

# 3. Estado del arte: Sistemas de control de potencia en vehículos híbridos

---

## 3.1. Introducción

En la bibliografía puede encontrarse documentación donde se introducen los conceptos básicos de las distintas estrategias para tratar el problema del control de gestión de potencia en vehículos híbridos [1]. Más concretamente, estas estrategias de control van programadas en un controlador supervisor instalado en el vehículo para distribuir la potencia necesaria desde las fuentes de energía hasta las ruedas, o desde las ruedas hacia las fuentes de energía, en el caso de la frenada regenerativa. En este proyecto, las fuentes de energía del vehículo son las baterías y la pila de combustible.

Generalmente el objetivo del sistema de control es intentar que se proporcione la potencia demandada por el conductor del vehículo en cada momento, a la vez que intentar minimizar el consumo de combustible. Todo esto haciendo que cada una de las partes del sistema funcione dentro de una serie de restricciones mecánicas, eléctricas o de seguridad.

Durante esta sección puede que se mencione un motor de combustión entre las fuentes de potencia del vehículo híbrido. Esto se ha hecho dependiendo de si los artículos a los que se hace referencia tratan el caso de vehículos híbridos con motor de combustión. De cualquier forma, la pila de combustible generalmente es intercambiable, en el sentido del control, de forma inmediata con el motor de combustión en cada uno de los conceptos que se explican en los artículos.

### 3.2. Control Heurístico

Los controladores Heurísticos están basados en reglas Booleanas o reglas borrosas, involucrando varias variables del vehículo. Esta es la estrategia de control más simple de las que aquí se presentan. La principal ventaja de los controladores heurísticos es que son intuitivos y fáciles de implementar, y pueden dar buenos resultados, los cuales dependen fuertemente de los límites escogidos para las distintas reglas borrosas.

Como se explica en [1], una típica aproximación heurística, a veces llamada “estrategia de apoyo eléctrico o asistencia eléctrica”, está basada en la demanda de par y en la velocidad del vehículo [2], [3], [4], [5]. En esta estrategia, el parámetro clave para el control es la velocidad a la cual se elige operar con una fuente de potencia u otra. En la estrategia llamada “asistencia eléctrica”, se considera un motor de combustión que entrega exceso de potencia cuando el estado de carga de las baterías alcanza un límite inferior (también conocida como “técnica on/off” [3]). En esta estrategia, se selecciona un nivel mínimo y otro máximo para el estado de carga de las baterías, encendiéndose y apagándose el motor de combustión según el SOC, y dando las baterías asistencia en determinados picos de potencia para ayudar a ese motor de combustión. En cambio, la estrategia a veces llamada “asistencia eléctrica equilibrada” modula continuamente el reparto de potencia entre los diferentes dispositivos para mantener el estado de carga de las baterías a un nivel más o menos constante [4].

Otro tipo de controlador heurístico basado en el par es el que se presenta en [6], donde además de intentar mejorar la autonomía del vehículo y el balance de carga en las baterías, se intenta reducir las emisiones de NOx del motor de combustión. Para esto último, se hace operar al motor de combustión interna en su rango de mayor eficiencia, y la referencia para el SOC se calcula considerando también las emisiones de NOx. Otro artículo que trata de utilizar el motor de combustión en su rango de mayor eficiencia, aunque sea solamente por conseguir un mayor ahorro de combustible, se presenta en [7].

Otras estrategias usan otro tipo de umbrales, como la fracción de máximo rendimiento de un motor de combustión (o de la pila de combustible) [4], o como usar un umbral de aceleración [8]. O lo que parece más directo, que es usar umbrales de potencia, ya que tiene la ventaja de ser directamente comparables con los límites de potencia de cada dispositivo [9], [10], [11], [12], [13].

Algún autor intenta también usar otras combinaciones más complejas de variables, como en [14].

### 3.3. Control Óptimo

Algunos algoritmos se basan en la optimización global del sistema de gestión de potencia usando técnicas de programación dinámica o de control óptimo, como en [15], [16], [17], donde se aplican estos conceptos para el diseño de un controlador para el vehículo híbrido. Para dicho control, se establece una función de coste que depende del consumo de combustible, y unas restricciones relacionadas con la velocidad angular y el par del motor eléctrico, el estado de carga de las baterías, etc. Para hacer que el estado de carga de las baterías no se desvíe mucho del valor óptimo de funcionamiento, se añade otro término a la función de coste para penalizar esto. Así, utilizando el método de programación dinámica de Bellman [18], se va minimizando el valor de ésta función de coste. Resumiendo, el problema de optimización puede formularse de la siguiente manera [1]: para cada instante de tiempo  $t$ , desde  $t = 0$  hasta un cierto tiempo horizonte  $t_f$ , se evalúa la ley de control óptimo que minimice la energía de combustible usada en el ciclo entero, con un determinado valor final del estado de carga.

Se han realizado algunos estudios acerca de, usando programación dinámica, qué tipo de estrategia considerar. Por ejemplo, una posibilidad sería usar programación dinámica y utilizar como uno de los objetivos de control consumir la energía almacenada en las baterías lo antes posible (“EV-mode control”), ya que mientras consumimos esta energía no se consume combustible. Otra posibilidad sería alcanzar el estado de carga mínimo de las baterías sólo al final del ciclo de conducción que se esté simulando (“Blended control”). Como se demuestra en [42], el mínimo consumo de combustible entre estas dos posibilidades se alcanza con “Blended control”.

Todas estas técnicas están basadas en el conocimiento a priori de las condiciones de conducción futuras (de las potencias demandadas al vehículo), que en el caso de una simulación por ordenador se proporcionan con un ciclo de conducción. Aunque actualmente se están realizando estudios para llevar a cabo una estrategia de control óptimo mediante la utilización de sistemas GPS para la planificación de caminos, lo cual posibilitaría el empleo de una estrategia de control óptimo, esto no sería viable para una conducción normal no planificada. Evidentemente, por lo anteriormente comentado, hasta ahora las estrategias de control anteriores son inviables como implementación práctica, ya que en un vehículo real necesitamos una estrategia que funcione en tiempo real.

Por otra parte, estas estrategias a las que se apuntaba primeramente serán de mucha utilidad a la hora de simular el sistema ya que proporcionan una cota mínima de consumo de combustible (hidrógeno), y así podremos hacernos una idea de cuánto de bueno es la estrategia de control en tiempo real que se ha desarrollado.

### 3.4. Control Sub-Óptimo

Esta es la primera estrategia de control desarrollada en este proyecto.

Como se apuntaba anteriormente, las técnicas de control basadas en control óptimo son inviables para su utilización en el control del vehículo real, ya que para la realización de esta estrategia de control en tiempo real ha de considerarse que desconocemos las condiciones futuras de conducción. Para su realización, la propuesta más consistente es la que introduce [1] y se desarrolla en [19], [20], [21], como sistema de control de gestión de potencia en un vehículo híbrido. Esta estrategia conocida como ECMS (“Equivalent Consumption Minimization Strategy”), es el paso de la estrategia de control óptimo al tiempo real, para que pueda implementarse como controlador supervisor en el vehículo real. El controlador ECMS considera un factor de equivalencia para comparar la energía del flujo de potencia “reversible” (este es el flujo de potencia que va desde las baterías al motor eléctrico o viceversa) y la energía usada del combustible (en nuestro caso la obtenida a partir del hidrógeno en la pila de combustible). De esta forma la función de coste, que se intentará minimizar en cada instante, se evaluará como la suma de la energía procedente del combustible y la energía de combustible equivalente a la usada a partir de las baterías.

Podría considerarse una variante de esta estrategia: la estrategia “ECMS adaptativa” [42]. En ella se considera que una estimación del factor de equivalencia on-line, en lugar de off-line. Una posibilidad sería la optimización on-line utilizando una predicción del ciclo de conducción (la utilización de un sistema GPS sería muy útil), lo cual aumentaría los requerimientos computacionales del controlador. Otra posibilidad es el reconocimiento de patrones de conducción, optimizando el factor de equivalencia off-line para varios patrones de conducción, y viendo a qué patrón se acerca más la conducción actual. Ésta sería una solución más rápida que la anterior.

En resumen, esta estrategia trata el problema de la minimización de una función de coste, mientras mantiene al sistema dentro de unas restricciones. Como se verá más adelante, el problema del mantenimiento del estado de carga de las baterías se consigue de manera indirecta a través del factor de equivalencia que se mencionaba.

### 3.5. Control Predictivo

Esta es la segunda estrategia de control desarrollada en este proyecto.

Recientemente se está empezando a enfocar este el problema del control de potencia en vehículos híbridos también desde el punto de vista del control predictivo, como en [22], donde se intenta operar un motor de combustión del vehículo en un rango óptimo para minimizara el combustible, incluyendo la secuencia óptima de las marchas. O de forma menos particular y más reciente en [23], [24], [25], donde se prepara el modelo de un vehículo híbrido para poder diseñar un controlador MPC [26], [27].

Esta es una estrategia de control avanzada que se ha extendido significativamente en los últimos años en la industria [28]. Algunas de las ventajas [27] que ofrece la estrategia de control MPC (Model Predictive Control) son el hecho de que la formulación básica es fácilmente extensible a sistemas MIMO (Multiple Inputs, Multiple Outputs); y que el concepto general que sigue el MPC es relativamente fácil de entender; además es una importante herramienta para tratar problemas con restricciones, cuyo caso se contempla en este trabajo. Los principales elementos que constituyen la formulación del problema son:

- Una función de coste que penaliza las desviaciones de las salidas predichas con respecto a las referencias.
- Modelo interno del sistema (necesario para predecir las salidas).
- Trayectorias de referencia para las salidas del sistema en bucle cerrado.
- Restricciones (de las salidas y de las señales de control aplicadas al sistema).
- Optimización on-line para determinar las señales de control actual y futuras que minimicen la función de coste.
- Principio de horizonte deslizante: el horizonte de predicción se va desplazando en cada instante (el horizonte de predicción no tiene por qué ser igual al horizonte de control).

Esta estrategia se explicará de forma más extensa en los siguientes apartados, cuando se desarrolle una aplicación para el control de un vehículo híbrido con pila de combustible.