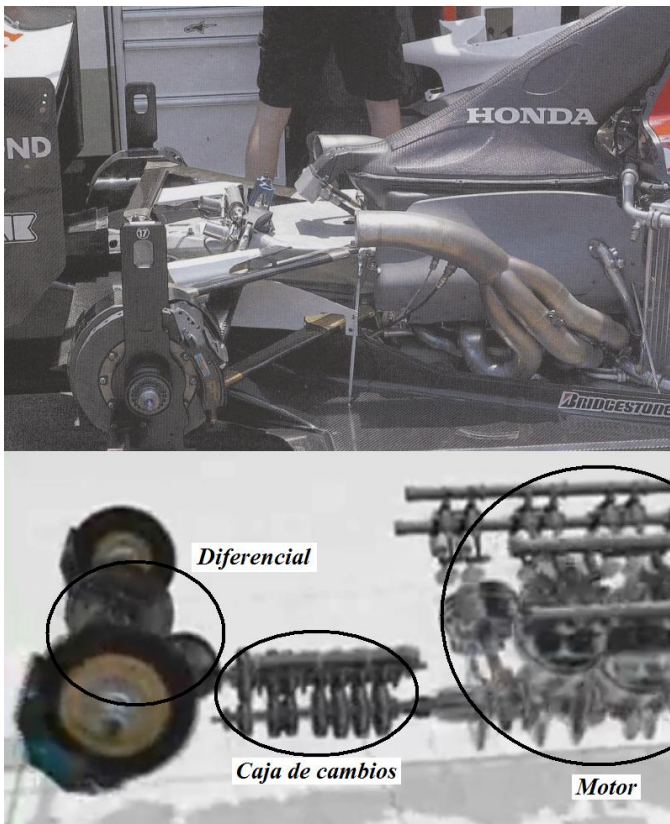


Figura 11. Localización del motor, caja de cambios y diferencial

La posición dentro del monoplaza de los tres primeros sistemas puede observarse en la figura 11. Están colocados justo detrás de la cabina del piloto. El posicionamiento del sistema de recuperación de energía se explica más adelante.

Como no podía ser de otro modo, el control de todos estos elementos se realiza por medio de una serie de actuadores

manejados por la ECU. En este punto surge un problema, la gran fuerza necesaria para accionar ciertos sistemas. La mejor solución encontrada hasta la fecha, es la utilización de un sistema hidráulico.

El sistema hidráulico basa su funcionamiento en el bombeo de fluido hidráulico a través de un conjunto de tuberías a una presión de 200 bares y a una temperatura de 120°C aproximadamente. Todo el sistema es controlado por una serie de bombas y electroválvulas que reciben ciertas órdenes de apertura y cierre desde la ECU, consiguiendo llevar el movimiento del fluido hidráulico hasta los actuadores mecánicos. Dichos actuadores mecánicos son los que realizan el movimiento dentro del sistema a gestionar [7]. La ventaja principal de los sistemas electro-hidráulicos es la enorme ganancia de potencia que desarrollan en relación a las señales eléctricas de la ECU, ya que la simple apertura de una válvula permite que la alta presión del fluido hidráulico ejerza grandes fuerzas.



Figura 12. Bobina de encendido

Si bien es cierto que el sistema hidráulico actúa sobre la mayoría de los elementos del monoplaza, también hay otra serie de elementos actuadores que la ECU gestiona autónomamente, como pueden ser los inyectores de gasolina del motor. Así mismo, el sistema hidráulico también es empleado para otros fines, como el accionamiento de la dirección asistida, si bien, en este caso el control electrónico está prohibido por el reglamento de la categoría.

A la hora de explicar el funcionamiento de los actuadores, los clasificaremos en función del sistema que manejan.

III-A. Motor

Dentro de los actuadores encargados de la gestión del motor, hay dos sistemas bien diferenciados, el encargado de la inyección del combustible y el encargado del encendido de la mezcla de gasolina y aire en cada cilindro. Nos centraremos primero en el sistema de encendido.

Un motor de Fórmula 1 utiliza un sistema de encendido directo, también conocido como encendido estático integral, con encendido independiente. Sobre la bujía de cada uno de los 8 cilindros del motor se coloca una bobina de encendido [8]. La bobina de encendido genera, por orden de la ECU, el voltaje necesario para que salte la chispa entre los electrodos

de la bujía, produciéndose la inmediata explosión de la mezcla de gasolina y aire dentro del cilindro. Este sistema permite una enorme flexibilidad de funcionamiento y en su uso se basaban los sistemas de control de tracción prohibidos hace un par de años. Las bobinas de encendido utilizadas en Fórmula 1 son inductivas, tenemos un ejemplo de las mismas en la figura 12.

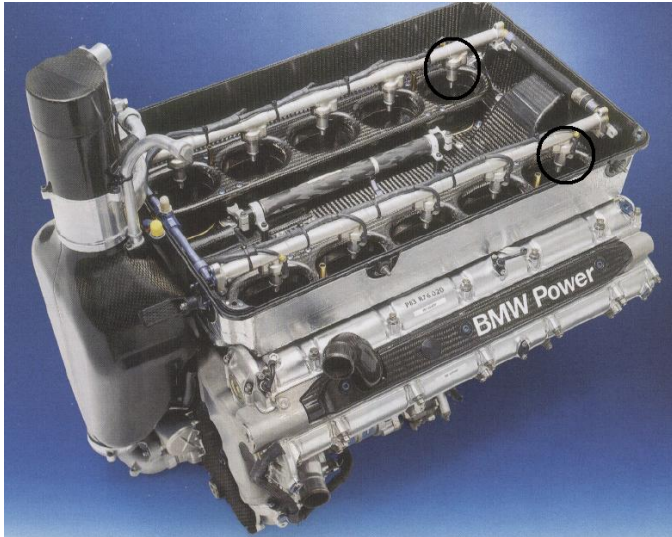


Figura 13. Inyectores del motor BMW P83

El sistema de inyección de combustible utiliza inyectores que pulverizan la gasolina justo encima de la tobera del colector de admisión [5], como puede verse en la figura 13. La imagen se corresponde con el motor que BMW desarrolló para el año 2003 y que tenía 10 cilindros en lugar de los 8 actuales, teniendo por lo tanto 10 inyectores, de los cuales se ha destacado el primero de cada fila. Los inyectores están interconectados por un tubo que contiene gasolina a presión, además también están conectados a la ECU individualmente. Esto permite que la ECU pueda actuar sobre cada inyector para regular tanto el instante exacto en el que se pulveriza la gasolina como la cantidad de la misma inyectada.

El transporte de la gasolina desde el depósito hasta los inyectores también es realizado por la ECU. Mediante dos bombas de combustible colocadas en el depósito, y cuyo flujo se controla en función de la tensión aplicada a cada bomba, se extrae el combustible. Inmediatamente después es filtrado y llevado a un regulador de presión, que también está controlado por la ECU y que permite que los inyectores puedan recibir la gasolina a la presión deseada [3].

Otro sistema que es controlado por la ECU mediante la utilización del sistema hidráulico es el que regula la cantidad de aire que entra en los cilindros variando el ángulo de giro de las mariposas situadas en el interior de la tobera del colector de admisión. Además, también es necesaria la utilización de bombas para el bombeo de aceite y de líquido refrigerante, dichas bombas son accionadas por la ECU.

Otro subsistema que podríamos asociar al bloque del motor es el embrague y se encuentra entre el motor y la caja de cambios. El embrague de un Fórmula 1 es controlado por la ECU gracias a electroválvulas del sistema hidráulico. El

embrague sólo es accionado por el piloto a la hora de detener el monoplaza y para ponerlo de nuevo en marcha. Su utilización en los cambios de marcha es gestionada de forma autónoma por la ECU de modo transparente al piloto.

III-B. Caja de cambios

El cambio de marchas de un Fórmula 1 es semiautomático secuencial, por lo que para su utilización sólo se requiere el accionamiento de una de las levas del volante. El control de la caja de cambios se realiza mediante la actuación, por parte de la ECU, sobre las electroválvulas del sistema hidráulico, de modo que se puedan engranar las diferentes relaciones de cambio. El nivel de automatización del cambio de marchas es tal que la ECU se encarga de accionar el embrague y reducir las revoluciones del motor para engranar la marcha y volver a soltar el embrague a la vez que aplica de nuevo el acelerador. Todo este proceso se repite cada vez que el piloto acciona las levas de cambio de marchas, siendo la rapidez con la que se ejecuta de vital importancia. Hay que tener en cuenta que a lo largo de un Gran Premio puede llegarse a usar el cambio hasta en 3000 ocasiones, por lo tanto, la disminución del tiempo de cambio de marcha puede suponer una importante mejora de los resultados.

III-C. Diferencial

Un diferencial es un elemento mecánico que permite que las ruedas motrices de un vehículo giren a revoluciones diferentes, según este se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro. Es uno de los sistemas más importantes en el comportamiento del coche y se gestiona gracias a diferentes presiones ejercidas por el sistema hidráulico.



Figura 14. KERS

III-D. Sistema de recuperación de energía

El sistema de recuperación de energía cinética (KERS), introducido en la temporada 2009, es capaz de recoger la energía que se pierde en las frenadas y utilizarla para aumentar la potencia aplicada sobre la transmisión del monoplaza en unos 80 caballos [9]. En cada vuelta se pueden utilizar un máximo de 400kJ de energía, a una tasa máxima de 60kW.

El piloto tiene esta energía a su disposición y puede liberarla presionando un botón situado en su volante, obteniendo una potencia extra máxima de 60kW, que se corresponden con unos 80.5 caballos. Dividiendo la energía máxima almacenable por las tasas de almacenamiento y liberación de la misma obtenemos que el piloto puede disponer de la potencia extra durante 6,66s y que este, es también el tiempo mínimo que se debe estar frenando para obtener la energía necesaria para cada vuelta.

Por ser el KERS elegido por la mayoría de equipos y el único que a día de hoy ha entrado en competición, se explicará el funcionamiento y control del sistema basado en baterías químicas. En la figura 14 se puede observar una representación en tres dimensiones del sistema basado en baterías. En el mismo, puede apreciarse destacado un dispositivo capaz de funcionar bien como alternador o bien como motor eléctrico. Dicho dispositivo está unido al cigueñal del motor y puede variar su modo de funcionamiento en función de los requerimientos de la ECU. Al realizar una frenada, la ECU lo utilizará como alternador para cargar la batería que se sitúa a su lado. Cuando el piloto pulse el botón específico situado en el volante, el KERS comienza a funcionar como un motor eléctrico, que toma corriente de la batería y cuya potencia se aplica directamente sobre el motor de gasolina.



Figura 15. Volante del Toyota TF106

IV. UNIDAD ELECTRÓNICA DE CONTROL

La ECU gestiona todos los sistemas controlados por los actuadores en base a los datos obtenidos por los sensores, pero siempre en función de las órdenes del piloto. El principal interfaz del que dispone la ECU para interactuar con el piloto es el volante. En esta sección se verá, además, cómo es posible conectar el gran número de sensores y actuadores utilizados a la ECU y ciertos conceptos básicos acerca de la configuración y la programación de la misma.

IV-A. Volantes

El volante de un Fórmula 1 no se utiliza sólo para dirigir el giro de las ruedas delanteras, sino que además posee unas

levas con las que la ECU gestiona tanto el accionamiento del embrague como el cambio de marchas. En la figura 15 podemos ver las 4 levas colocadas detrás del volante que utilizó el Toyota TF106. Las dos levas superiores permiten subir y bajar marchas, mientras que la activación de cualquiera de las dos inferiores acciona el embrague. La comunicación entre el piloto y la ECU es bidireccional, la ECU informa al piloto del régimen de giro del motor mediante la serie de LEDs colocados justo en la parte superior del volante. También utiliza una pantalla LCD para indicar la marcha utilizada y toda una serie de parámetros seleccionables, siendo los más habituales la velocidad y el nivel de carga del KERS.



Figura 16. Volante del Ferrari F2008

Además de las levas de los controles básicos del monoplaza y de los indicadores de la ECU, el volante posee numerosos conmutadores que permiten configurar el funcionamiento de los principales parámetros de los sistemas del coche. La configuración de dichos parámetros puede variar de un equipo a otro. De todos modos, suele haber una cierta uniformidad en la elección de los mismos, ya que se eligen los que tienen una mayor importancia en el funcionamiento del monoplaza. A modo de ejemplo, se entra con cierta profundidad en el funcionamiento del volante que utilizó el Ferrari F2008 y que puede observarse en la figura 16. Podemos hacer una primera división de los controles, hay 14 botones y 9 conmutadores giratorios.

Botones:

- 10 y 1: Se utilizan en la selección de diversos parámetros de configuración.
- N: Permite colocar la caja de cambios en punto muerto.
- L: Limitador de velocidad. Utilizado en el paso por boxes.
- OV: Permite aumentar temporalmente el régimen de revoluciones del motor, consiguiendo incrementar la potencia.
- RADIO: Activa la radio para hablar con el equipo.
- PUMP: Pone en funcionamiento una bomba que permite inyectar aceite en el motor.
- E: Dispara un extintor colocado en el cockpit.
- R: Engrana la marcha atrás.

- Para el resto de controles no se ha especificado su función.

Conmutadores giratorios:

- IN, MID y EXIT: Configuran el comportamiento del diferencial en la entrada, durante y a la salida de las curvas respectivamente.
- REV: Controla el máximo régimen de giro del motor.
- TRQ (Indicador central): Permite seleccionar distintos mapas de motor.
- TYRE: Selección del tipo de neumático utilizado.
- PED: Regula la acción del acelerador.
- MIX: Regula la mezcla de gasolina y aire que se entrega al motor.

Finalmente, hay que destacar que el volante analizado corresponde a un coche de la temporada 2008 y que, por lo tanto, carece de los controles del KERS y de la posición del alerón delantero que se han introducido al comienzo de la temporada 2009.

IV-B. Interfaces con sensores y actuadores

La ECU posee numerosos canales de entrada para conectar los múltiples sensores del monoplace. Dada la gran diversidad de tecnologías utilizadas en la construcción de los sensores y las diversas alimentaciones que poseen, no todos ofrecen las mismas señales a la ECU, por lo que en muchos casos hay que usar algún tipo de interfaz.

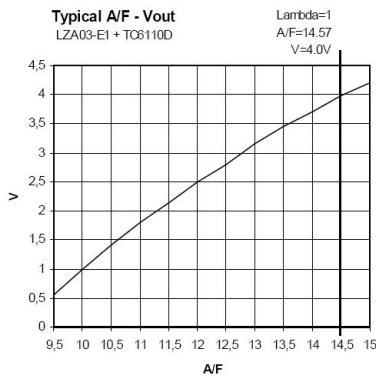


Figura 17. Curva de calibración de un sensor lambda

La ECU posee entradas específicas para los sensores más importantes, como los sensores lambda por ejemplo, pero tiene también entradas genéricas, cuyo rango de tensión se encuentra entre 0 y 5V [3]. Cualquier sensor que no tenga este rango de tensiones de salida o necesite un cierto acondicionamiento sólo podrá ser conectado a la ECU utilizando un determinado interfaz, que adapte sus características de funcionamiento a las utilizadas por la ECU. Por ejemplo, el sensor que detecta la posición del acelerador es potenciométrico, es decir, las acciones del piloto sobre el acelerador se transforman en variaciones de la resistencia vista entre los terminales del sensor. Es necesario un interfaz que transforme estas variaciones de resistencia en variaciones de tensión que puedan ser reconocidas por la ECU.

Una de las partes más importantes a la hora de la correcta interpretación de los datos aportados por los sensores es la calibración de los mismos. Es decir, ser capaz de obtener el valor de la magnitud física que se desea medir a partir del valor de tensión aplicado en el canal de entrada de la ECU. Por ejemplo, en la figura 17 observamos la tensión de salida que ofrece un determinado sensor lambda con respecto a la relación entre aire y gasolina que mide. Dado el rango de tensiones de salida que tiene este sensor, podría conectarse sin problema a cualquier entrada genérica de la ECU, pero habría que calibrar la ECU para que si mide 4V, sepa que se corresponde con una relación de mezcla 14.57:1. Esto se consigue utilizando mapas de calibración, los cuales pueden ser vistos como tablas en las que se relaciona el valor de la magnitud física a medir con el valor de tensión leído por la ECU y cuya representación es lo que se observa en la figura 17.



Figura 18. Magneti Marelli Marvel 8

No sólo el rango de tensiones de entrada está limitado, sino que también está limitada la salida. La solución para los actuadores es la misma que la empleada en el caso de los sensores, utilizar interfaces. Por ejemplo, la ECU controla el flujo de extracción de gasolina del depósito de combustible actuando sobre las dos bombas utilizadas. Pero no interactúa directamente con ellas, sino que lo hace a través de un regulador de tensión. El funcionamiento de la bomba es inverso al del sensor lambda explicado antes, es decir, en esta ocasión, para conseguir un cierto flujo de gasolina, la ECU ordena al regulador de tensión que aplique un determinado voltaje a la bomba. La relación entre voltaje y flujo depende de cada bomba y se introduce, al igual que antes, mediante mapas de calibración.

IV-C. ECU

Mucho se ha hablado ya de lo que es una ECU, pero hasta ahora no se había visto ninguna, en la figura 18 tenemos el modelo Marvel 8 de Magneti Marelli [3]. Esta ECU tiene un nivel ligeramente inferior al necesario para Fórmula 1, pero

se trata de un modelo comercial de de altas prestaciones que sí que es utilizado por ejemplo en la IRL. De todos modos, su análisis nos va a permitir hacernos una idea bastante precisa de las características que debe reunir la ECU de un monoplace de Fórmula 1.

La Marvel 8 está diseñada para controlar un motor de 8 cilindros y una caja de cambios. Dispone de entradas específicas para dos sensores lambda, dos termopares, cuatro conmutadores giratorios, seis sensores de temperatura NTC y cuatro dispositivos de efecto Hall. Además posee 24 entradas genéricas analógicas con un rango entre 0 y 5V para poder conectar cualquier otro tipo de sensor mediante un interfaz, finalmente dispone 4 entradas diferenciales. La resolución de todas estas entradas es de 12 bits. En lo que a salidas se refiere, tiene 18 salidas para la activación de inyectores, 8 para bobinas de encendido y 2 más para los calentadores utilizados por los sensores lambda. Tiene también 6 salidas proporcional PWM para el control de las electroválvulas de caja de cambios y 3 salidas H-Bridge para el control de motores eléctricos, como los de las bombas de gasolina. Puede mostrar su funcionamiento al piloto mediante su conexión a los displays de información del volante. En lo referente a arquitectura, posee dos microcontroladores, un DSP y dos FPGAs. No se comenta nada de sus características de comunicación con otros equipos ni de sus capacidades para la telemetría, ya que estos aspectos se tratan con bastante detenimiento en una sección posterior.

Las ECUs de Fórmula 1 gestionan además del motor y la caja de cambios, el diferencial y el KERS, entre otros sistemas, y tienen entradas específicas para otros muchos sensores, pero poseen una estructura muy similar a la de la Marvel 8.

Como se ha visto, una ECU es un sistema muy complejo que no podría ser utilizado sin el correspondiente apoyo software.

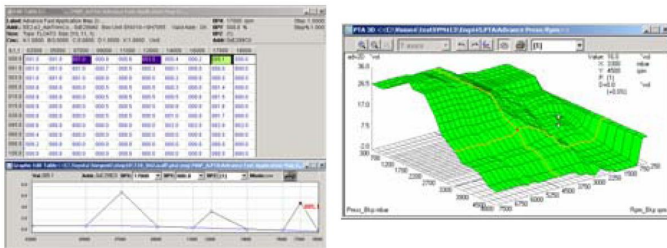


Figura 19. Magneti Marelli Vision4

IV-D. Software

Las dos grandes tareas que tiene que afrontar el software que realiza la gestión de la ECU son el control y calibración y la creación de los programas que definirán las distintas estrategias de control.

IV-D1. Herramientas de configuración: Los fabricantes proporcionan un software básico de configuración junto con la ECU [1]. Dicho software es instalado en un ordenador que se conectará a la ECU por alguno de los métodos de los que dispone. Esta conexión permite tanto la configuración de la ECU, como la monitorización de los datos adquiridos por la

misma, de este modo puede comprobarse la corrección de las configuraciones realizadas. Para la calibración de sensores y actuadores se introducen los distintos mapas de calibración utilizando generalmente un tipo específico de archivo. Dichos mapas podrán ser modificados a posteriori si se cree oportuno. Es posible realizar una visualización del mapa de calibración introducido, bien a modo de tablas o bien mediante representaciones gráficas. En la figura 19 podemos ver ambas visualizaciones obtenidas con un programa de configuración de Magneti Marelli, el Vision4 [3].

IV-D2. Generación del código de aplicación: Este bloque es el que provee de inteligencia a la ECU. Cualquier actuación de la misma está definida por una estrategia de control determinada. A modo de ejemplo, podríamos proponer una estrategia de control muy simplificada para el manejo de una bomba de gasolina. Tendríamos un sistema con dos entradas, la del sensor de presión del combustible que se entrega al regulador de presión y la de la cantidad de gasolina que queda en el depósito. Hay una sola salida, el flujo de gasolina que ha de conseguirse con la bomba. La estrategia de control ha de asegurar que, siempre que quede gasolina en el depósito, la presión de la misma que se entrega al regulador este entre unos límites. Si se supera el límite superior se ordena al regulador de tensión que controla la bomba que disminuya el flujo y viceversa. Pongamos además, que los niveles de presión máximo y mínimo se seleccionan en función de los requerimientos del piloto mediante un conmutador giratorio del volante. Sería el piloto el encargado de seleccionar los valores límites de presión que más se adecúen a sus necesidades. Los conjuntos de valores requeridos se conocen como mapas de funcionamiento.

Estamos ya en disposición de poder dar una definición más o menos clara de lo que es una estrategia de control, es un procedimiento mediante el cual se generan unas determinadas actuaciones en base a los datos obtenidos mediante un conjunto de entradas y siempre de acuerdo a un mapa de funcionamiento o modelo matemático.

Los mapas de funcionamiento más conocidos son los que gestionan el motor, conocidos como mapas motor. En función del estado de la pista, el tipo de neumático utilizado, el estado de la carrera, etc, el piloto selecciona un mapa motor distinto. Hay diversos mapas que permiten optimizar el control del coche en mojado, la duración de las ruedas y el motor o conseguir ahorrar todo el combustible posible.

La tarea de introducir las distintas estrategias de control en la ECU, junto a otra infinidad de programas es ardua y es necesario un potente software para completarla con éxito. Las estrategias son programadas por los responsables de la ECU utilizando un lenguaje de programación de alto nivel, como puede ser C o Simulink, en caso de emplear un lenguaje gráfico. Es el software proporcionado por el fabricante el encargado de traducir el código desarrollado en órdenes entendibles por la ECU e introducir dichas órdenes dentro del sistema operativo almacenado en la misma [1].

IV-E. Interfaces con otros dispositivos

Una ECU debe poder comunicarse con una serie bastante amplia de equipos. Equipos que pueden ir desde un transmisor

radio, para el envío de datos telemétricos, hasta los propios ordenadores que los ingenieros conectan al monoplaza nada más parar en boxes.

Volviendo a la ECU Magneti Marelli Marvel 8 analizada anteriormente, y que tan útil está resultando, esta dispone de interfaces CAN, ARCNet y Ethernet. Estos tres interfaces son los más utilizados en el automovilismo, y en vehículos en general gracias a sus características, por lo que vamos a profundizar algo más en su funcionamiento.

IV-E1. Bus CAN: CAN (Controlled Area Network) fue desarrollado por Bosch en los 80 para el intercambio de información entre sus unidades de control electrónico de automóvil. Tiene una arquitectura multimaestro y permite compartir una gran cantidad de información entre los distintos módulos conectados a la red [10], soportando control distribuido en tiempo real con un alto nivel de seguridad y multiplexación. Permite velocidades de transferencia de datos de hasta 1 Mbps.

La ECU utiliza CAN para conectarse con los displays de información que hay en el volante. También para la interconexión con el Data Logger, cuya función se especifica en el siguiente apartado.

IV-E2. Bus ARCNet: ARCNet es un estándar de red de área local, alcanza velocidades de hasta 2Mbps mediante una técnica de acceso Token Ring.

Este estándar es el elegido en la mayoría de ocasiones para conectar la ECU con el equipo transmisor de telemetría.

IV-E3. Ethernet: Ethernet es un estándar de redes de área local, es el más empleado en la actualidad para tal fin. Utiliza para la transmisión de información un cable UTP y tiene una velocidad de 10Mbps mediante una técnica de acceso CSMA/CD. Una segunda versión del protocolo, Fast Ethernet, permite alcanzar hasta 100Mbps. La Marvel 8 puede funcionar a cualquiera de las dos velocidades.

Ethernet permite, una vez está el monoplaza en boxes, conectar su ECU a la red de ordenadores de los ingenieros del equipo, permitiendo cualquier tipo de configuración de la misma, de monitorización de datos o de descarga de datos de telemetría.

V. TELEMETRÍA

Podemos definir la telemetría como la medición a distancia de magnitudes físicas. Su utilización dentro de la Fórmula 1 es una aplicación directa de su definición, permite hacer llegar al equipo las mediciones de múltiples parámetros relacionados con el funcionamiento del monoplaza.

No todos los sensores se utilizan como entradas de las rutinas o estrategias de control de la ECU, aunque sí que son susceptibles de ser usados para tal fin. Hay sensores que se utilizan para obtener información acerca del comportamiento del monoplaza y del estado de todos los sistemas del mismo. Dichos datos de funcionamiento son adquiridos por la ECU para hacerlos llegar al equipo.

El modo más simple de conseguir que los ingenieros dispongan de los datos antes mencionados es mediante la utilización de un dispositivo conocido como Data Logger. Su traducción literal sería “registrador de datos” y el nombre es totalmente descriptivo a la hora de entender su funcionamiento. El Data

Logger almacena los datos adquiridos por la ECU mientras el monoplaza está en pista y permite que estos sean descargados al llegar a boxes. El almacenamiento de los distintos parámetros es totalmente configurable. El Data Logger puede ser parte de la propia ECU o bien ser un equipo externo, en este caso se conectaría a la ECU mediante un bus CAN. Independientemente de la arquitectura seleccionada, dispone de un interfaz Ethernet cuyo conector se lleva a algún lugar accesible desde el exterior para permitir la conexión con equipos externos. Simplemente sería necesario conectar un ordenador a dicho interfaz y ejecutar un software de descarga de datos. El principal inconveniente de este sistema es que no permite conocer cuál es el estado del monoplaza hasta que el mismo no retorna a boxes, lo que imposibilita una rápida detección de problemas.

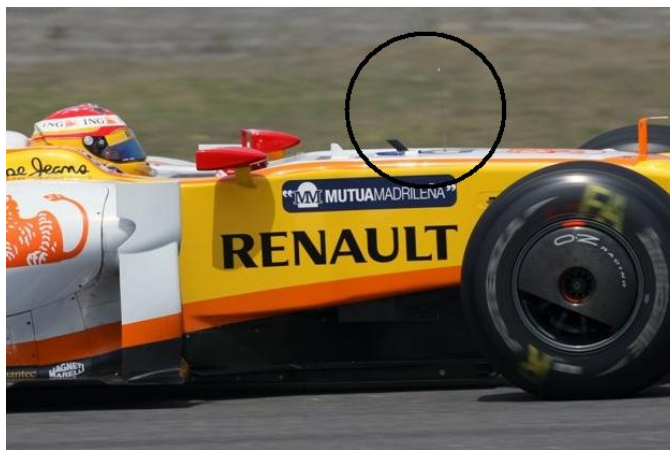


Figura 20. Situación de las antenas

La solución de este problema pasa por la utilización de un enlace radio entre el Fórmula 1 y un equipo receptor, que permite la transmisión de datos en tiempo real. De este modo, se consigue monitorizar el funcionamiento de todos los sistemas y también del comportamiento del bólido, permitiendo la detección inmediata de cualquier anomalía de funcionamiento. Esto permite solucionar el problema o minimizar su impacto, en caso de no ser posible la primera opción. Para explicar mejor el funcionamiento del sistema analizamos los distintos bloques que lo componen.

El primero de ellos es el que se monta en el monoplaza y se trata de un transmisor radio y una o varias antenas. El transmisor se conecta a la ECU mediante un enlace ARCNet y se configura para que transmita los datos de mayor interés, ya que el ancho de banda está limitado. En la figura 20 podemos ver la situación de las antenas en el morro de un Fórmula 1. El otro bloque es el que se instala en el muro de boxes y consta de un equipo receptor con su correspondiente antena. Es el que permite recoger toda la información enviada por el monoplaza y ofrecerla a través de una conexión Ethernet al equipo. La transmisión de la información no puede hacerse de modo arbitrario, un Gran Premio de Fórmula 1 suele ser seguido por más de 100000 espectadores de los que la mayoría no dudará en llamar por teléfono a sus amigos para que puedan comprobar el ruido de los motores de los monoplazas. Además, hay

una multitud de medios de información transmitiendo hacia todo el mundo y cientos de intercomunicadores radio. En este escenario de extrema saturación del espectro radioeléctrico, la transmisión de información puede resultar muy difícil sin los dispositivos adecuados.

Tomamos como referencia los equipos transmisor y receptor CBT-610 y CBR-610 de McLaren Electronic Systems [4] para obtener una mejor descripción de las características del enlace. La transmisión de datos se realiza dentro del rango de 1450 a 1650MHz, situado dentro de la banda L y ocupando canales de 2MHz para transmitir un máximo de 2Mbps. Se utiliza una modulación OFDM con 74 portadoras y un ancho de banda 1.85MHz. La protección frente a errores se realiza con un Turbo Código, aleatorización y cálculo de CRC.

Los dispositivos que utilizan los Fórmula 1, proporcionan también capacidades de cifrado que hacen muy difícil el acceso a los datos enviados. Además, aunque dicha información fuera obtenida se requiere una correcta ordenación de los datos para poder proceder a su interpretación, lo cual es prácticamente imposible de conseguir.

En la figura 21 podemos ver distintos datos de telemetría recogidos en el circuito de Jerez. Encontramos datos como la velocidad del monoplaza, la posición del acelerador y el freno, la posición del volante y todos ellos representados frente a la posición en el circuito del coche.

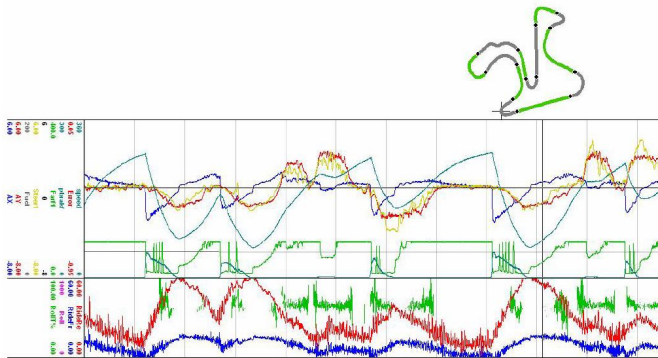


Figura 21. Datos de Telemetría

El envío de telemetría no se realiza exclusivamente del monoplaza a boxes, sino que va más allá. Los Grandes Premios del mundial de Fórmula 1 se organizan en un buen número de emplazamientos dispersos por el mundo y el transporte equipos resulta muy caro. La imposibilidad de poder desplazar todo el equipo deseado a cada carrera supone un importante hándicap a la hora de analizar los datos del monoplaza. Las escuderías han solucionado este problema utilizando un enlace por satélite entre el lugar donde se celebra el Gran Premio y su fábrica. Los potentes ordenadores que se encuentran allí ofrecen una mayor capacidad de cálculo y, por lo tanto, una mayor agilidad en la toma de decisiones.

VI. OTROS SISTEMAS

Además de los sistemas descritos con anterioridad, un Fórmula 1 posee otros muchos componentes electrónicos. Los más importantes serán descritos con brevedad.

VI-A. Radio

La radio es la herramienta más importante para permitir la comunicación del piloto con sus ingenieros. El equipamiento radio del monoplaza, que está colocado debajo de las rodillas del piloto permite transmitir y recibir señales utilizando una modulación en frecuencia dentro de la banda UHF.

La comunicación entre box y el piloto es simple, salvando la importante saturación del espectro radioeléctrico comentada con anterioridad, ya que el piloto utiliza unos auriculares especiales que consiguen aislar prácticamente todo el ruido del motor y que, por norma general, le permiten oír de forma clara a sus ingenieros.

En el caso de la comunicación piloto box la cosa se complica. Un motor de Fórmula 1 genera un ruido, considerado música celestial por algunas personas, de hasta 140dB de presión sonora, superior al generado por un avión al despegar. Que un micrófono recoja de modo claro la voz del piloto en estas condiciones no es nada sencillo. La solución al problema pasa por la utilización de una tecnología de cancelación de ruido que requiere un micrófono de doble cara, una de las caras, orientada hacia la boca del piloto recoge sus palabras, además de la enorme cantidad de ruido. La otra cara del micrófono sólo recoge el ruido, mediante la comparación de ambas señales puede realizarse una eliminación más o menos buena del mismo [11].

VI-B. Cámaras de Televisión

La Fórmula 1 es seguida por más de 500 millones de espectadores en todo el mundo y es por este motivo por el que los contratos de publicidad que firman los equipos alcanzan cifras astronómicas. De ahí la importancia de poder ofrecer las imágenes más espectaculares de cada carrera en un intento de fomentar al máximo el interés de la audiencia. Qué mejor lugar para colocar una cámara que a bordo de los monoplazas.

Otro de los sistemas que incluye cada Fórmula 1 es un completo equipo de televisión formado por 2 cámaras cuyas imágenes junto con la señal de sonido han de ser transmitidas en tiempo real para que puedan ser ofrecidas por televisión.

VI-C. GPS

Todos los Fórmula 1 poseen un dispositivo de posicionamiento GPS (Sistema de Posicionamiento Global) que permite conocer en todo momento la posición de cada uno de los monoplazas. Se introdujo por razones de seguridad, para permitir al control de carrera informar a los pilotos de posibles riesgos mediante el sistema de luces que se instala en el volante. También se utiliza en la toma de decisiones estratégicas durante la carrera, ya que se intenta elegir el momento de entrada en boxes para repostar en función del tráfico. Para ello, el conocimiento de la posición de cada uno de los participantes es indispensable.

VI-D. Accident data recorders (ADR)

Es una especie de Data Logger que se utiliza para poder acceder a toda una serie de datos en caso de producirse un accidente. El dispositivo se encuentra situado dentro del

cockpit, de modo que este lo más protegido posible y ha de almacenar, durante toda la carrera, la información generada por dos acelerómetros colocados en lugares estratégicos del monoplace. Además, también ha de guardar la velocidad del coche y la posición del acelerador y la dirección entre otros parámetros [12].

Como curiosidad y muestra de funcionamiento del dispositivo, los datos recogidos del ADR en el accidente que sufrió Robert Kubica durante el Gran Premio de Canadá del año 2007 dicen que el polaco sobrevivió a un impacto a 230km/h contra el muro, lo que le supuso una deceleración de 75G.

Los datos recuperados son analizados para comprobar el funcionamiento de las medidas de seguridad tanto del coche como del circuito, con el objetivo de llevarlas al extremo.

VII. CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha intentado exponer el funcionamiento del sistema electrónico de un Fórmula 1, haciendo énfasis en los aspectos más técnicos. No obstante, el objetivo del artículo es el de dar una visión global de dicho sistema, por lo que hay ciertos dispositivos de los que se ha hablado de un modo superficial. La profundización en todos los conceptos expuestos requeriría una extensión infinitamente superior.

Se comenzó clasificando los distintos tipos de sensores y explicando sus fundamentos de funcionamiento para una mejor comprensión de sus capacidades. En función de dichas capacidades, el sensor es utilizado para una cierta aplicación dentro del monoplace. A continuación, se hizo lo propio con los actuadores, pero con una menor profundidad en las explicaciones debido a que en este bloque aparecen multitud de conceptos mecánicos que no son, ni de lejos, objetivo del artículo.

El análisis de la ECU se realizó de un modo lo más estructurado posible dada su enorme complejidad. Tras un primer acercamiento a las características del volante, se prosiguió con los requerimientos de la ECU para poder utilizar un sensor determinado. El análisis de su arquitectura se hizo gracias a un modelo comercial, con un especial hincapié en los aspectos software, tanto de configuración como de fundamentos de control. La sección finalizó con un rápido análisis de las distintas tecnologías que permiten la comunicación entre los diversos dispositivos electrónicos del monoplace.

Seguidamente se intentó mostrar el funcionamiento del sistema telemétrico del coche, siempre desde el punto de vista técnico, centrándonos en los equipos empleados para hacer posible el funcionamiento de dicha herramienta.

Finalmente, y de un modo bastante rápido, se comentó la utilización de otros sistemas electrónicos importantes.

REFERENCIAS

- [1] Jim Waldo. Embedded computing and formula one racing. *Pervasive Computing IEEE*, 4(3):18–21, July-Sept 2005.
- [2] L. Cocco and P. Daponte. Metrology and formula one car. In *Technology Conference - I²MTC 2008*, Victoria, Vancouver Island, British Columbia, Canada, May 12-15 2008.
- [3] Magneri Marelli. *Motorsport Products 2008*.
- [4] McLaren Electronics Systems. *Products*.

- [5] David Tremayne. *The science of Formula 1 design*. Haynes Publishing, 2^a edition, 2006.
- [6] FIA. *2008 Formula One Technical Regulations*, December 2007.
- [7] Safety-Car.net. El sistema hidráulico. <http://www.safety-car.net/article.php/2005012804572350>.
- [8] MECANICAVirtual. Sistema de encendido diés (direct ignition system). <http://www.pcworld.com/article/0,aid,120050,00,asp>, December 2004.
- [9] F1 Technical. Tackling kers in formula one. <http://www.f1technical.net/features/11805>.
- [10] Jose Antonio López Fresno. Nodo de comunicación basado en el bus can, 2004.
- [11] F1 Technical. Radio communications. <http://www.f1technical.net/features/3759>.
- [12] Peter G. Wright and FIA. The analysis of accident data recorder (adr) data in formula 1. *Motorsports Engineering Conference & Exposition*, November 2000.