

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Modelado y control para gestión de potencia en vehículos híbridos

Autor: Álvaro Cano Rodríguez

Tutor: Miguel Ángel Ridaó Carlini

**Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2015



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Modelado y control para gestión de potencia en vehículos híbridos

Autor:
Álvaro Cano Rodríguez

Tutor:
Miguel Ángel Ridaó Carlini

Dep. Ingeniería de Sistema y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2015

Trabajo de Fin de Grado:
Modelado y control para gestión de potencia en vehículo híbridos

Autor: Álvaro cano Rodríguez

Tutor: Miguel Ángel Ridaó Carlini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A Elena

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos aquellos que me han apoyado a lo largo de estos años.

Gracias Elena por haberme ayudado tanto, por ofrecerme siempre lo mejor de ti y siempre estar dispuesta a ayudarme, a darme ese apoyo diario que puede no parecerlo pero es muy importante para mí, de verdad, gracias.

Por supuesto agradecerle a mis padres todo lo que me han dado, a ellos les debo todo lo que soy y todo lo que he conseguido, gracias por haber luchado tanto por mí y haberme educado tal como lo habéis hecho.

Agradecer a mi hermano que para mí siempre fue un ejemplo a seguir, un espejo donde mirarse y del que me siento muy orgulloso.

No puedo olvidar a mis amigos que he hecho durante estos años, personas que además de compañeros se han convertido en amigos, amigos que tendré para siempre y con los que he compartido bastantes horas de estudio y dolores de cabeza.

Por último agradecer a mi tutor toda la paciencia y buen trato recibido por su parte, por haberme dedicado su tiempo y haberme aconsejado en cada momento.

Muchísimas gracias a todos.

Álvaro Cano Rodríguez

Sevilla, 2015

Resumen

En este trabajo se ha llevado a cabo el modelado de un vehículo híbrido completo. El vehículo consta de tres fuentes de potencia, una batería, una pila de combustible y un supercondensador. Todas las fuentes así como el generador de potencias a partir de un ciclo de conducción, y el control sobre la distribución de la potencia, han sido modelados en Simulink.

A este modelo se le ha realizado un control heurístico y un control óptimo llamado equivalent consumption minimization strategy, tanto para el vehículo con tres fuentes de potencia, como para el mismo vehículo con tan solo dos de ellas. Además se han comparado los resultados obtenidos en dichas simulaciones.

El objetivo del trabajo es minimizar el consumo de combustible de los vehículos híbridos a partir de una distribución de la potencia lo más óptima posible.

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	2
ÍNDICE	2
TABLA 5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CONTROL ECMS CON TRES FUENTES DE POTENCIA PARA DIFERENTES INCLINACIONES CONSTANTES.	I
67	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Apartado introductorio	1
1.2. Historia de los vehículos eléctricos	1
1.3. Sistema de configuración de los vehículos híbridos	2
1.4. Flujos de potencia	5
CAPÍTULO 2. INTERESES Y OBJETIVOS	11
2.1. Intereses	11
2.2. Objetivos	13
CAPÍTULO 3. MODELOS	15
3.1. Modelo del generador de potencias y del motor	16
3.2. Modelo de la batería	19
3.3. Modelo de la pila y tanque de hidrógeno	21
3.4. Modelo del supercondensador	24
3.5. Ciclos de conducción	25
3.6. Cálculo de consumo	26

CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS DE CONTROL	29
4.1. Control heurístico	30
4.1.1. Implementación del control heurístico	31
4.1.2. Experimentos realizados con el control heurístico	35
4.2. Control óptimo	49
4.2.1. Control equivalent consumption minimization strategy (ECMS)	50
4.2.2. Implementación del control ECMS	53
4.2.3. Experimentos realizados con el control ECMS	59
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	I

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del control heurístico para rango de la pila entre [5700,54000] y dos fuentes de potencia.	37
Tabla 2. Resultados del control heurístico para rango de la pila entre [5700,36000] y dos fuentes de potencia.	38
Tabla 3. Resultados del control heurístico para rango de la pila entre [5700,29000] y dos fuentes de potencia.	38
Tabla 4. Resultados del control ECMS con dos fuentes de potencia para diferentes factores equivalentes constantes.	61
Tabla 5. Resultados obtenidos para el control ECMS con tres fuentes de potencia para diferentes inclinaciones constantes.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de potencia en híbridos en serie para $u=1$.	7
Figura 2. Flujo de potencia en híbridos en serie para $u<0$.	8
Figura 3. Flujo de potencia en híbridos en serie para $0<u<1$.	8
Figura 4. Flujo de potencia en híbridos en serie para $u=1$.	8
Figura 5. Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u=1$.	10
Figura 6. Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u<0$.	10
Figura 7. Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $0<u<1$.	10
Figura 8. Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $0<u<1$.	10
Figura 9. Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u=0$.	10
Figura 10. Flujo de potencia en híbridos combinados en modo zev.	11
Figura 11. Flujo de potencia en híbridos combinados en modo carga de batería.	11
Figura 12. Flujo de potencia en híbridos combinados en modo asistente.	11
Figura 13. Flujo de potencia en híbridos combinados en modo zev regenerativo.	12
Figura 14. Flujo de potencia en híbridos combinados en modo motor de comb.	12
Figura 15. Evolución de las emisiones de CO ₂ con el aumento de vehículos.	13
Figura 16. Evolución de las emisiones de diferentes contaminantes con el aumento de vehículos.	14
Figura 17. Esquema del modelo de la batería.	22
Figura 18. Esquema del modelo cuasiestático de la pila.	24
Figura 19. Típico manejo de la potencia de un híbrido en paralelo.	31
Figura 20. Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.	39
Figura 21. Kilogramos de hidrógeno frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.	39
Figura 22. Potencias demandadas a la batería y a la pila frente al tiempo, con ArtmW130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.	40
Figura 23. Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500 Kg.	41

Figura 24. Kilogramos de h2 frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500 Kg.	41
Figura 25. Potencias demandadas a la batería y a la pila, con ArtMw130 para heurístico con dos fuentes de potencia y un peso del vehículo de 1500Kg.	42
Figura 26. Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtUrban para control heurístico con dos fuentes de potencia.	43
Figura 27. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 1000.	44
Figura 28. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 100.	45
Figura 29. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 100.	45
Figura 30. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 50.	46
Figura 31. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 50.	47
Figura 32. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500 Kg.	48
Figura 33. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500 Kg.	48
Figura 34. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con WLTP class3 para control heurístico con tres fuentes de potencia.	49
Figura 35. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con WLTP class3 para control heurístico con tres fuentes de potencia.	50
Figura 36. Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo con ArtUrban para control heurístico con tres fuentes de potencia.	51
Figura 37. Modelo usado para calcular los factores equivalentes constantes.	55
Figura 38. Curva obtenida para la batería de factores equivalentes constantes.	56
Figura 39. Curva obtenida para el supercondensador de factores equivalentes constantes.	57
Figura 40. Ejemplo de lo que realiza el controlador.	59

Figura 41. Estados de carga de la batería y kilogramos de h2 frente al tiempo, para el control ECMS con dos fuentes de potencia.	63
Figura 42. Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia.	63
Figura 43. Estado de carga de la batería y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia y el ciclo ArtMw150.	64
Figura 44. Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.	64
Figura 45. Estado de carga de la batería y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia y el ciclo ArtUrban.	65
Figura 46. Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo ArtUrban.	65
Figura 47. Estados de carga de la batería y supercondensador y kilogramos de h2 frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia.	68
Figura 48. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, para control ECMS con tres fuentes de potencia.	68
Figura 49. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, para control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.	69
Figura 50. Estados de carga de la batería y supercondensador y kilogramos de h2 frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.	70
Figura 51. Estados de carga de la batería y supercondensador y kilogramos de h2 frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo WLTP class3.	71
Figura 52. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, para control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo WLTP class3.	71
Figura 53. Estados de carga de la batería y supercondensador y kilogramos de h2 frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.	72
Figura 54. Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, para control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.	72

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Apartado introductorio

Los combustibles fósiles han sido y son actualmente la principal fuente de energía en los diferentes medios de transporte. El aumento de la preocupación tanto por el agotamiento de los combustibles fósiles como por el cuidado del medio ambiente han provocado la aparición de otras formas alternativas para obtener energía. Así hoy en día, la reducción del consumo de combustible es una prioridad en los vehículos de pasajeros. Hay tres enfoques posibles para mejorar este aspecto:

- Mejora de la eficiencia de las fuentes de energía primarias.
- Aumento de la eficiencia de los sistemas de almacenamiento de energía en el vehículo.
- Mejora de las características del vehículo, como reducción de la masa, aumento del aerodinamismo, disminución de rozamientos.

Por estas razones han aparecido automóviles más eficientes como los vehículos híbridos y los vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos son automóviles que se caracterizan por la conversión de energía eléctrica aguas arriba del tren de transmisión, que consta de una batería o cualquier otro sistema de almacenamiento de energía eléctrica, y un control sobre un motor eléctrico. En la práctica la densidad de energía de la batería no es suficiente, y el resultado es un vehículo que no tiene suficiente autonomía, que además tiene el problema añadido de la recarga de la batería y de ser más caros que los convencionales. Como ventajas presentan que son más sencillos y más eficientes, contienen menos partes móviles además de no liberar emisiones y la posibilidad de la regeneración de la energía en cada frenado.

Los vehículos híbridos están caracterizados por tener dos o más fuentes de potencia, normalmente éste término es usado para la combinación de un motor de combustión interna y un motor eléctrico. Esta combinación proporciona un ahorro considerable además de un gran beneficio ambiental comparado con un vehículo convencional, pero teniendo una amplia autonomía junto con una recarga rápida, con lo que se consigue una solución de compromiso para los problemas que se plantean.

1.2. Historia de los vehículos eléctricos

Los primeros vehículos eléctricos empezaron a desarrollarse entre 1832 y 1839, cuando Robert Anderson inventó el primer vehículo puro tras la construcción del primer motor eléctrico en 1831 por Joseph Henry. El profesor Sibrandus Stratingh, en los Países Bajos junto con su ayudante Christopher Becker construyó el primer diseño y vehículos eléctricos a escala reducida.

La evolución que realizaron de la pila eléctrica los franceses Gaston Planté y Camille Faure dio un impulso al desarrollo de los vehículos eléctricos.

Francia y Gran Bretaña fueron los países que más apoyaron el desarrollo de los vehículos eléctricos y en 1881 en la Exposición Internacional de la Electricidad de París, el francés Gustave Trouvé exhibió un automóvil de tres ruedas.

En 1895 Estados Unidos empezó a tener en cuenta el desarrollo de vehículos eléctricos que finalizó con la primera fundación de una empresa de taxis eléctricos en Nueva York.

Los automóviles eléctricos creados en Estados Unidos durante principios del siglo XX tuvieron relativo éxito comercial. Hasta 1920 tuvieron un fuerte desarrollo ya que tenían ventajas respecto a los vehículos de gasolina, como la disminución del ruido del olor o la no necesidad de cajas de cambio. A pesar de ello, las limitaciones tecnológicas estos primeros vehículos fueron vendidos para las clases altas y para las mujeres al no requerir de arranque manual como los automóviles de gasolina de la época.

El aumento de la necesidad de mayor autonomía junto con la bajada del precio del petróleo, y sobre todo la solución del problema de arranque de los motores de combustión interna por parte de Charles Kettering, provocó la producción a gran escala de vehículos de combustión interna a manos de Henry Ford con el sistema de producción en cadenas de montaje de forma relativamente barata, lo que hizo que los precios de los automóviles de gasolina fuesen muy competitivos.

A finales de 1930 el desarrollo de los vehículos eléctricos quedó totalmente estancado, en contraposición del desarrollo de los motores de combustión interna.

Durante las siguientes décadas, se produjo el desarrollo de la electrónica de potencia, lo que llevó a cabo la aparición de los transistores como tiristores, GTO o el IGBT.

Entre los años 60 y 70, vuelven a reaparecer algunos modelos movidos por el tema de la ecología y la necesidad de bajar el consumo de los vehículos.

La crisis del petróleo terminó por impulsar nuevamente el intento de desarrollo de este tipo de vehículos, para buscar opciones al petróleo, que era una materia prima proveniente de otros países y que podía dañar la economía occidental.

En España los primeros intentos nos llevan hasta Emilio de la Cuadra. Éste se interesó en los vehículos eléctricos después de visitar la Exposición Internacional de la Electricidad. Sin embargo la falta de recursos tanto económicos como materiales así como tecnológicos hizo que tuviera que descartar todos los proyectos. La empresa cerró en 1901 debido a la falta de dinero.

Ya en 1990 nos encontramos con el prototipo presentado por General Motors en el Salón de los Ángeles, el impact, y precursor del General Motors Experimental Vehicle 1.

Hoy en día la necesidad de minimizar el consumo de los vehículos, y la reducción de la contaminación son cada vez mas importantes y está impulsando nuevamente el desarrollo de los vehículos eléctricos (EV) y de los vehículos híbridos (HEV).

Además en los países desarrollados se ha tomado una actitud de fomento del buen trato al medioambiente y minimización de la contaminación, como el uso de energías renovables dando por ejemplo ayudas y subvenciones a estos tipos de vehículos.

1.3. Sistema de configuración de los vehículos híbridos

Podemos clasificar los vehículos híbridos según el grado de hibridación y según su sistema de impulsión.

Según el grado de hibridación se encuentran:

- Híbrido ligero. No es más que un vehículo común con un motor de arranque muy grande. Esto permite que el motor de combustión se pueda parar cuando el vehículo está parado, frenando o en punto muerto, para después volver a arrancar rápidamente.
- Híbrido asistido. El motor principal es el de combustión interna, es decir es el que proporciona la potencia en ciclos normales de trabajo, pero tiene añadido un motor eléctrico que da una potencia adicional. En este tipo de híbridos el motor eléctrico no solo funciona cuando el de combustión está parado sino que ayuda cuando se realizan grandes demandas de potencia para dar un aporte de par extra al vehículo.
- Híbrido completo. Como su propio nombre indica este tipo de híbridos permiten el funcionamiento únicamente con el motor de combustión, únicamente con la batería o con ambos a al mismo tiempo. Obviamente la batería deberá tener una gran cantidad de carga que permita cubrir las necesidades cuando el vehículo funcione totalmente eléctrico.
- Híbrido enchufable. Como el completo, tiene un modo de funcionamiento en el que únicamente se utilizan las baterías, pero además tiene la particularidad de que éstas pueden ser recargadas exteriormente. Esta ventaja nos permite tener un vehículo totalmente eléctrico para tramos cortos y frecuentes, y además puede funcionar como los híbridos anteriormente expuestos para tramos más largos y menos usuales.

Según su sistema de impulsión los vehículos híbridos están clasificados en 3 grandes grupos:

- Híbridos paralelos: Ambos motores pueden operar en el mismo eje de accionamiento, por lo que pueden accionar el vehículo individual o simultáneamente.
- Híbridos en serie: Sólo el motor eléctrico conduce el vehículo. La electricidad puede ser suministrada ya sea por una batería o por un generador accionado por el motor.
- Híbridos series-paralelo: Esta configuración es una mezcla de las dos anteriores.

Híbridos en serie:

Los sistemas híbridos en serie utilizan un motor de combustión interna para extender el rango de conducción de un puramente eléctrico. Usando un generador, la salida del motor de combustión puede alimentar directamente el motor eléctrico o puede cargar una batería.

Que el modo de operación del motor de combustión no esté relacionado con la potencia demandada en cada instante hace que pueda funcionar en su punto de máximo rendimiento y de mínimas emisiones.

El frenado regenerativo es posible gracias al uso del motor eléctrico como generador y almacenar la energía eléctrica en la batería.

Una ventaja añadida es la no necesidad de un embrague, ya que el motor de combustión no está acoplado al eje motriz. Como desventaja se encuentra que el motor de tracción debe tener al menos el tamaño necesario para dar la máxima potencia del vehículo, o que el número de componentes necesarios (motor de combustión interna, un motor eléctrico para la tracción y un generador) aumente considerablemente el peso del automóvil y por tanto el consumo del mismo.

Híbridos en paralelo:

Si los vehículos híbridos en serie podían suponerse como un completamente eléctrico con un soporte adicional de un motor de combustión interna, los vehículos híbridos en paralelo pueden suponerse como uno de combustión interna con una línea adicional de energía eléctrica.

A diferencia de los híbridos en serie, ambos motores pueden suministrar la potencia de tracción, y pueden hacerlo tanto individualmente como conjuntamente, lo que conlleva mayor manejabilidad de los flujos de potencia y la posibilidad de aumentar los puntos óptimos dependiendo de las condiciones existentes en cada instante.

Lo que se usa normalmente es el motor de combustión interna funcionando en regímenes normales de funcionamiento, y el motor eléctrico asistiendo para fuertes aceleraciones o en general para grandes demandas de potencia. Esta característica lo hace bastante interesante desde el punto de vista de las emisiones y del ahorro de combustible. Cuando se circula por ciudad al no hacer falta mucha potencia, el motor eléctrico puede funcionar de manera individual permitiendo un gran ahorro de combustible y cero emisiones. El sistema tiene una consecuencia que podemos tomar como una ventaja respecto al híbrido en serie, y es que ninguno de los dos motores tiene que estar dimensionado para dar la máxima potencia, puesto que en ese tipo de casos ambos funcionan conjuntamente pudiendo dimensionarse con menores tamaños, y reduciendo así el peso del automóvil, puesto que además no se necesita un generador, es decir necesitamos solo dos máquinas por 3 que necesitábamos para los híbridos en serie.

Como desventaja respecto a los híbridos en serie se encuentra la necesidad del uso de embrague, puesto que el motor de combustión está conectado al tren de transmisión.

Híbridos combinados:

En medio de las dos opciones se encuentra el Híbrido combinado, este tipo lo podemos entender mayoritariamente como un híbrido en paralelo pero con algunas de las características de los híbridos en serie.

Básicamente lo que se dispone de dos modos de tracción, mecánica con el motor de combustión y eléctrica. Se tienen dos máquinas eléctricas que trabajan de forma diferente, como en los híbridos en paralelo uno de los dos motores eléctricos se usa como motor de tracción o para frenado regenerativo. La otra máquina eléctrica funciona como si fuera un generador en los sistemas de híbridos en serie, y se usa para cargar la batería a partir del motor de combustión interna y para operaciones de parar y arrancar.

1.4. Flujos de potencia

Como se ha explicado anteriormente existen diferentes configuraciones de vehículos híbridos, por lo que también existen varios modos de de operación que son los que se explicarán a continuación.

Híbridos en serie:

En este tipo de vehículos la conexión entre el camino del motor de combustión y el camino de la batería es eléctrica. Se tiene conectado por un lado el motor de combustión interna al generador y éste al convertidor de potencia. Por otro lado como fuente de potencia tenemos además conectado al convertidor de potencia una batería. A su vez el convertidor de potencia irá conectado al motor eléctrico, motor de tracción del vehículo, que conectará con la transmisión y por último con los ejes del vehículo. El balance de potencias se realizará con el comando u , que nos dará el porcentaje en tanto por uno de potencia que se demandará o se cargara de o hacia la batería.

Con esas conexiones podemos tener básicamente a 4 modos de operación:

- $u=1$. Cuando la batería está suficientemente cargada, el modo que se tiene activado sería el puramente eléctrico. En este modo la potencia viene totalmente de la batería y por tanto se tienen cero emisiones.

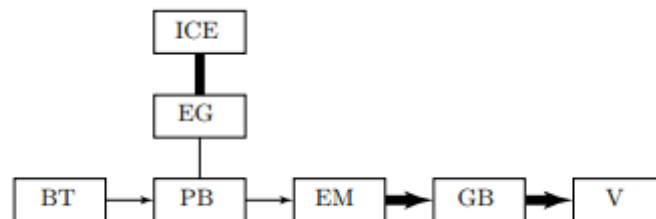


Figura 1 Flujo de potencia en híbridos en serie para $u=1$.

Fuente: vehicle propulsion systems

- $u<0$. Cuando la batería está prácticamente descargada, el modo que se usa es el de recarga de la batería. El motor de combustión interna está en funcionamiento dando la potencia que se demanda y además dando más potencia de la que se demanda y usándola para cargar la batería.

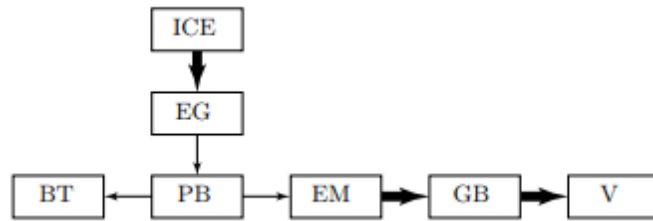


Figura 2 Flujo de potencia en híbridos en serie para $u < 0$.

Fuente: *vehicle propulsion systems*

- $0 < u < 1$. Cuando la potencia que se demanda desde el vehículo está por encima del punto óptimo del motor de combustión, la diferencia de potencia es suministrada por la batería.

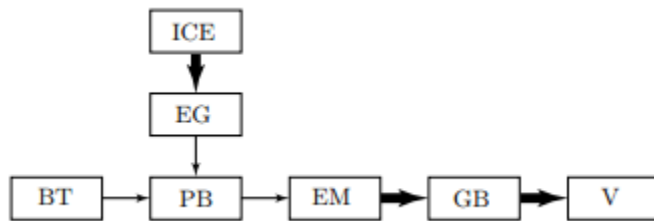


Figura 3 Flujo de potencia en híbridos en serie para $0 < u < 1$.

Fuente: *vehicle propulsion systems*

- $u = 1$. Durante las fases de frenado o desaceleraciones, el motor de combustión está parado y parte de la energía se usa para recargar la batería.

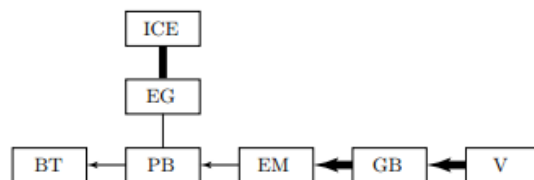


Figura 4 Flujo de potencia en híbridos en serie para $u = 1$.

Fuente: *vehicle propulsion systems*

Donde para todas las figuras, ICE es el motor de combustión interna, EG es el generador, BT es la batería, PB es el convertidos de potencia, EM es el motor eléctrico, GB es la transmisión y V los ejes del vehículo.

Híbridos en paralelo:

En los híbridos en paralelo la conexión entre el camino del motor de combustión y el camino eléctrico es mecánica. En este caso se tiene conectado la batería al convertidor de potencia y a su vez al motor eléctrico que irá conectado a la transmisión. Por otro lado se tiene el motor de combustión interna conectado también a la transmisión y por último la transmisión conectada a los ejes del vehículo.

Igualmente que en el caso anterior los flujos de potencia serán regulados por la variable de control u . Así para los diferentes valores de esta variable tendremos los siguientes modos de operación.

- $u=1$. Igualmente que para los vehículos híbridos en serie, cuando la batería tiene suficiente estado de carga y las potencias que se demandan lo permiten, podemos tener el modo de operación de un puramente eléctrico. Es decir toda la potencia la está dando la batería.



Figura 5 Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u=1$.

Fuente: vehicle propulsion systems

- $u<0$. Cuando los estados de carga de la batería son pequeños, existe el modo en el que la potencia demandada la está cediendo el motor de combustión, pero éste no genera la estrictamente necesaria sino que genera un poco más, la diferencia de ambas se usa para cargar la batería a través del motor eléctrico.



Figura 6 Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u<0$.

Fuente: vehicle propulsion systems

- $0 < u < 1$. En los momentos de grandes aceleraciones el motor de combustión da una parte de la potencia necesaria, la otra parte será aportada por el motor eléctrico, es decir ambos motores funcionarán al mismo tiempo.



Figura 7 Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $0 < u < 1$.

Fuente: vehicle propulsion systems

- $u = 1$. También para este caso, cuando el vehículo tenga desaceleraciones y frenados, el motor eléctrico funcionará como un generador para cargar a través de él la batería.



Figura 8 Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u = 1$.

Fuente: vehicle propulsion systems

- $u = 0$. En los híbridos en paralelo aparece un nuevo modo de operación que no existía en los híbridos en serie. En este nuevo modo, es el motor de combustión el que funciona únicamente, sin ningún tipo de carga de batería ni nada adicional, exclusivamente dando la potencia que se demanda por parte del vehículo, lo que sería un vehículo convencional.

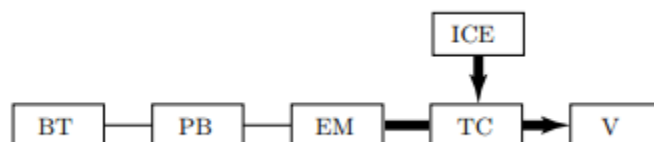


Figura 9 Flujo de potencia en híbridos en paralelo para $u = 0$.

Fuente: vehicle propulsion systems

Donde para todas las figuras, ICE es el motor de combustión interna, BT la batería, PB es el convertidor de potencia, EM es el motor eléctrico, TC es la transmisión y V son los ejes del vehículo.

Híbridos combinados:

Como se puede presuponer los híbridos combinados pueden operar tanto como vehículos en serie como en paralelo. Por tanto los modos de operación resultantes serán los ya explicados en los puntos anteriores, pero aparecerá una diferencia añadida, y es que se usa un conjunto de engranajes planetarios. Así los modos de operación serán los siguientes.

- ZEV.

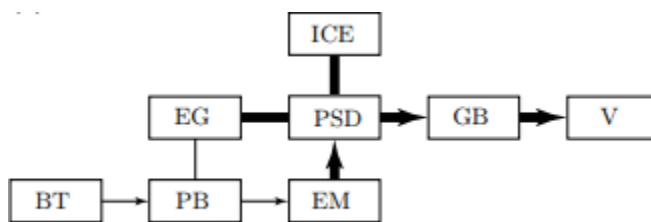


Figura 10 Flujo de potencia en híbridos combinados en modo zev

Fuente: vehicle propulsion systems

- Carga de batería.

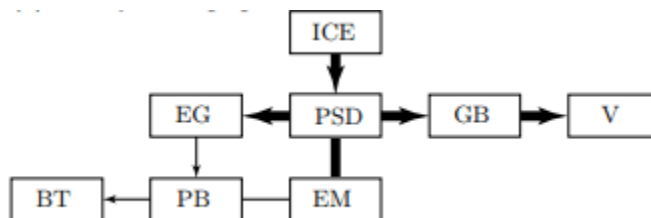


Figura 11 Flujo de potencia en híbridos combinados en modo carga de batería

Fuente: vehicle propulsion systems

- Asistente de potencia.

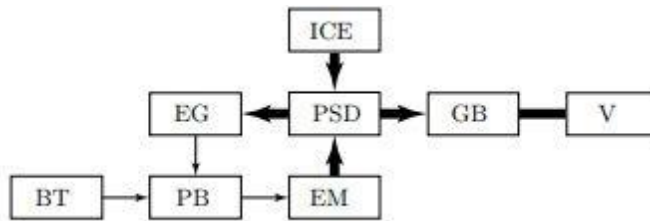


Figura 12 Flujo de potencia en híbridos combinados en modo asistente de potencia

Fuente: vehicle propulsion systems

- Frenado regenerativo.

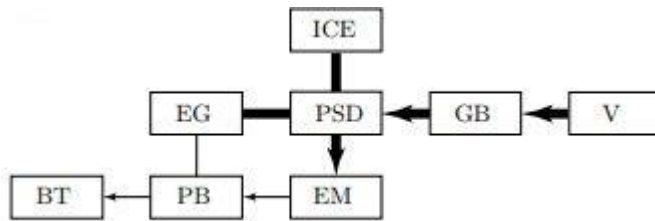


Figura 13 Flujo de potencia en híbridos combinados en modo frenado regenerativo

Fuente: vehicle propulsion systems

- solo motor de combustión.

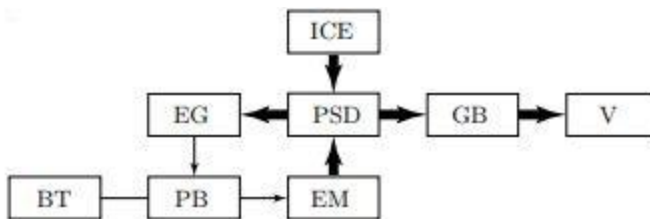


Figura 14 Flujo de potencia en híbridos combinados en modo solo motor de combustión

Fuente: vehicle propulsion systems

Donde para todas las figuras, ICE es el motor de combustión interna, EG es el generador, BT es la batería, PB es el convertidor de potencia, EM es el motor eléctrico, GB es la transmisión, V son los ejes del vehículo, y PSD es un tren de engranajes planetarios.

CAPÍTULO 2. INTERESES Y OBJETIVOS

En los próximos apartados se intentará explicar cuál es el interés del tema elegido, cuales son los problemas que llevan a este tema y como se puede abordar el problema, así como los objetivos que se pretenden conseguir con el trabajo realizado y con el estudio de esta materia en general.

2.1. Intereses

Actualmente la contaminación es uno de los principales problemas que existen a nivel global. Puesto que el aumento de gases contaminantes a la atmósfera ha alcanzado niveles preocupantes, que pueden provocar tanto la variación del clima con gases como el dióxido de carbono, o gases que pueden afectar a la salud de las personas como los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, o las macropartículas entre otros.

Estas emisiones de gases son emisiones provocadas en parte por los medios de transporte que existen actualmente, es contaminación producida por el tráfico. Es una contaminación que aparece por la combustión de combustibles fósiles, y en particular del gasoil y de la gasolina. Además de las emisiones de gases es importante resaltar la contaminación acústica que existen sobre todo en las ciudades debido a los medios de transporte.

El cambio climático es la variación del clima con el paso de los años, que no solo afecta a la temperatura, sino que afecta a todos los parámetros meteorológicos como son temperatura, presión, precipitaciones o nubosidad. Hoy en día se sabe que gran parte de los gases responsables de este fenómeno son emitidos por los vehículos de transporte que han aumentado bastante cómo podemos observar en la siguiente figura:

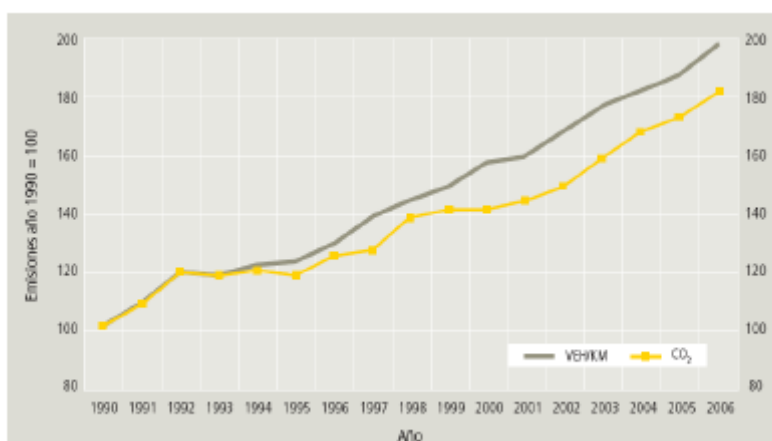


Figura 15 *Evolución* de las emisiones de co2 con el aumento de vehículos

Fuente: Diseño de una estrategia para la gestión energética de un vehículo híbrido enchufable.

Se ha producido un aumento de emisiones de dióxido de carbono de un 80%, y en la gráfica podemos ver como el aumento está íntimamente relacionado con el aumento de la movilidad de vehículos turismos en España entre 1990 y 2006.

El efecto invernadero puede tener consecuencias muy graves, entre las que se encuentran:

- Un considerable aumento de la temperatura media.
- Un aumento del nivel de los mares y océanos.
- Como consecuencia de lo anterior, inundaciones de zonas cercanas al mar y de islas.
- Cambio de los ecosistemas, por lo que podría desaparecer algún tipo de especie, bien de animal o bien de plantas.
- Importante impacto en la agricultura y la ganadería.

Estas consecuencias no solo son pronosticadas por los expertos sino que algunas de ellas están siendo detectadas ya en la actualidad.

Como se ha comentado anteriormente, el transporte no es solo fuente de emisión de gases de efecto invernadero, sino que es fuente de emisiones de gases contaminante y de partículas que afectan a la salud humana, y a la calidad del aire. Igualmente podemos ver en la siguiente figura la evolución de este tipo de gases respecto al crecimiento de movilidad vehículos en los últimos años.

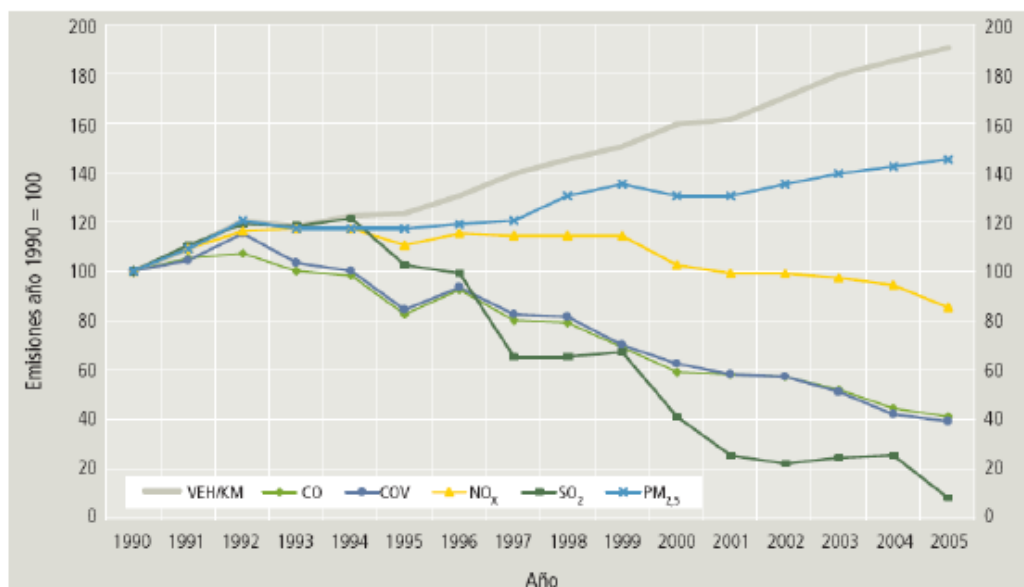


Figura 16 Evolución de las emisiones de diferentes contaminantes con el aumento de vehículos

Fuente: Diseño de una estrategia para la gestión energética de un vehículo híbrido enchufable.

Se puede observar claramente la disminución de estos gases a pesar del aumento de la movilidad de los vehículos. Esta positiva variación es provocada principalmente por las apariciones de normativas europeas que regulan la cantidad de emisiones de los mismos. Así podemos ver que todos los gases se han reducido incluso el dióxido de azufre ha llegado a hacerse prácticamente cero. A pesar de ello se ve que el número de partículas sigue aumentando igual que el número de movimientos de vehículos, aunque ya en los últimos años ha sido frenado este crecimiento.

Por tanto, con estos datos podemos darnos cuenta que los medios de transporte tienen gran parte de culpa de la contaminación existente, sobre todo en grandes ciudades. Y una vez analizadas las graves consecuencias que esto podría tener, la mejora de la eficiencia

del consumo de combustibles fósiles así como su completo desuso es un problema tan necesario como interesante. El desarrollo de las tecnologías es completamente imprescindible para esta tarea, la Agencia Internacional de la Energía estima ya una reducción del consumo de combustibles fósiles del 50 por ciento, con el desarrollo de los vehículos eléctricos o con pila de hidrógeno para 2030.

El objetivo fundamental del trabajo es la modelación de un vehículo híbrido así como la implementación de una estrategia de optimización que sea capaz de reducir el consumo de tres fuentes diferentes de potencia y poder compararla con otra estrategia heurística desarrollada en paralelo a ella.

Como ya se comentó anteriormente la importancia de la pila de combustible, este vehículo híbrido irá incorporado por una batería, un supercondensador y una pila de combustible, es decir que no irá equipado con un motor de combustión interna.

Todo esto se realizará en Matlab Simulink, donde se implementarán los modelos de todos los elementos necesarios, algunos a partir de datos proporcionados por el fabricante y otros más teóricos, además de las dos estrategias de control.

La estrategia de control óptimo que se desarrollará será la llamada ECMS (Equivalent consumption minimization strategy), que se basa en el cálculo de un factor equivalente con el que poder comparar la cantidad de hidrógeno consumido con la variación de carga tanto de la batería como del supercondensador y buscar el óptimo para cada momento.

En primer lugar se ejecutará el modelo completo del vehículo híbrido, tanto la estrategia heurística como la para óptima pero teniendo en cuenta solo dos de las tres fuentes de energía, solo se tendrá en estas primeras simulaciones la pila de combustible y la batería. Esto es provocado para la simplicidad del desarrollo de las estrategias de control, puesto que se harán primeramente solo para dos fuentes de energía y se tomarán datos y conclusiones de las mismas y posteriormente se ampliará a tres, que es un método más sencillo que empezar directamente a desarrollar las estrategias para tres fuentes diferentes de energía.

Por tanto se intentará extraer tanto conclusiones cuantitativas como sobre todo cualitativas, de estos métodos de control, como por ejemplo como se consigue una mayor eficiencia de consumo, o si realmente nos interesa esa eficiencia o nos puede provocar problemas por motivos técnicos.

2.2. Objetivos

El objetivo fundamental del trabajo es la modelación de un vehículo híbrido así como la implementación de una estrategia de optimización que sea capaz de reducir el consumo de tres fuentes diferentes de potencia y poder compararla con otra estrategia heurística desarrollada en paralelo a ella.

Como ya se comentó anteriormente la importancia de la pila de combustible, este vehículo híbrido irá incorporado por una batería, un supercondensador y una pila de combustible, es decir que no irá equipado con un motor de combustión interna.

Todo esto se realizará en Matlab Simulink, donde se implementarán los modelos de todos los elementos necesarios, algunos a partir de datos proporcionados por el fabricante y otros más teóricos, además de las dos estrategias de control.

La estrategia de control óptimo que se desarrollará será la llamada ECMS (Equivalent consumption minimization strategy), que se basa en el cálculo de un factor equivalente con el que poder comparar la cantidad de hidrógeno consumido con la variación de carga tanto de la batería como del supercondensador y buscar el óptimo para cada momento.

En primer lugar se ejecutará el modelo completo del vehículo híbrido, tanto la estrategia heurística como la para óptima pero teniendo en cuenta solo dos de las tres fuentes de energía, solo se tendrá en estas primeras simulaciones la pila de combustible y la batería. Esto es provocado para la simplicidad del desarrollo de las estrategias de control, puesto que se harán primeramente solo para dos fuentes de energía y se tomarán datos y conclusiones de las mismas y posteriormente se ampliará a tres, que es un método más sencillo que empezar directamente a desarrollar las estrategias para tres fuentes diferentes de energía.

Por tanto se intentará extraer tanto conclusiones cuantitativas como sobre todo cualitativas, de estos métodos de control, como por ejemplo como se consigue una mayor eficiencia de consumo, o si realmente nos interesa esa eficiencia o nos puede provocar problemas por motivos técnicos.

CAPÍTULO 3. MODELOS

Un modelo es una representación parcial o simplificada de la realidad que recoge aquellos aspectos de relevancia para las intenciones del modelador, y de las que se pretende obtener conclusiones de tipo predictivo.

Para la formulación de éste debe instaurarse su estructura definiendo cuáles son los aspectos del funcionamiento del sistema que son significativos para la resolución del problema, y que datos son necesarios recoger para proporcionar al modelo la información adecuada.

La construcción del modelo de simulación es una ciencia que combina tanto aspectos matemáticos como lógicos. En general la experiencia demuestra que es aconsejable empezar con modelos moderadamente detallados que gradualmente se irán haciendo más sofisticados. El modelo deberá tener exclusivamente el nivel de detalle requerido para los objetivos propuestos del estudio. Dado un modelo matemático, la construcción del programa para computador es el requisito indispensable para poder manipular numéricamente el modelo y así, obtener las soluciones que respondan a las preguntas que se formulan sobre el sistema.

Una vez construido, la validación es un paso trascendental del proceso, suele ser uno de los más complicados, aunque a pesar de ello es necesario para determinar si el modelo representa adecuadamente el sistema con el que queremos trabajar, y así, saber si podemos hacer extrapolaciones a partir de los resultados obtenidos en el modelo.

Para este caso en concreto se ha modelado un vehículo híbrido completo con tres fuentes de potencia: Una pila de combustible, una batería y un supercondensador. Este modelo completo se ha dividido a su vez en un número mayor de submodelos que representan los diferentes componentes del sistema. Para un mejor uso práctico de éstos, se han hecho autónomos, es decir, cada submodelo se comunica única y exclusivamente con los submodelos que están unidos a él mediante un flujo de potencia. Este enfoque provoca la determinación de un sistema modular, en el que cada submodelo tiene sus propias salidas y entradas que combinadas entre sí (las salidas de uno, son las entradas de otro), pueden dar lugar a una configuración compleja. Otra de las ventajas que tiene este método, es que los mismos modelos y librerías pueden ser usados para simular tanto vehículos en serie, como en paralelo, o combinación de ambos sin tener que modificarlos. Siguiendo el método anteriormente explicado se han realizado los modelos de: Generador de potencias demandadas (coche) así como del motor, de la batería, del supercondensador, usando como entrada del modelo global, un ciclo de conducción que nos dará la posición, velocidad, aceleración e inclinación del vehículo para cada instante dado, y finalmente se ha realizado un script que nos calculará una aproximación del coste del ciclo que hemos realizado en kilojulios.

Existen dos formas de enfocar y realizar estos modelos, enfoque cuasiestático y enfoque dinámico.

Cuasiestático: En la simulación cuasiestática las variables de entrada son la velocidad la aceleración y el ángulo de inclinación de la carretera en la que se encuentra el vehículo. Con estos parámetros se calcula la fuerza necesaria en las ruedas para seguir el ciclo de conducción, en éste paso, se asume que el vehículo tiene una velocidad, aceleración y ángulo de inclinación constantes durante un breve periodo de tiempo.

Dinámico: El enfoque dinámico está basado en una correcta descripción matemática del sistema. Que normalmente se formulan usando ecuaciones diferenciales.

Para los modelos que se explicarán a continuación, así como para las simulaciones realizadas se ha utilizado un enfoque cuasiestático.

3.1. Modelo del generador de potencias y del motor

Las entradas del bloque generador de potencias son la velocidad, la inclinación y la aceleración como ya se ha comentado anteriormente, y las salidas de éste son la potencia demandada y el par. Los cálculos realizados en este bloque se realizan en dos scripts de Matlab bien diferenciados, *calculopar1* y *calculopotenciacoche1*.

En el primero de ellos, además de los datos de entrada al bloque, tenemos algunos datos adicionales que son características del vehículo o del entorno de conducción que se van a considerar constantes, estos datos son:

- Densidad del aire → $\rho_{\text{aire}} = 1.204 \text{ Kg/m}^3$
- Área frontal → $A_f = 1.9675 \text{ m}^2$
- Coeficiente de fricción del aire → $C_d = 0.32$
- Masa del vehículo → $m_v = 500 \text{ Kg}$
- Coeficiente de rozamiento → $C_r = 0.011$
- Gravedad → $g = 9.8/\text{s}^2$
- Relación entre velocidad del motor y velocidad lineal → $\gamma = 4.021$
- Radio de la rueda → $r_{\text{rueda}} = 0.32 \text{ m}$
- Inercia del motor → $I_{\text{motor}} = 84375$
- Inercia de la rueda → $I_{\text{rueda}} = 6125$
- Masa inercial total → $m_i = m_v + (1/r_{\text{rueda}}^2) * I_{\text{rueda}} + (\gamma^2)/(r_{\text{rueda}}^2) * I_{\text{motor}}$
- Masa pesante → $m_p = m_v$

Con todos estos datos, podemos calcular la fuerza total necesaria para las condiciones que se nos están pidiendo en este instante. La cantidad de energía mecánica consumida por un vehículo depende principalmente de tres efectos: las pérdidas por rozamiento de las ruedas con el suelo, las pérdidas de fricción por el aire y la energía disipada en los frenos. La resistencia aerodinámica que se produce en un vehículo es causada tanto por la fricción viscosa del aire como por las pérdidas causadas por las diferencias de presiones, así mismo el coeficiente de rozamiento dependerá de muchas variables de las cuales la más importantes son, la velocidad, las condiciones del asfalto y de la presión de los neumáticos. Ambas fuerzas suelen ser modeladas como se dispone en el script que a continuación se explicará.

Explicación script calculopar1

En primer lugar se calculan las fuerzas que provocan pérdidas, éstas son las provocadas por el aire, rozamiento y gravedad que se calculan como sigue:

-Fuerza del aire:

$$F_a = 0.5 * \rho_{\text{aire}} * A_f * C_d * v^2$$

-Fuerza de rozamiento:

$$F_r = m_p * C_r * g * \cos \alpha$$

-Fuerza de la gravedad

$$F_g = m_p * g * \sin \alpha$$

Donde alfa es el ángulo de inclinación de la carretera.

Una vez calculadas todas las fuerzas que provocan pérdidas, se pone que si la velocidad es 0 la fuerza de rozamiento también lo será, independientemente de lo calculado arriba. Con todo esto, la fuerza total necesaria será la suma de estas tres fuerzas más la de la tercera ley de newton, es decir, la masa por la aceleración, así la fuerza total queda:

$$F_m = m_i * \text{aceleración} + F_a + F_r + F_g$$

El signo de la fuerza de la gravedad, vendrá dado por el signo del seno del ángulo, así si la pendiente es negativa, esta fuerza ayudará al movimiento y el seno será negativo, es decir es una fuerza que no hay que demandar al motor.

Ahora se calcula la variable u_{aux} que será la fuerza F_m calculada por el radio de la rueda y con ella calcularemos el par y la velocidad angular del motor (que serán las salidas de este script) de la siguiente forma:

$$u(1) = u_{aux} / \text{gamma}$$

$$w = \text{velocidad} / \text{rueda}$$

$$u(2) = w * \text{gamma}$$

Explicación script calculopotenciacoche1

En este script se calcularán las pérdidas provocadas por la transmisión de la potencia dentro del vehículo, que sumadas a la potencia calculada teórica nos dará la potencia final.

Las entradas serán el par y la velocidad angular calculados anteriormente además de la velocidad lineal y la salida será la potencia necesaria para mover el coche en las condiciones que se están pidiendo, que unida al par calculado en calculopar1 nos darán las dos salidas de este submodelo. Inicialmente se calcula la potencia teórica multiplicando el par por la velocidad angular y a continuación, para calcular las pérdidas se diferencia el caso en el que el par ya calculado sea positivo, y dentro de este caso a su vez se diferencian dos, que la velocidad angular sea mayor o igual, o menor de 2000, y así se calcularán las pérdidas respectivamente como sigue:

$$P_{perdidas} = 4.05 * 10^{-9} * \text{abs}(a(2))^2 * \text{abs}(a(1))^2 + 0.0082 * \text{abs}(a(1))^{1.5}$$

Para una velocidad angular mayor a 2000.

$$P_{perdidas} = 0.016 * \text{abs}(a(2))^2 + 0.0082 * \text{abs}(a(1))^{1.5}$$

Para una velocidad angular menor de 2000, donde $a(2)$ es el par, y $a(1)$ es la velocidad angular para ambas ecuaciones. Un vez se tienen las pérdidas para este caso, la salida, la potencia final necesaria se obtiene fácilmente como la suma de la teórica más las pérdidas obtenidas en función del caso que corresponda:

$$u = P + \text{Perdidas}$$

Otro caso a diferenciar es cuando el par sea negativo, en este caso se calculará la potencia directamente con una proporción constante, es decir cuando el par sea negativo se calculará la potencia directamente como la potencia teórica por 0.8:

$$u = P * 0.8$$

Donde u es la salida, es decir la potencia final y p es la potencia teórica calculada unas líneas más arriba.

Por último, para el caso en que el par o la velocidad lineal sea 0, la potencia real final será directamente 0, puesto que significará que o no nos estamos moviendo, o que para el movimiento que estamos realizando no necesitamos energía adicional proveniente de ningún tipo de fuente.

Por su estrecha relación se ha decidido explicar el modelo del motor en este mismo apartado, aunque en el modelo creado sean bloques diferentes.

Para todas las simulaciones se ha supuesto que se tiene un solo motor, aunque en la realidad tendremos 4 motores de 7 kw cada uno, los cuales irán montados uno en cada rueda.

El modelado del motor es muy sencillo, únicamente se trata de calcular el rendimiento del mismo para las diferentes potencias que entran en cada instante, y así dar la potencia final que se demandará según alguna estrategia de control a las diferentes fuentes que tenemos. Para calcular el rendimiento del motor se han usado las gráficas que proporciona al fabricante para este motor a partir del par. Además se han añadido una entrada y una salida para tener más información sobre las trayectorias que realizamos, en conclusión este submodelo calculo tanto el rendimiento para dar la potencia final necesaria, como la acumulación de energía que vamos obteniendo mediante el frenado regenerativo, así al final del final de un ciclo podremos ver cuanta cantidad de energía hemos ganado mediante este sistema.

Con todo esto, el submodelo del motor queda finalmente realizado mediante un script que calcula todo lo comentando, cuyas entradas son la potencia demandada por el bloque generador el par necesario proveniente de este bloque también y la potencia regenerada acumulada hasta el momento, y cuyas salidas son nuevamente la potencia regenerada acumulada que será realimentada y la potencia final. A continuación se pasará a explicar el bloque más detenidamente:

Explicación script rendmotor

La ideal principal es diferenciar nuevamente varios casos, en los que la potencia de entrada sea positiva (que se dividirá a su vez en otro dos), los que la potencia sea negativa, y los que la potencia sea igual a cero.

Para el caso de potencia igual a cero, la potencia de salida será igualmente 0 y no tendremos regeneración.

Para el caso de potencia de entrada negativa, es decir estamos absorbiendo energía, el rendimiento lo tomaremos como una constante, y la salida será esa misma potencia por un rendimiento constante y habrá que sumar a la energía regenerada acumulada lo que acabamos de regenerar.

Y por último, para potencias de entrada positivas hay que diferenciar a su vez dos casos, que el par sea mayor o menor de 150, si el par es menor se interpola en las gráficas dadas

por el fabricante, y con ello se calcula el rendimiento y con éste a su vez se calcula la potencia final, obviamente en este caso no tendremos que sumar nada a la energía acumulada. La interpolación se hará mediante el comando interp1 de Matlab, que una vez creados dos vectores de puntos (puntos sacados de la gráfica del fabricante), que en este caso serán de rendimiento y del par, para un par dado Matlab nos hace una interpolación lineal que nos da el rendimiento.

Para potencias positivas con un par mayor de 150, el rendimiento se supone constante e igual a 0.84, puesto que las gráficas del motor se hacen prácticamente constantes para niveles de par muy grandes.

Una vez realizados todos estos cálculos, ya hemos obtenido tanto el rendimiento como la potencia final, así como la cantidad de energía regenerada para todos los diferentes valores que pueda tomar el par de entrada, pero como adhesión final, hay que saturar la potencia final de salida, puesto que en algunos instantes de la simulación nos da algunos picos no deseables, y para evitar esto, la potencia de salida se satura en 65000 W, que es el objetivo de las últimas líneas de código de este script.

3.2. Modelo de la batería

La batería es un elemento capaz de convertir la energía química almacenada en su interior en energía eléctrica y también son capaces de recorrer el camino contrario, es decir pueden tomar energía eléctrica exterior y almacenarla en su interior como energía química. Como es intuitivo pensar, la batería es un elemento muy importante para los vehículos híbridos, y por supuesto las utilizadas en este tipo de aplicaciones son recargables.

El modelo creado de la batería tiene como entrada la potencia que se le está demandando en cada instante a ésta, y tiene como salidas, las pérdidas provocadas en el interior de la batería, la tensión que se tiene y por supuesto el estado de carga actual que tiene la batería, que es el dato más importante y con el que trabajaremos a la hora de controlar los flujos de potencia.

En primer lugar el modelo cuasiestático dice que hay que calcular la intensidad, y para ello se dividirá la potencia demandada entre el número de baterías, que en este caso serán 6, y el resultado será dividido nuevamente por la tensión actual que será realimentada de la salida de este mismo submodelo para obtener la intensidad:

$$I(t) = \frac{P(t)}{U(t) * N}$$

Una vez calculada la intensidad, tenemos que calcular los siguientes parámetros, el potencial de la batería, la temperatura, 3 constantes y con estos calcularemos el estado de carga actual, y la tensión. Cada una de estas operaciones se hará por separado, teniendo en cuenta que están relacionadas entre sí como sigue:

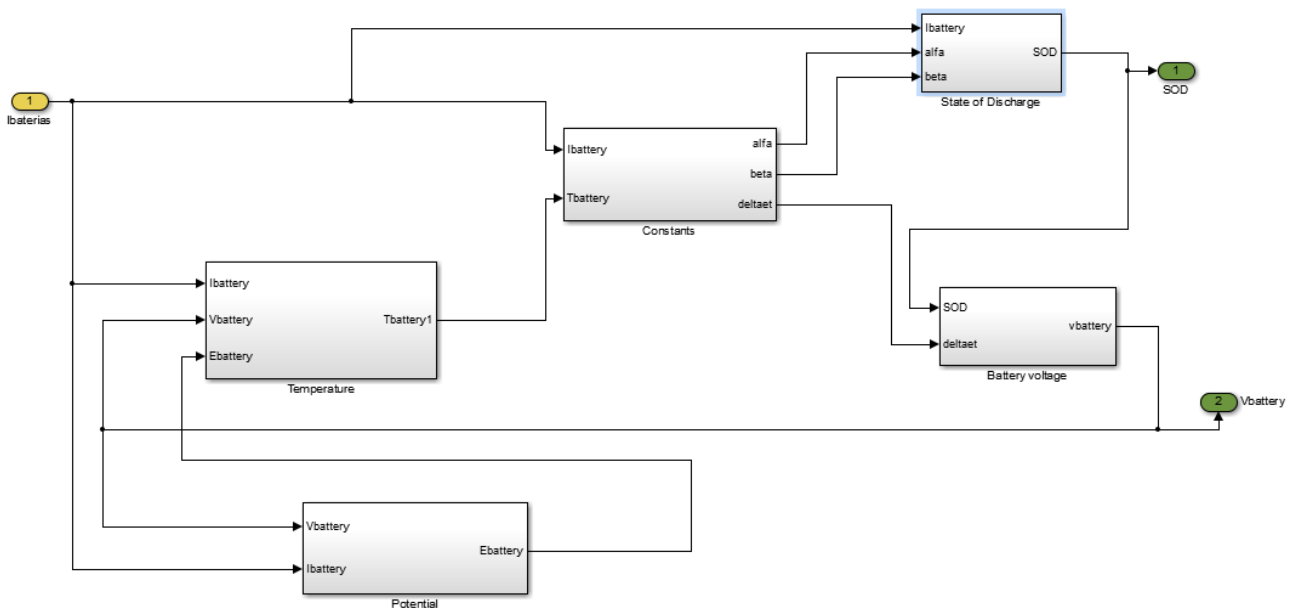


Figura 17 Esquema del modelo del batería.

Fuente: Matlab

Para calcular el potencial, tendremos de entradas la tensión y la intensidad, y así se calculará dentro de un script de Matlab llamado cálculoenergipar de una manera muy sencilla. Lo único que se hace para calcular el potencial es restar la tensión menos la intensidad al cuadrado por la resistencia interna de la batería:

$$E = U - R_{int} I^2$$

La temperatura se obtendrá a partir del potencial, la intensidad y de la tensión, de forma que calcularemos en un script llamado calculotemperaturapar el incremento de temperatura y posteriormente lo meteremos en un integrador que irá sumándolo a la temperatura inicial. En principio necesitaremos los siguientes datos:

- Resistencia interna → $R_1 = 500$
- Área por celda → $A = 0.3006/13$
- Masa de una celda → $m = 1.73$
- C_p → $C_p = 925$
- Temperatura ambiente → $T_a = 23 + 273$
- Coeficiente de enfriamiento → $h_c = 200$

Y con estos datos se tiene la temperatura como:

$$u = \frac{(I^2 * R1 - hc * A * (Tb - Ta))}{m * cp}$$

Donde I es la intensidad de la batería y Tb la temperatura realimentada.

Las constantes alfa, beta y delta se calcularán en tres scripts diferentes llamados calculoalfapar, calculobetapar, calculoetpar respectivamente:

*calculoalfapar. Se obtiene en función de de si la intensidad es positiva o negativa, y en caso de que sea positiva del valor de la misma, y en caso de que sea negativa será constante.

*calculobetapar. Al igual que el anterior se escoge en función del valor en este caso de la temperatura, y si la temperatura es mayor o igual de 45 o menor o igual que -10 grados centígrados, el valor de beta será una constante.

*calculoetpar. Exactamente igual que el anterior, es un valor que dependerá del valor de la temperatura, y si es mayor o igual que 55 y menor o igual de -20 grados centígrados será constante.

Una vez obtenidas las constantes, se obtendrá el valor del estado de carga, cuyas entradas al bloque son, la intensidad de la batería, alfa y beta. Así tendremos un integrador con el valor inicial de la intensidad de la batería que en este caso será cero, al que se le irá sumando la multiplicación de las tres variables de entrada para darnos la intensidad interna de las mismas. Este valor multiplicado por una ganancia que para este caso particular se tomará como $1/(3600*75)$, nos dará la variación del estado de carga, que sumado al estado de descarga, nos dará como resultado el estado de descarga actual. El estado de descarga (SOD), es una variable muy habitual de usar en este tipo de problemas, y no es más que lo contrario del estado de carga (SOC), es decir para que el modelo de cómo resultado el soc, únicamente habrá que realizar la operación $soc=1-sod$.

Para terminar con la explicación de la imagen, solo falta exponer cómo se obtiene la tensión de la batería. El bloque tiene como entradas el estado de descarga y la constante delta. Estas entradas entran en un script de Matlab, que utiliza los datos del fabricante, para realizar una interpolación lineal con el comando interp1, que nos dará la tensión a 25 grados en función del estado de descarga, y para obtener la tensión real, únicamente habrá que sumarle la constante delta. Lógicamente, según las operaciones realizadas al principio del submodelo, esta tensión será la que tengamos en cada una de las baterías, y para dar el valor total tendremos entonces que multiplicar por el numero de baterías que anteriormente se determinó que eran 6, y así habremos obtenido la segunda salida de las tres que tiene el submodelo de la batería.

Por último, para finalizar con este submodelo hay que determinar el valor de la potencia perdida interna. Esto se calculará fácilmente usando la intensidad que ya habíamos obtenido, elevándola al cuadrado y multiplicándola por la resistencia interna para obtener así la potencia perdida, como anteriormente, este valor será multiplicado por el número total de baterías para dar la potencia total que se ha perdido.

3.3. Modelo de la pila y tanque de hidrógeno

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de transformar la energía química de un combustible en energía eléctrica directamente. La eficiencia de la pila y la transformación que realiza no están sujetas al rendimiento de Carnot, lo que permite obtener unos rendimientos teóricos muy altos.

Generalmente una pila es una conexión en serie de varias células individuales para dar la tensión necesaria. Allí se produce tanto la reducción como la oxidación del oxígeno y del hidrógeno respectivamente. Aunque en nuestro caso usaremos hidrógeno, cualquier fluido oxidable podría ser utilizado, pero el hidrógeno tiene la gran ventaja respecto a otros de que el producto de esta reacción es simplemente agua.

La principal diferencia a tener en cuenta entre una pila de combustible y una batería, es que las pilas son elementos que almacenan energía en su interior, y la van proporcionando hasta que se les agota, en cambio, las pilas son elementos donde el combustible que reaccionará proviene en forma de flujo desde el exterior, así puede dar una energía ininterrumpida.

Aunque la pila de combustible tiene muchas ventajas, entre las que destacan el rendimiento y la emisión de únicamente agua, no se ha desarrollado mucho todavía puesto que tiene algunos inconvenientes como, la baja densidad de energía del hidrogeno, el almacenamiento a bordo del hidrógeno, y por supuesto la falta de infraestructuras para el repostaje.

En el modelo cuasiestático de la pila tenemos como entradas la potencia que se demanda, y la tensión a la que se encuentra la pila (realimentada), y como salida tenemos el caudal de hidrógeno que consumimos para dar esa potencia, tal y como se ve en el esquema que sigue:

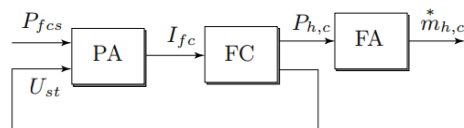


Figura 18 Esquema del modelo cuasiestático de la pila.

En este caso en concreto, además se han añadido como salidas, el hidrógeno malgastado, la potencia de hidrógeno perdida, la tensión de la pila y el rendimiento de la misma, este último debido a que era necesario para el control ECMS aplicado y que se explicará en puntos más adelante.

Así para lograr todo lo que se ha comentado, se ha creado un script de matlab que tiene como entradas la potencia y la tensión realimentada y como salidas todas las nombradas anteriormente, este script se ha denominado `curvadepolarizacion2`.

Explicación script curvadepolarización2

En primer lugar y como se explica en la figura, lo primero que se hace es calcular la intensidad como la división de la potencia entre la tensión realimentada, y una vez hecho esto, saturamos la intensidad a 350 A por restricciones de la propia pila.

La idea con la que se ha realizado el script es calcular el caudal teórico y después con las gráficas dadas por el fabricante calcular el rendimiento y así tener el caudal total final. Siguiendo esta idea la siguiente operación que tiene lugar es el caudal de hidrógeno teórico. Para ello hay que tener en cuenta tres datos, la constante de Faraday, la masa molar del hidrógeno y por supuesto el número de células del pila. Con estos datos, el caudal teórico de hidrógeno es:

$$\text{caudal}_{\text{H}_2} = \frac{m * n * \text{intensidad}}{2 * F}$$

Donde m es la masa molar del H₂, n el número de células y F la constante de Faraday.

Las siguientes líneas se usan para evitar que la pila tome alguna potencia negativa, puesto que la pila no puede tomar energía como si fuera una batería, así si entra alguna potencia negativa la tomaremos como cero.

Siguiendo lo comentado anteriormente, ahora se calculará el rendimiento de la pila, dependiente de la intensidad, con los datos que nos da el fabricante y usando la interpolación de Matlab ya explicada para otros modelos. Esto se hará con la condición de que la potencia no sea cero, para evitar obtener un resultado del rendimiento igual a infinito.

Una vez calculados tanto el caudal de hidrógeno teórico como el rendimiento es sencillo obtener el caudal real mediante la división del caudal teórico entre el rendimiento.

Ahora se tiene que actualizar el valor de la salida de tensión, y esto se hará con la misma idea que el rendimiento, según la intensidad que hemos obtenido anteriormente, y con los datos que nos proporciona el fabricante, haremos una interpolación lineal que nos dará la tensión.

Con todos los datos obtenidos, se actualizan las salidas, que serán:

1. El caudal de hidrógeno real.
2. Caudal real – Caudal teórico.
3. (potencia demandada/rendimiento)-potencia demandada.
4. Tensión actualizada.
5. Rendimiento.

Las 3 últimas líneas de código, son por si la potencia demandada es cero, la salida de la tensión permanecerá constante, y por tanto será la misma que la tensión de entrada. Como se puede apreciar, el modelo de la pila es muy sencillo, puesto que solo se ha seguido la idea marcada al principio y se han usado los datos dados por el fabricante para obtener cada uno de ellos.

Tras la salida del modelo de la pila, se ha creado un bloque que modela el comportamiento de un tanque de hidrógeno, y del cual se tomará el hidrógeno necesario para las simulaciones y para el movimiento del vehículo en caso de un coche real.

El modelo tiene como entrada la salida de hidrógeno consumido del modelo de la pila, y tiene como salida la cantidad de hidrógeno restante en el depósito.

Para conseguir este valor lo único que se ha utilizado es un integrador, que tiene como valor inicial la cantidad de hidrógeno que tiene el depósito, que para este caso se ha tomado como 2.4 Kg de H₂, y al que se le va sumando la entrada de hidrógeno consumido

multiplicada por una ganancia -1, de forma que lo que se va consumiendo se le va restando al valor de hidrógeno inicial para así dar el valor final que resta en el depósito.

3.4. Modelo del supercondensador

Los supercondensadores son dispositivos similares a los condensadores corrientes pero con la cualidad de que tienen una capacidad altísima en comparación con los normales, en torno a miles de veces mayor.

La principal virtud de los condensadores es que se pueden cargar y descargar a muy alta velocidad, esta característica los hace especialmente apropiados para aceleraciones muy fuertes o desnivel muy grande en el terreno, es decir todas aquellas circunstancias en las que la potencia demandada tenga un gradiente muy alto y la batería o la pila no puedan darlo de una manera tan rápida. Además el número de ciclos de vida es enorme y apenas necesitan mantenimiento. En cambio apenas pueden almacenar energía en comparación con las baterías, de ahí que para este caso se use tanto una batería como un supercondensador, que es lo que ocurre en la mayoría de los casos, que ambos elementos no son excluyente. Todas estas características son provocadas porque el almacenamiento de cargas es únicamente electrostático.

Aunque en el futuro podrían presentarse como la fuente de energía principal del sistema, por ahora nos servirá para aceleraciones fuertes como ya se ha comentado anteriormente y así tener un grado de libertad mas a la hora de distribuir la potencia, lo que hará poder realizar una optimización mayor del uso de la energía.

La energía que almacena un supercondensador se puede calcular usando la expresión:

$$\Delta E = \frac{1}{2} * C * (V_1^2 - V_2^2)$$

Donde C es la capacidad del supercondensador, y V1 y V2 la diferencia de tensiones que provoca el cambio de energía.

Los materiales usados como electrodos son primordialmente 3:

- Óxidos metálicos: Se han alcanzado grandes prestaciones con ellos, pero en contraposición son muy caros, por lo que no suelen usarse como primera opción.
- Polímeros conductores: Tienen buenas prestaciones, aunque no tan buenas como los óxidos metálicos, pero como desventaja se encuentra que tienen hinchamientos y contracciones.
- Materiales de carbono: Éstos últimos son los más utilizados, esto es debido principalmente a su bajo coste y gran disponibilidad. Son los que mas mercado actual tienen.

Para el modelo cuasiestático del supercondensador no se ha seguido más que la fórmula expuesta anteriormente para así calcular la variación de tensión y con ello el estado de carga. Con esta idea, el modelo tiene como entrada la potencia que se demanda al supercondensador, y tiene como salidas la tensión del supercondensador, la potencia perdida debido a la resistencia interna y por supuesto el estado de carga del mismo.

Este modelo no consta de ningún script de Matlab, y se ha realizado exclusivamente con cajitas de Simulink.

Tomando la entrada de la potencia y siguiendo la fórmula, podemos obtener la diferencia de los cuadrados de las tensiones como la multiplicación de la potencia por el tiempo de muestreo para obtener la energía, el cual se obtendrá de la resta de dos bloques clock que dan el tiempo de simulación, añadiendo a uno de ellos un bloque de retardo y restándolos se obtiene fácilmente el tiempo de muestreo, a su vez la energía multiplicándola por dos que proviene de pasar el 1/2 multiplicando, y por último dividir entre la capacidad del supercondensador que para este caso se ha tomado como 63, además se multiplica por una ganancia, -1, que nos dará la diferencia pero con los elementos cambiados de posición. Toda esta cuenta es la primera que se realiza en el submodelo del supercondensador, para tener despejada la diferencia que nos interesa ($V_2^2 - V_1^2$) y así poder obtener la tensión necesaria en el condensador para dar la potencia demandada.

Una vez tenemos esa diferencia, se suma el cuadrado de la tensión que obtuvimos en la ejecución anterior, es decir el cuadrado de la tensión a la que estaba el supercondensador, y con ello obtendremos el cuadrado de la tensión necesaria para que el supercondensador de la potencia que se está demandando. Por último para conseguir la tensión necesaria, que además es una de las salidas del submodelo, solo queda realizarle la raíz cuadrada al valor que se tiene. Hasta ahora lo único que se ha hecho es seguir las fórmulas de la energía de los supercondensadores, y por tanto queda un modelo muy sencillo.

Para obtener la segunda salida, el estado de carga, no se tendrá más que dividir la tensión calculada como primera salida, entre la tensión máxima, que para este caso en concreto se ha tomado como 136 voltios.

Finalmente, la potencia perdida por la resistencia interna del supercondensador se calcula a partir de la intensidad que circula por el mismo. Así primeramente tendremos que obtener la intensidad usando la fórmula del condensador ideal:

$$I(t) = C * \frac{dU(t)}{dt}$$

Donde I es la intensidad, C es la capacidad equivalente y U es la tensión.

Con esta fórmula, una vez tenemos calculada en el modelo la tensión, le hacemos una derivada y se multiplica por la capacidad equivalente (63) para obtener la intensidad. Elevándola al cuadrado y multiplicándola por la resistencia interna del supercondensador, que se ha tomado como 0.5 ohmios, para así obtener la potencia perdida provocada por la resistencia interna.

Podemos observar que el modelo del supercondensador es más teórico que el modelo de la pila, que se basaba casi completamente en los datos que proporciona el fabricante, mientras que éste, se basa mayoritariamente en cálculos matemáticos y fórmulas físicas.

3.5. Ciclos de conducción

Para ejecutar todo este modelo completo, empezándolo en el generador de potencias, se necesitará un bloque anterior que nos dé tanto la velocidad como la inclinación y la

aceleración, para poder así obtener las potencias. Todos estos datos son proporcionados por lo que se llama ciclo de conducción.

Estos ciclos de conducción suelen ser test estandarizados, con perfiles de velocidad y ángulos de elevación del terreno prefijados que fueron creados para poder comparar las emisiones de los diferentes vehículos, y poco a poco se han ido utilizando para comparar el gasto de combustible. Suelen llevarse a cabo en diferentes entornos de humedad temperaturas y diferentes condiciones iniciales para poder obtener el mayor número posible de resultados de los mismos.

Hay varios de estos ciclos estandarizados, aunque dependiendo de que queramos obtener o donde se realicen (Estados Unidos, Europa) suelen usarse siempre los mismos.

Para el modelo se han usado varios perfiles, cuyos datos nos proporcionan el ciclo completo. A pesar de que los datos son discretos, este bloque nos crea un perfil continuo, tomando una aceleración constante.

Así usando los datos de posición, velocidad y aceleración, se van derivando las velocidades una vez y las aceleraciones dos para obtener las posiciones como la suma de las mismas mas la posición actual, y usando lo mismo para las velocidades, como la derivada de la aceleración mas la velocidad actual.

Puesto que los bloques creados no nos daban el dato de inclinación, se ha creado un script de Matlab llamado inclinación que toma la posición que se está generando en un instante dado y busca la inclinación de otros datos dependiendo de la posición. Es decir, la posición, velocidad y aceleración pertenecen al mismo ciclo, mientras que la inclinación pertenece a la inclinación que se tiene guardada en una estructura de otro ciclo (con datos de inclinación) para esa misma posición.

Explicación script inclinación

Se carga un ciclo aleatorio que contenga datos de inclinación, que para este caso será VAIL2NREL, después se busca la posición en la que se encuentra la simulación dentro del ciclo VAIL2NREL, y dentro de este ciclo tomamos el dato de inclinación que tiene y se usa como dato de inclinación que entra en el submodelo de generador de potencias.

3.6. Cálculo de consumo

Para poder comparar vehículos, así como diferentes modelos de baterías, pilas, o diferentes tipos de control, necesitamos obtener un valor de aquello que todo fabricante intenta minimizar, es decir necesitamos conocer la cantidad de combustible que se ha consumido.

Cuando tan solo tenemos un valor de cantidad de un único combustible, por ejemplo, 5 litros de gasolina, 1 Kg de hidrógeno, o la batería ha disminuido un 40 por ciento, es fácil poder conseguir un valor de gasto y poder comparar lo que se desee en cada caso. Pero en concreto para esto modelo completo, se tiene el problema de que tenemos 3 fuentes diferentes de potencia, y entonces no se podrá sumar los Kg de hidrógeno consumido con la variación de estado de carga de la batería o del supercondensador, ni ellas entre sí.

Para resolver este problema y poder dar un valor aproximado de consumo de combustible, es necesario llevar las tres unidades diferentes de consumo a unas mismas unidades que se puedan sumar.

Así se ha tomado cada modelo por separado, el de la pila, supercondensador y el de la batería, se le han ido dando escalones con diferentes valores y se ha ido guardando cuanto cambiaba cada una de las unidades de medida de consumo de combustible ante diferentes valores de potencia para así, poder obtener una relación lineal aproximada de para tanta energía cuanto hidrógeno consume la pila, o cuanto cambian los estados de carga de la batería y el condensador. Como es lógico pensar, estos valores lineales serán simplemente aproximados, puesto que el rendimiento de cada modelo cambiará en función de la cantidad de potencia que se le demande, de la temperatura y de varios aspectos, pero la idea es conseguir un valor medio lineal que tenga en cuenta toda.

Además una vez realizados estos escalones y conseguido un valor de relación entre consumo de combustible y energía, cada modelo ha sido simulado por separado para pequeños momentos del ciclo que posteriormente se ejecutará completo, y nuevamente se ha tomado un valor medio lineal que relaciones ambas características, para conseguir un valor más exacto de dicho valor.

Llegados a este punto, se han obtenido dos valores para cada modelo que relacionan el consumo de combustible con la energía que se les demanda, y para llegar a un único valor por modelo, se ha realizado una media ponderada, dándole más peso al valor obtenido en la ejecución de pequeños trozos del ciclo, para obtener finalmente un único que valor que relacione los kilogramos de hidrógeno consumidos con una cantidad de energía, e igual tanto para la variación de estado de carga de la batería así como del supercondensador.

Con todo esto se ha realizado un último bloque, que es tan solo un script de Matlab al que se ha llamado ahorro. Este script nos da una cantidad aproximada de los kilojulios consumidos para una trayectoria realizada.

Tiene como entradas los estados iniciales los kilogramos e hidrogeno iniciales y finales, y los estados de carga de la batería y del supercondensador iniciales y finales, y tiene como salida el consumo aproximado que ha tenido el trayecto que se ha simulado.

Explicación script ahorro

Lo que se realiza en el script en principio no es más que la diferencia de cargas iniciales menos finales, cada una con la que le corresponde, para obtener la variación de cada una de ellas, es decir obtener el consumo de todas las fuentes de potencia por separado.

Las diferencias obtenidas, que pueden ser tanto positivas como negativas, se multiplicarán por la constante que hemos obtenido mediante el proceso explicado anteriormente para que esa diferencia de estado nos dé un valor en julios que puedan ser sumados entre sí, para conseguir un valor de consumo final en julios de las tres diferentes fuentes de potencia.

No se ha obtenido un valor para pasar a energía diferente si por ejemplo la batería ha descargado o cargado puesto que si la batería termina con mas carga que el inicial, el valor quedaría negativo, es decir es una potencia que hemos obtenido no consumido, pero realmente la potencia neta que hemos obtenido es esa diferencia de carga por la potencia que daría al descargar esa potencia, por tanto la batería o el supercondensador van multiplicadas por el valor para pasar a julios carguen o descarguen.

Por último esta suma irá dividida por mil para obtener un valor en kilojulios ya que los valores que tendremos serán muy altos.

Por supuesto además de todo lo explicado en estos apartados, el modelo llevará incluido un bloque de estrategia de distribución de la potencia, esta distribución se realizará tanto heurísticamente como un control óptimo y se analizarán los resultados de ambos.

Estos son todos los submodelos que se han realizado para conseguir un modelo completo de un vehículo híbrido con tres fuentes de potencia.

CAPÍTULO 4. ESTRATEGIAS DE CONTROL

En nuestra vida diaria las personas realizan estrategias para resolver los problemas que se plantean y para realizar diversas labores. Así se puede determinar que siguiendo una estructura y unos procedimientos en función de los datos iniciales mediante una distribución se puede llegar a resolver un problema. Este concepto es lo que se conoce como estrategia, y en el mundo de los sistemas de control automático también se puede aplicar esta idea, solo que se denomina estrategia de control. La estrategia de control determina la estructura o pasos que hay que seguir, es decir que sigue la información para resolver el problema que se nos plantea.

En todos los tipos de vehículos híbridos, como en todos los sistemas de control automático existe un algoritmo de control que supervisa y determina la distribución de la potencia para satisfacer la demandada existente de la forma más beneficiosa en cada caso. Normalmente esta forma más beneficiosa es la de optimizar la reducción de la energía total consumida, con algunas restricciones debidas por ejemplo a restricciones técnicas como no descargar la batería o intentar mantener la pila en un régimen de funcionamiento constante.

Un vehículo híbrido paralelo puede operar de varias formas diferentes como se puede observar en la figura. Las diferentes variantes de trabajo vendrán dadas por el parámetro u , que será la variable de control. Este valor será un ratio entre la energía que se demandará a la batería y la energía total, es decir no es más que la cantidad de energía que se demandará a la batería en tanto por uno. Para este caso se han realizado pruebas tanto para un vehículo híbrido con dos fuentes de potencia, como para un vehículo híbrido con tres fuentes de potencia, lo que significará que tendremos dos variables de control a elegir en cada tiempo (u, v), una para la batería, una para el supercondensador y la resta de uno menos la suma de ambas dará el porcentaje en tanto por uno que se le pedirá a la pila.

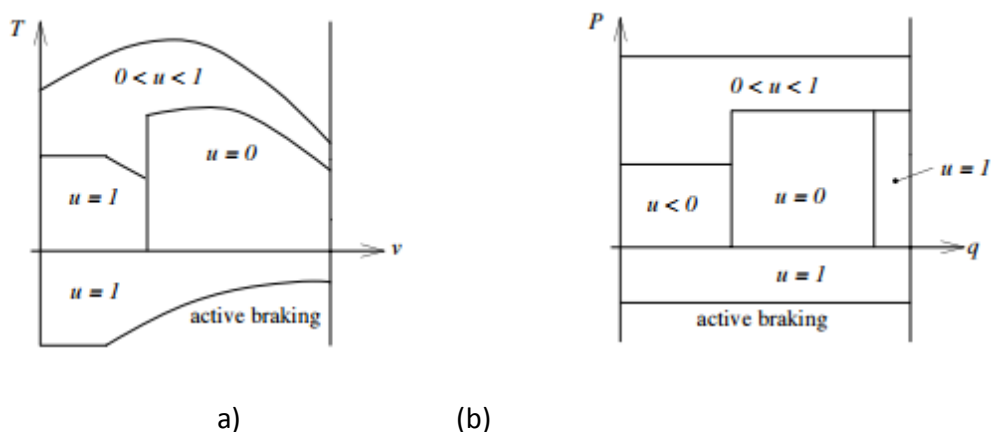


Figura 19 Típico manejo de la potencia de un híbrido paralelo

Fuente: vehicle propulsion systems

Típico manejo de la potencia de un híbrido paralelo en términos del par del motor y la velocidad del vehículo (a) o potencia del motor y estado de carga de la batería (b).

Así para un par y unas velocidades dadas, o para un ciclo de conducción, el algoritmo que realiza la estrategia de control será el que determine en cada instante cuanto debe valer el parámetro u o los parámetros u y v . En la práctica cuando el par de las ruedas es negativo o cero el motor de combustión se para, pero para este caso en el que no existe un motor de combustión sino que tenemos una pila de combustible, se intentará que la pila trabaje en un intervalo constante de potencias aunque en ese momento el par que se demande sea cero o negativo.

Las estrategias de control se clasifican según el conocimiento o desconocimiento de futuras situaciones, los controladores no causales requieren del conocimiento total de las condiciones futuras. Este conocimiento solo es posible cuando el vehículo sigue algún perfil repetitivo como ir y venir al trabajo, o por ejemplo para el transporte público. En todos los demás casos las condiciones futuras serán completamente desconocidas lo que provocará la necesidad de un controlador causal obligatoriamente.

Otra forma de clasificar los controladores es si son heurísticos, óptimos o subóptimos. Los heurísticos son el sistema de control que llevan la mayoría de los híbridos que se han construido a gran escala, los óptimos son los controladores no causales, aunque cada vez son menores las cantidades de información requeridas, y los subóptimos son controladores causales.

En este trabajo se ha realizado un control heurístico y un control óptimo para el vehículo modelado. Estos controles se han realizado tanto para cuando el vehículo tiene tres fuentes de energía como para cuando se tienen menos, es decir por ejemplo cuando el vehículo consta únicamente de la batería y de la pila de combustible. Todos ellos serán explicados y comparados entre ellos en los siguientes puntos.

4.1. Control heurístico

Los controladores heurísticos se suelen basar en normas booleanas que dependen de varias variables del vehículo. El control más típico utilizado en los vehículos híbridos es el de asistente eléctrico, que depende del par demandado, de la velocidad del vehículo y del estado de carga:

- Si las velocidades son muy bajas o si el estado de carga de la batería es muy grande, el motor eléctrico funcionará solo ($u=1$);
- Si el par demandado es muy grande, el motor eléctrico asistirá al motor de combustión de forma que ambos funcionarán al mismo tiempo para dar el par necesario juntos ($0 < u < 1$);
- En un rango medio de trabajo, por encima de la velocidad baja a la que trabaja el motor eléctrico solo y por debajo del mayor par al que el motor eléctrico asiste al motor de combustión, el motor de combustión funcionará solo, sin necesidad de ayuda ninguna por parte del camino eléctrico ($u=0$);
- Por último, cuando las condiciones de par y velocidad lo permitan, si el estado de carga de la batería está por debajo de un límite determinado, el motor de combustión generará un par mayor del que se está demandando en el momento para así poder cargar la batería.

Como se puede apreciar esta estrategia es bastante sencilla, aunque se podrían elegir otras muchas, como determinar cuándo debe generar energía cada motor a partir de un rango de aceleraciones, o únicamente a partir de un rango de potencias, también se podrían realizar estrategias en las que se intente por ejemplo que el estado de carga de la

batería permanezca relativamente constante, es decir que se mantenga en un rango determinado muy pequeño, o determinar que al principio y final de un ciclo de conducción el estado de carga sea exactamente el mismo que el inicial.

Finalmente todo se reduce a elegir el valor de la variable de control u dependiendo del estado de algunas de las variables que se hayan decidido al inicio.

Se podrían realizar muchas combinaciones utilizando el método heurístico ya que como se ha comentado es un método muy sencillo y muy intuitivo de desarrollar, con el que además se pueden conseguir bastantes buenos resultados con respecto a los objetivos que se persiguen que principalmente aparte de restricciones técnicas suele ser el consumo mínimo de combustible. A pesar de todas estas ventajas también tiene algunos inconvenientes entre los que se encuentra determinar el rango de las variables a las que el control heurístico debe tener en cuenta para cambiar de estado, además este tipo de control depende en gran medida de las condiciones de conducción, por lo que los rangos de los parámetros elegidos a priori podrían no funcionar tan bien para otras condiciones de conducción que para las que se han desarrollado.

Estos problemas motivan al desarrollo de algún sistema de control más robusto, un sistema de control que funcione intentando minimizar el coste de una función, que normalmente será el consumo de combustible, es decir un control que optimice los flujos de potencia.

4.1.1. Implementación del control heurístico

La implementación del control heurístico se ha realizado tanto para cuando existan tres fuentes de potencia como para el caso de que existan únicamente dos de ellas, puesto que en caso de que solo tuviéramos una, no existiría nada que controlar, la potencia demandada sería la que le correspondería en cada instante al elemento en concreto que este abasteciendo el sistema.

Puesto que para este caso no tenemos un motor de combustión interna, sino que disponemos de una pila de combustible, una batería y un supercondensador, el requisito que prevalecerá será el intento de que la pila trabaje en un régimen constante de potencias, de manera que no estemos constantemente apagándola y encendiéndola, ya que éste es un requisito técnico y lo tendremos como una de las restricciones más importantes.

Así para el caso que tengamos la pila de combustible con una fuente adicional de potencia, ya sea la batería o el supercondensador, el rango de trabajo final elegido para la pila será entre 5700 y 29000 vatios, que con las características de la pila se ha comprobado que es el rango en el que la pila trabaja a mayor rendimiento.

Por tanto el código de control irá comprobando si las potencias son positivas o negativas, y para el caso de potencias positivas comprobar si están dentro del rango de la pila, por encima o por debajo, y según el estado de carga de la batería o del supercondensador, la pila se colocará en un punto dentro del rango decidido, ya sea para cargar la batería o para trabajar a máximo rendimiento con ayuda de la misma.

Tras la explicación de la idea global de lo que se busca con el control heurístico desarrollado, la explicación detallada se expone a continuación, en el que se nombrará a la fuente adicional a la pila siempre como la batería, pero hay que tener en cuenta que podría ser cualquiera otra, como el supercondensador, aunque el algoritmo fuera el mismo, habría que adaptar los rangos de trabajo ya que el supercondensador tiene menos capacidad de carga que la batería.

Explicación script distribucionheu2

El primer paso es comprobar si la potencia que se demanda es positiva o es negativa, ya que obviamente una se tratará diferente de la otra.

En caso de que la potencia sea positiva, hemos de comprobar que el estado de carga de la batería esté por encima de 0.1 y por debajo de 0.9, puesto que se intentará también como restricción que la batería nunca esté totalmente cargada ni totalmente descargada.

Si la batería tiene suficiente carga el siguiente paso que se realiza es comprobar si estamos dentro, por encima o por debajo del rango que se ha propuesto para la pila:

- Si estamos dentro del rango de la pila, la potencia la cederá únicamente la pila, y en caso de que el estado de carga de la batería esté por debajo de 0.5 la pila trabajará a máxima potencia dentro del rango, es decir dará 29000 vatios y con la potencia restante se cargará la batería. Con esto evitamos lo que ya se ha explicado, que la batería no llegue nunca a estar en un rango muy bajo de carga.
- En el caso en que estemos por encima del rango determinado para la pila, podemos diferenciar a su vez dos casos, cuando la batería tiene más de un 0.6 de carga, en el que la pila trabajará en su punto de máximo rendimiento aportando 19700 vatios y la batería aportará el resto, y cuando la batería está por debajo de esta carga, caso en el que la pila aportará su máxima potencia dentro del rango, 29000, y la batería aportará el resto de la potencia. Esta segunda opción, en la que la pila trabaja a máxima potencia dentro del rango se ha programado con el comando `else`, lo cual hará que si la potencia es menor de 5700 también entre en esa opción, pero como se explicará a continuación, las siguientes líneas distribuyen la potencia para cuando estamos por debajo del rango de la pila, por lo que las variables `pp` y `pb` (variables que serán las salidas del código y serán las potencias que se les demandarán tanto a la pila como a la batería por ejemplo) serán actualizadas a continuación antes de llegar al final del programa.
- Cuando la potencia que se demande esté por debajo del rango, se vuelven a distinguir nuevamente dos casos, si el estado de carga de la batería está por debajo de 0.5 la pila trabajará a su mayor rendimiento y la diferencia se utilizará para cargar la batería, y en caso de que el estado de carga esté por encima de 0.5 la pila trabajará abasteciendo 15000 vatios, y cediendo la diferencia a la batería.

Estos son los casos en los que la batería está por encima de 0.1 de carga y por debajo de 0.9, si la batería se quedara por debajo de este estado de carga, el código comprueba si la potencia que se está demandando es menos que la máxima que puede dar la pila, ya no dentro del rango, sino fuera de él, que serán 54500 vatios, y en caso de ser menos que esa cantidad, la pila cederá su máxima potencia y la diferencia se usará para cargar la batería. En este caso se ha decidido sacar a la pila de su rango de trabajo ya que tener la batería tan descargada es otra restricción técnica a tener en cuenta, debido a que si las baterías están muy cargadas o descargadas se disminuye considerablemente su vida útil. Si la potencia que se está demandando es mayor que la máxima global de la pila, no se tendrán recursos suficientes para abastecer la demanda, por lo que la pila trabajará aportando 54500 vatios y la batería no aportará nada. El caso en que la batería esté por encima de 0.9 de estado de carga, será ella quien ceda toda la potencia y la pila quedará totalmente

parada. Nuevamente se saca a la pila de su rango de trabajo pero es una forma de asegurarnos la vida útil de la batería y de que nunca se carga por completo.

Por último, para termina con la explicación del control heurístico para dos fuentes de potencia, queda explicar que realiza el código para el caso de potencias negativas. De nuevo se distingue entre dos casos:

- Cuando el estado de carga de la batería está por debajo 0.5, la pila cederá la potencia para su máximo rendimiento global, es decir cederá 19700 vatios, y como siempre, la diferencia con respecto a la potencia que se está demandando será utilizada para cargar la batería.
- Utilizando la misma idea que se siguió en las líneas anteriores del código, para el caso en que la batería esté por encima del 0.5, la pila cederá 15000 vatios de potencia, y cargará a la batería con la potencia restante.

Como se puede apreciar en la explicación del código de control heurístico para dos fuentes de potencia, las salidas proporcionadas por el mismo son la potencia que se le pedirá a la pila de combustible y la potencia que se le pedirá a la batería o al supercondensador, y las entradas para este caso serán la potencia total que se está demandando en cada instante, y el estado de carga de la batería, que son las variables que se han utilizado para determinar en qué rangos y en cuánta cantidad debe trabajar cada fuente de potencia.

Se ha desarrollado además el código de control para el caso de tres fuentes de potencia, pila de combustible, batería y supercondensador. La idea y la estructura que sigue éste código es la misma que para el de dos fuentes de potencia extendido a tres. Además de lo anterior, hay que añadir que el supercondensador se usará para cuando existan fuerte aceleraciones, es decir usaremos el supercondensador en el control cuando la derivada de la potencia sea muy grande, y por supuesto el rango a partir del cual se considera muy grande es un parámetro más que habría que fijar según el ciclo, el perfil de conducción o las características de los elementos de los que se dispone.

El código de control para tres fuentes de potencia intenta al igual que el de para dos fuentes que la pila trabaje en un rango intermedio de potencias que será prefijado antes de iniciar el código, y que para este caso se tomará el mismo que anteriormente puesto que es el rango de máximos rendimientos de la pila.

De nuevo el código comprobará si la potencia que se demanda está dentro o fuera del rango, y colocará a la pila en un punto dependiendo de los estados de carga de la batería y del supercondensador y dependiendo de la derivada de la potencia.

Las entradas al código y por tanto las variables con las que se decidirá la distribución de la potencia en este caso son, la potencia demandada, el estado de carga del supercondensador y de la batería y la derivada de la potencia, para saber si es necesario usar o no el supercondensador. Como salidas tendremos la cantidad de potencia que le corresponde a cada fuente de potencia.

Explicación script distribucionheu3

En primer lugar se comprueba si la potencia que se está demandando es positiva o negativa, en caso de que sea positiva a continuación se comprueba si el estado de carga de la batería está entre 0.1 y 0.9, para evitar que la batería llegue a estar totalmente llena o totalmente vacía. Si la batería esta en ese intervalo de carga al igual que en el control para dos fuentes la casuística se divide en tres, si la potencia que se demanda está dentro, por encima o por debajo del rango de trabajo de la pila.

- Si la potencia demandada está dentro del rango de la pila, la pila dará totalmente la potencia demandada, a no ser que, si el estado de carga de la batería está por debajo de 0.4 la pila dará el máximo dentro del rango y con la diferencia se cargará la batería, o si el estado de carga del condensador está a 0 y el de la batería por encima de 0.2 de nuevo la pila trabajará a máxima potencia dentro del rango y con la diferencia cargará al supercondensador.
- En caso de que la potencia que se demande sea mayor que el rango el control podría actuar de varias formas diferentes, en primer lugar si la derivada de la potencia que se demanda es mayor que un valor determinado, que para este caso es 100, será el supercondensador quien de la potencia que falta a la pila para llegar a la potencia demandada, en caso de que la derivada sea menor de 100, será la batería quien realice esta función. Dentro de estos dos casos existen a su vez otros dos casos por cada uno, si es la batería quien debe aportar la potencia que falta, la pila trabajará a máximo rendimiento y la batería aportará el resto cuando el estado de carga de la misma sea superior a 0.6, en caso contrario la pila trabajará a la máxima potencia dentro del rango y la batería aportará el resto. Igualmente si es el supercondensador quien debe aportar la potencia restante entre la demandada y la de la pila, ésta dará la potencia para su mayor rendimiento en caso de que el estado de carga del supercondensador sea mayor a 0.3, y en caso de que sea menor, la pila dará la máxima potencia dentro del rango de trabajo prefijado y el supercondensador dará el restante.
- Cuando la potencia que se demande sea menor que la menor del intervalo de trabajo de la pila, ésta trabajará a máximo rendimiento y cargará a la batería si su estado de carga es menor de 0.4, al supercondensador si su estado de carga es menor de 0.5 y el de la batería mayor a 0.4, es decir se le da más prioridad al estado de carga de la batería, puesto que si hubiera que cargar antes a alguno de los dos se haría a la pila. Y en el caso de que las cargas de ambos elementos estuvieran por encima de dichos valores, la pila aportaría mil de potencia y se cargaría al supercondensador y a la batería a partes iguales.

Estos son los tres casos que tendría en cuenta el controlador si el estado de carga de la batería estuviera por encima de 0.1 y por debajo de 0.9. Si este valor fuera inferior a 0.1, al igual que para dos fuentes, la pila daría la máxima potencia posible, incluso fuera de rango, que en este caso es 54500, y la diferencia entre la demandada y esta potencia máxima de la pila se usaría para cargar la batería. Igualmente en caso de que el estado de carga fuera superior a 0.9, sería la batería quien cedería toda la potencia demandada. También la pila se saldría del rango puesto que se pararía, al igual que el supercondensador ya que la potencia que se les pediría a ambos sería cero, pero en este caso se le ha dado más importancia al estado de carga de la batería.

Para terminar solo falta explicar que realiza el controlador cuando las potencias demandadas son negativas. Se ha seguido una idea parecida a la de cuando son menores que el menor valor del intervalo de trabajo de la pila. Así la pila trabajará en su punto de máximo rendimiento y cargará a la batería con la diferencia si el estado de carga de ésta está por debajo de 0.4 y cargará con la diferencia al supercondensador si la batería tiene más de 0.4 de carga y éste menos de 0.4. En caso de que el estado de carga de ambas fuentes esté por encima del valor que ha prefijado, la pila aportará 10000 vatios, y la diferencia se dividirá a partes iguales entre la batería y el supercondensador.

4.1.2. Experimentos realizados con el control heurístico

Los primeros experimentos que se han realizado con el control heurístico han sido teniendo en cuenta únicamente dos fuentes de potencia. Se ha tenido en cuenta variaciones de casi todos los modelos a la hora de realizar experimentos con él. Además todos los experimentos se han realizado con un tiempo de 1800 segundos, y con el ciclo ArtMw130 y la inclinación de VAIL2NREL, en las simulaciones que no lleven estas características se especificará claramente.

En primer lugar se fue cambiando el rango de trabajo de la pila, que como ya se comentó, fijar los intervalos de los parámetros es un punto importante para el control heurístico. Para determinar el intervalo, el modelo se ejecutó para pendientes constantes de 0, -0.073 y 0.3. La idea principal, es que la pila trabaje en un régimen medio de potencias, en el que la batería no termine muy descargada ni muy cargada, y además intentando que la pila trabaje al máximo rendimiento posible. En general para todas las simulaciones el modelo se ha ejecutado con un estado de carga inicial de la batería de 0.8, que aunque el estado inicial no influye en el cálculo del consumo que se realiza al final del ciclo, si que influye en los caminos que toma la estrategia de control, y por tanto si que influirá en el consumo final del ciclo, este estado de carga ha sido el estado inicial siempre que se ha podido, porque durante algunas ejecuciones como por ejemplo todo el ciclo pendiente negativa o cero, la batería se podía cargar demasiado rápido y terminar cargada completamente, por lo que se ha ejecutado empezando con un menor estado de carga (0.3 para esos caso), así como con una capacidad mayor para las baterías, en lugar de tomar que existen 6 baterías, se han tenido en cuenta 12 y 0.8 de estado de carga y 12 baterías para pendiente positiva todo el tiempo. Los cambios que se han realizado, se han tenido en cuenta para todas las simulaciones, lo único que ha cambiado ha sido el intervalo de trabajo de la pila de combustible, por lo que todos se han ejecutado bajo las mismas condiciones y por tanto los resultados son perfectamente comparables.

Con todo ello, los resultados finales obtenidos son los siguientes:

Rango de la pila entre [5700,54000]

Inclinación (Radianes)	Socb final (tanto por 1)	Kg H2 final (Kg)	Consumo (MJ)
0	0.7679	1.454	36.63
-0.073	0.9	1.786	21.84
0.03	0.899	1.36	42.99

Tabla 1 Resultados del control heurístico para rango de la pila [5700,54000]

Rango de la pila entre [5700, 36000]

Inclinación (Radianes)	Socb final (tanto por 1)	Kg H2 final (Kg)	Consumo (MJ)
0	0.755	1.469	36.11
-0.073	0.9	1.79	21.65
0.03	0.8487	1.4035	41.54

Tabla 2 Resultados del control heurístico para rango de la pila [5700,36000]

Rango de la pila entre [5700, 29000]

Inclinación (Radianes)	Socb final (tanto por 1)	Kg H2 final (Kg)	Consumo (MJ)
0	0.684	1.5	32.25
-0.073	0.8995	1.792	21.57
0.03	0.5855	1.515	40.35

Tabla 3 Resultados del control heurístico para rango de la pila [5700,29000]

Con los resultados obtenidos para las pendientes constantes, se observa claramente como disminuir el rango de la pila hace que ésta trabaje a mayores rendimientos, por supuesto los rangos que se han tomado son los de mayores rendimientos dentro de la curva del rendimiento de la pila, el punto de máximo rendimiento es 19700 vatios, cuanto más se reduce el intervalo en torno a este punto más mejores rendimientos nos dará la pila y por tanto el consumo será menor. Esto provoca por otra parte que la batería tenga que ser usada más veces y para aportar mayores potencias, los kilogramos de hidrógeno son cada vez mayores al final del ciclo mientras que el estado de carga final de la batería disminuye conforme se reduce el rango de trabajo de la pila como era de esperar. Para tomar una decisión respecto al intervalo de valores de trabajo de la pila de combustible se ha de llegar a una solución de compromiso entre hasta cuanto se puede demandar a la batería para no dejarla totalmente sin carga, o con muy poca carga, y cuanto podemos reducir el intervalo de la pila para obtener así mejores rendimientos y un mejor resultado final. Con todo ello, se tomará como buen intervalo el último experimentado, ya que se considera que la pila trabaja a buenos rendimientos y dando una buena cantidad de potencia.

Se ha ejecutado este modelo con el rango de la pila que se ha considerado el mejor de los simulados para diferentes pendientes constantes, para el mismo tiempo y mismo ciclo, pero ahora con la inclinación del ciclo VAIL2NREL. El ciclo se ha simulado para 6 baterías y un estado de carga inicial de 0.8. Con todo ello se han obtenido los siguientes resultados:

-Evolución del estado de carga de la batería frente al tiempo:

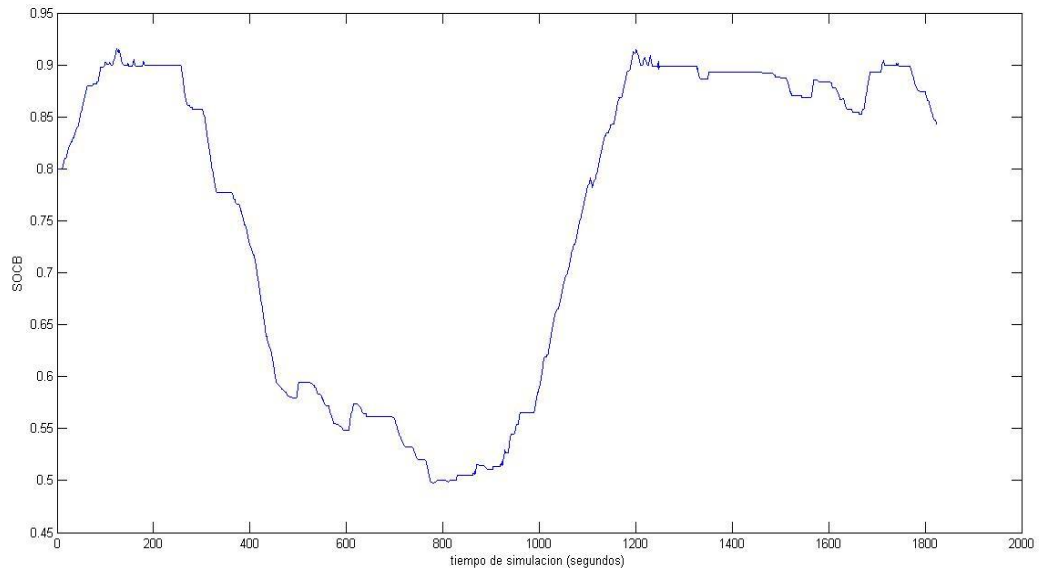


Figura 20 Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

-Evolución de los kilogramos de hidrógeno frente al tiempo:

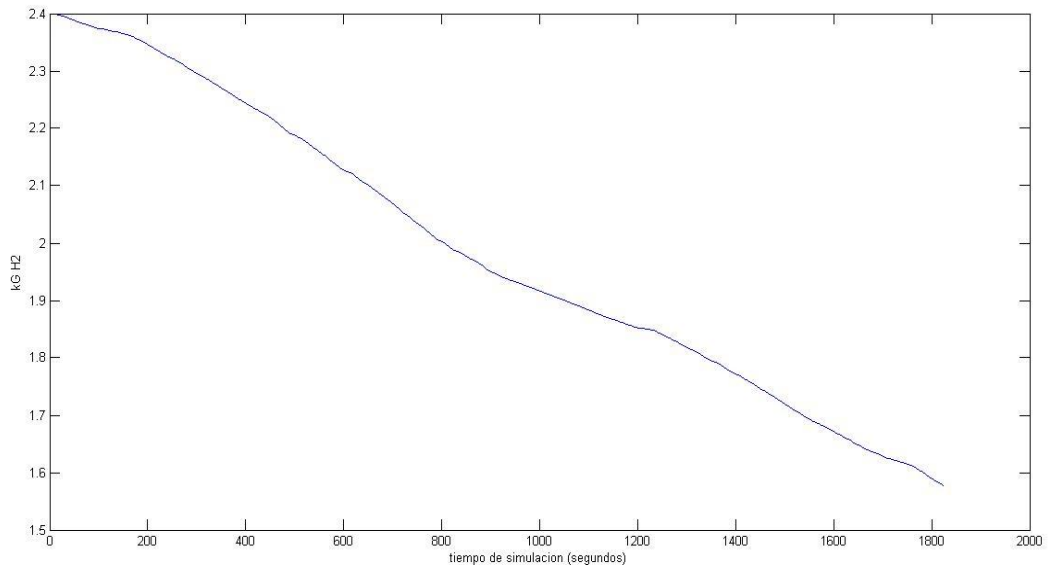


Figura 21 Kilogramos de H2 frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

Se puede observar cómo se cumple la especificación técnica de que la batería no puede estar ni totalmente cargada ni totalmente descargada, se observa cómo ha disminuido en los momentos en los que la batería ha tenido que aportar más potencias pero se ha recargado rápidamente de nuevo a costa de la pila de combustible la cual ha terminado con en torno a 1.6 Kg de hidrógeno el ciclo. El consumo total del ciclo ha sido de 34.27 megajulios, cifra que se intentará mejorar con el control óptimo.

-Las potencias que se le han demandado tanto a la batería como a la pila respectivamente son:

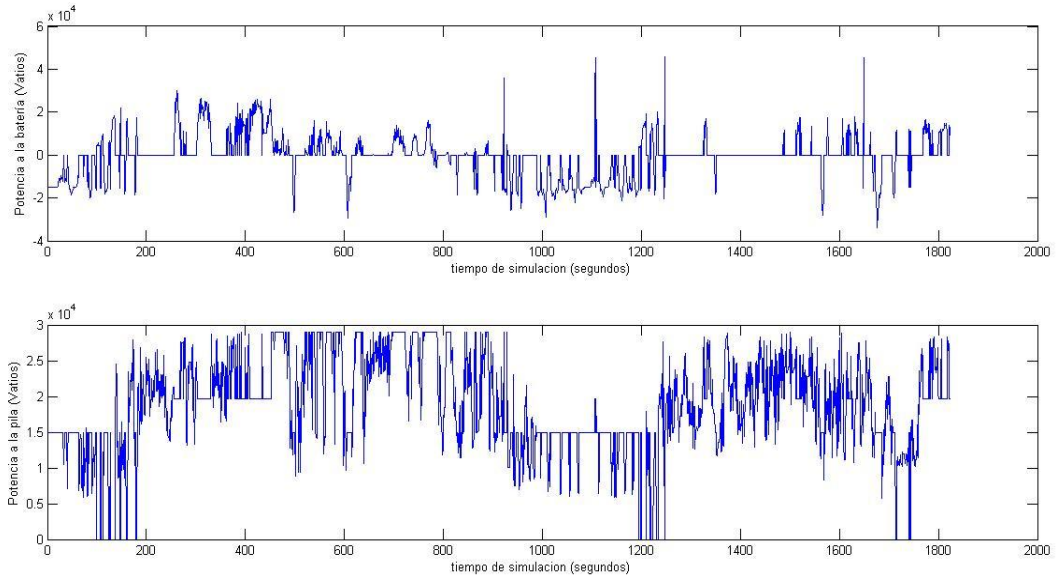


Figura 22 Potencias demandadas a la batería y a la pila frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

Se ve como el objetivo de que la pila trabajara a un ritmo constante de trabajo de ha conseguido, al igual que la batería ayuda y se para muchas veces, cuando las potencias son altas para que la pila no salga del intervalo de trabajo. En la zona de trabajo de la pila, podemos diferenciar dos claramente, una cuando las potencias que se demandan son positivas y otras cuando las potencias son negativas y la batería se está cargando que la pila trabajando dando unas potencias menores, por tanto con el control se ha conseguido lo que se pretendía.

El siguiente experimento realizado para el control heurístico con dos fuentes de potencia ha sido el aumento del peso del vehículo, esto conlleva una mayor necesidad de potencias dependiendo de cuanto sea la variación, y podría llevar a dejar sin carga la batería, o tener un consumo muy elevado. Para este caso se ha aumentado el peso del vehículo desde 500 Kg hasta 1500 Kg, lo cual es un aumento de peso considerable. Los resultados que se han obtenido se muestran a continuación:

-Evolución del estado de carga de la batería frente al tiempo:

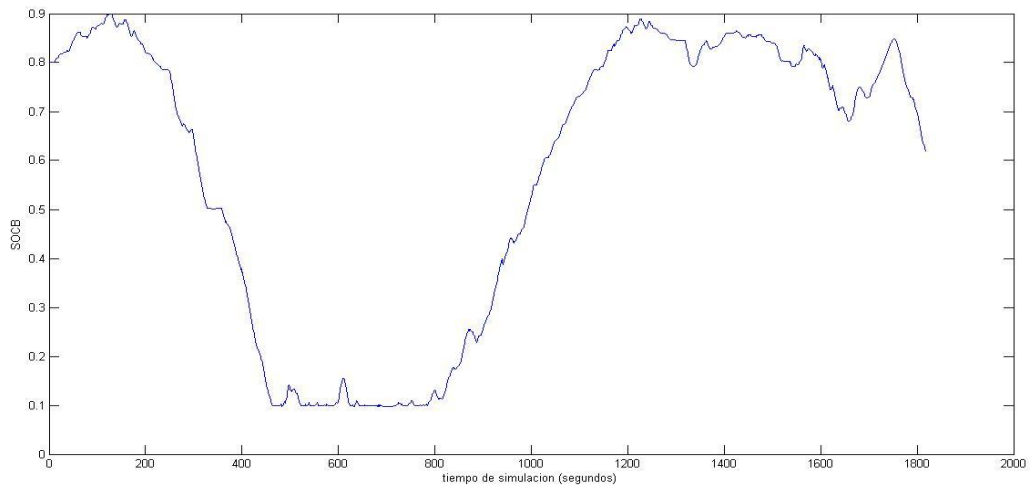


Figura 23 Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia y un peso del vehículo de 1500 Kg.

Fuente: Simulink

Para este caso se ha planteado un problema que no había aparecido en los demás experimentos, el estado de carga de la batería ha llegado a ser crítico, puesto que ha llegado a estar en 0.1 cuando el ciclo a demandado más energía, aunque finalmente a terminado en torno a 0.63.

-Evolución de los kilogramos de hidrógeno frente al tiempo:

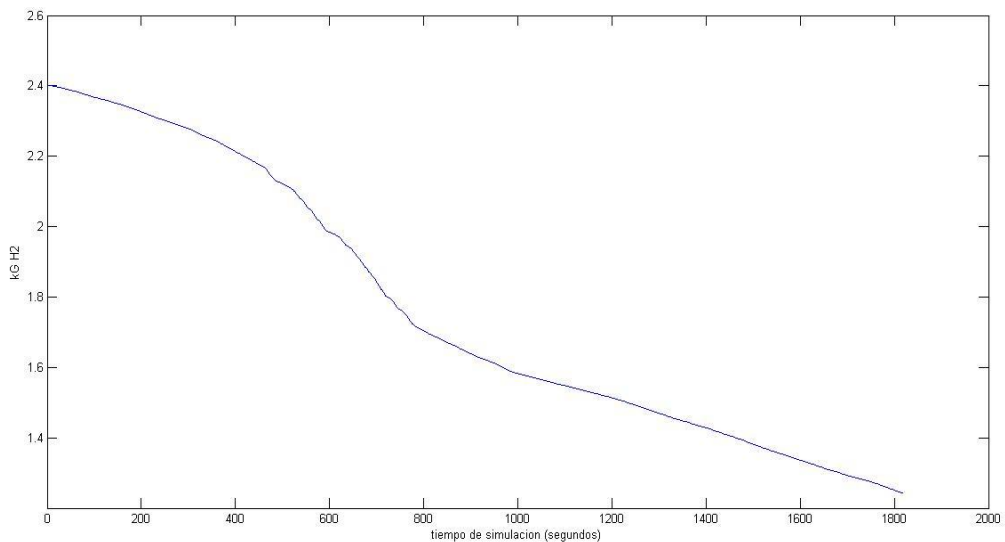


Figura 24 Kilogramos de h2 frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia y un peso del vehículo de 1500 Kg.

Fuente: Simulink

El estado final de la pila de combustible es una muy poca carga de hidrógeno, esto es debido al considerable aumento del peso y por tanto la necesidad de unas potencias mucho mayores para mover un vehículo tres veces más pesado.

-Las potencias demandadas tanto a la batería como a la pila respectivamente son:

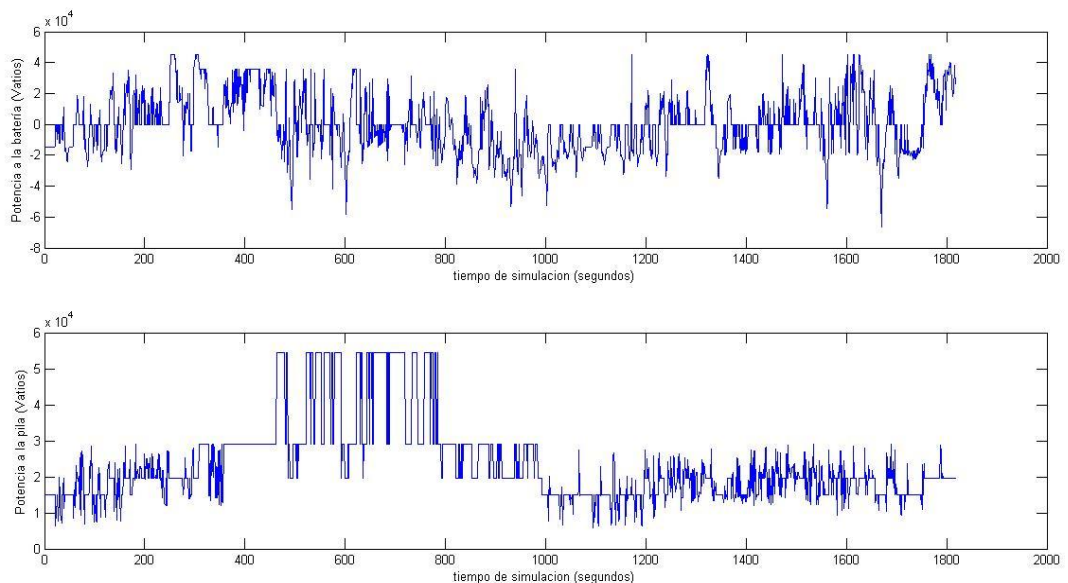


Figura 25 Potencias demandadas a la batería y a la pila, con ArtMw130 para control heurístico con dos fuentes de potencia y un peso del vehículo de 1500 Kg.

Fuente: Simulink

Además de las dos zonas que hasta ahora habían aparecido, nos aparece una zona en la que la pila trabaja a máxima potencia, esta zona es provocada por el estado de carga crítica de 0.1 de la batería, por lo que la pila ha tenido que salir de su zona de trabajo normal para ayudar a la batería a aumentar su estado de carga. Si se aumenta el número de baterías de 6 a 12, el ciclo y los estados de carga serían los mismos, pero el tiempo que permanece el estado de carga de la batería en 0.1 disminuiría, ya que la batería tiene más capacidad.

Se ha simulado también el modelo dejando constante el rendimiento del motor en un 80 % para potencias positivas y un 50% para potencias negativas, estas simulaciones no aportan un gran valor informativo. El coste para la ejecución del ciclo ha sido de 33.74 megajulios cuando el coste en condiciones normales fue de 34.27 megajulios, lo que nos da una idea de que el motor trabajará a un rendimiento medio muy cercano a este valor, ya que los costes han sido muy parecidos.

El último experimento realizado para este modelo y el control heurístico para dos fuentes de potencia es el cambio de ciclo, el control estaba realizado para este ciclo en concreto por lo que un cambio de ciclo puede provocar que los rangos de trabajo y por tanto el rendimiento no sean tan buenos, incluso que sean bastante malos.

El primer ciclo simulado es el ArtMw150, este ciclo es muy parecido al ciclo para el que se creó el control por lo que los resultados obtenidos son muy parecidos también. La única diferencia es un poco más de consumo con respecto al ArtMw130, por lo que el control funciona bastante bien para este ciclo. El siguiente ciclo que se ha simulado es el ArtUrban, que es un ciclo bastante diferente, con muchas menos demandas de potencia. Esta diferencia se traduce directamente en el estado de carga de la batería:

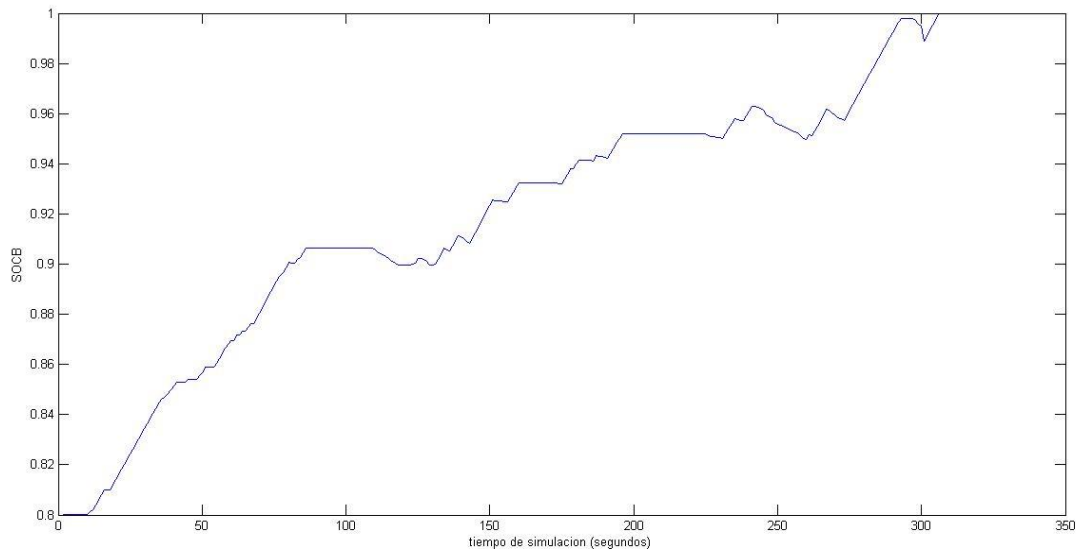


Figura 26 Estado de carga de la batería frente al tiempo, con ArtUrban para control heurístico con dos fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

Se puede apreciar en la imagen como en apenas 300 segundos de simulación, a pesar de las restricciones del control, la batería llega a estar cargada completamente. Como ya se ha comentado varias veces esto es una especificación técnica no deseada y por tanto el control no funciona bien para este ciclo.

Este resultado demuestra que el control heurístico es poco robusto respecto al cambio de ciclo, y que por tanto no es nada trivial de diseñar cuando se trata de realizar uno que podamos utilizar para varios ciclos diferentes, puesto que los rango y valores que se han obtenido estaban pensados para otras demandas de potencias. Para ajustar el control al nuevo ciclo habría que disminuir las potencias que da la pila de combustible, y que la pila trabajará en un rango de potencias adecuado para no cargarse tan rápidamente.

Estos son todos los experimentos realizados para dos fuentes de potencia, a continuación se expondrán los experimentos realizados para tres fuentes, que son menos puesto que no aportan gran variedad de información respecto a los ya realizados, excepto el uso del supercondensador para derivadas grandes de potencia.

Se parte de la idea de que el intervalo de trabajo de la pila no se va a variar respecto al calculado para dos fuentes de energía, puesto que para este ciclo que se ha elegido es un buen rango y la pila trabaja con un gran rendimiento.

El primer tema a abordar es el valor de la derivada de la potencia por encima de la cual tiene que actuar el supercondensador. Este valor no es nada trivial y puede variar mucho de un ciclo a otro. Además hay que tener en cuenta que el supercondensador hay que usarlo para grandes aceleraciones, puede darse el problema de que si lo usamos demasiado cuando se necesite esté descargado.

Las primeras pruebas que se han realizado para el control heurístico para tres fuentes de potencia es la variación de la derivada de la potencia a la cual actúa el supercondensador o la batería.

Para valor de la derivada superior a 1000 se obtiene un valor de coste de realización del ciclo de 37.47, un valor muy alto que puede deberse al uso del supercondensador cuando no es realmente necesario u óptimo. Los estados de carga de la batería, pila de combustible y supercondensador respectivamente quedan:

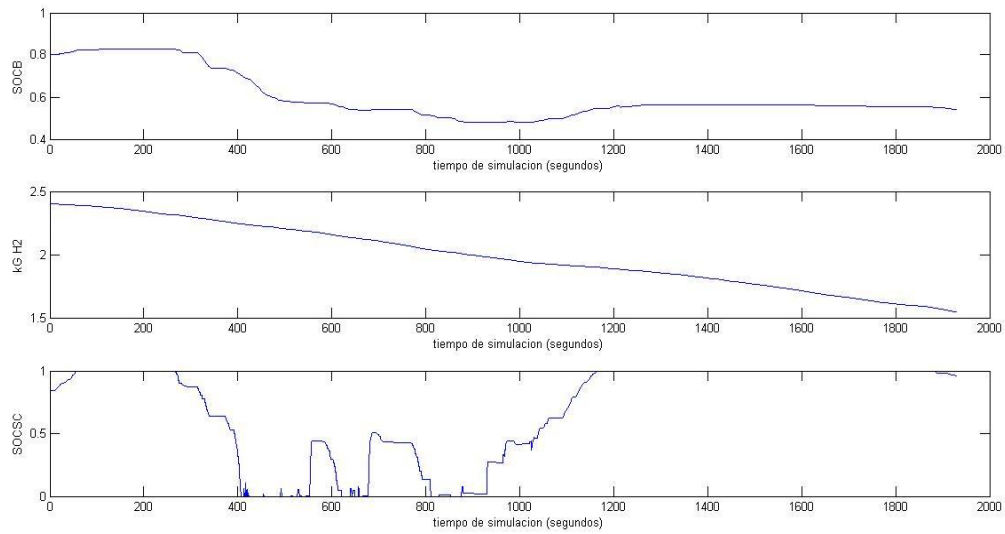


Figura 27 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 1000.

Fuente: Simulink

Se puede deducir de los estados de carga, que el supercondensador está demasiado tiempo totalmente cargado por lo que el gran coste de realización del ciclo puede ser debido al intento de usar bastante energía cargando el supercondensador y que realmente no esté sirviendo para nada puesto que ya está cargado totalmente. El valor del estado de carga de la batería termina en un valor próximo a 0.6 por lo que se podría dar como un buen resultado.

Disminuyendo el valor de la derivada de 1000 hasta 100 obtenemos un valor de coste final de 33.92 megajulios y los siguientes estados de carga:

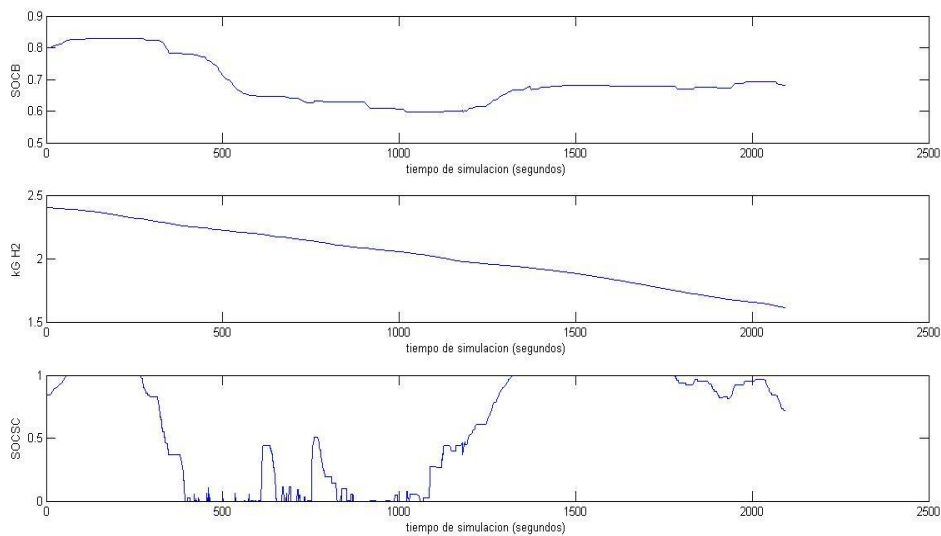


Figura 28 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 100.

Fuente: Simulink

En la imagen se puede apreciar como el tiempo que el supercondensador está totalmente cargado disminuye considerablemente, lo cual era de esperar, puesto que estamos usando el supercondensador muchas más veces que en la anterior simulación. En contraposición el tiempo que está totalmente descargado aumenta respecto a la anterior simulación. Además de disminuir el coste global, la batería termina también con mayor estado de carga.

La distribución de potencias que se han demandado en el mismo orden que los estados de carga son las siguientes:

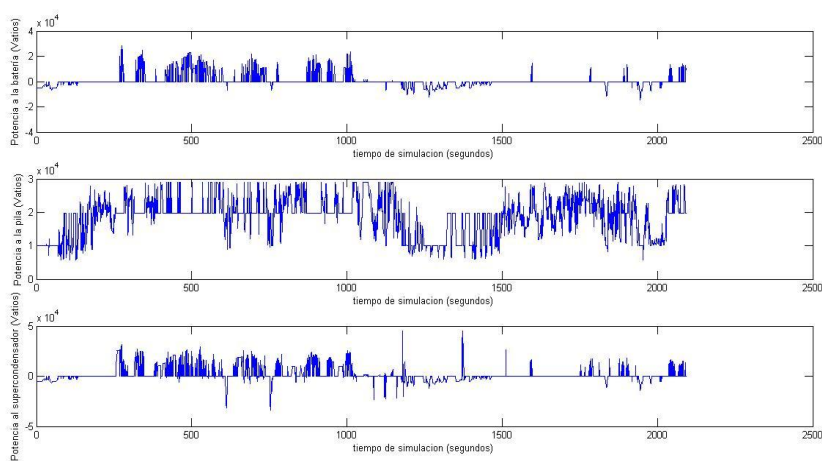


Figura 29 Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 100.

Fuente: Simulink

La distribución de potencias sigue la misma línea que para dos fuentes de potencia ya que el objetivo era el mismo, mantener en un régimen constante de trabajo a la pila de combustible, y como se puede ver se consigue, ya que se tienen las dos mismas zonas de trabajo que se tenían para dos fuentes. Como era de esperar hay una disminución considerable de la energía que se demanda a la batería, puesto que ahora ha sido abastecida por el supercondensador en determinados momentos. En la imagen se puede ver como en los momentos donde el ciclo demanda más potencia, que es cuando el estado de carga del supercondensador se acerca o se pone en cero, las potencias negativas se ceden mayormente al supercondensador que a la batería, de ahí que haya partes de potencia negativas más grandes, sin embargo al final del ciclo, cuando el supercondensador está casi totalmente cargado, es la batería quien recibe una mayor parte de las potencias negativas.

Disminuyendo aun más el valor de la derivada desde 100 hasta 50 obtenemos un coste total de la ejecución del ciclo de 33.83 megajulios, lo que aumenta más el rendimiento completo del control realizado. Las gráficas que se obtienen de los estados de carga son las siguientes:

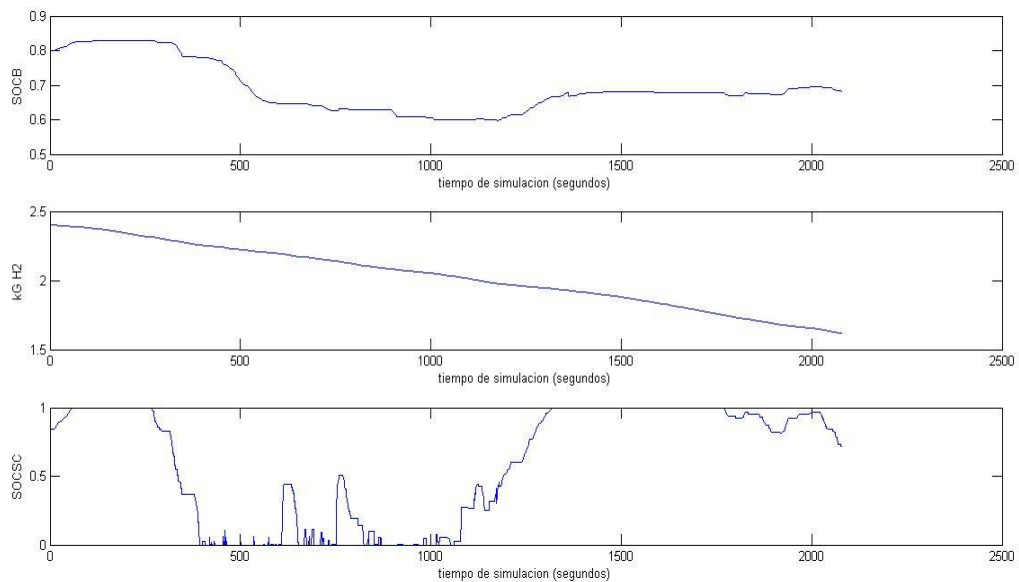


Figura 30 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 50.

Fuente: Simulink

Y las gráficas obtenidas de las potencias demandadas son:

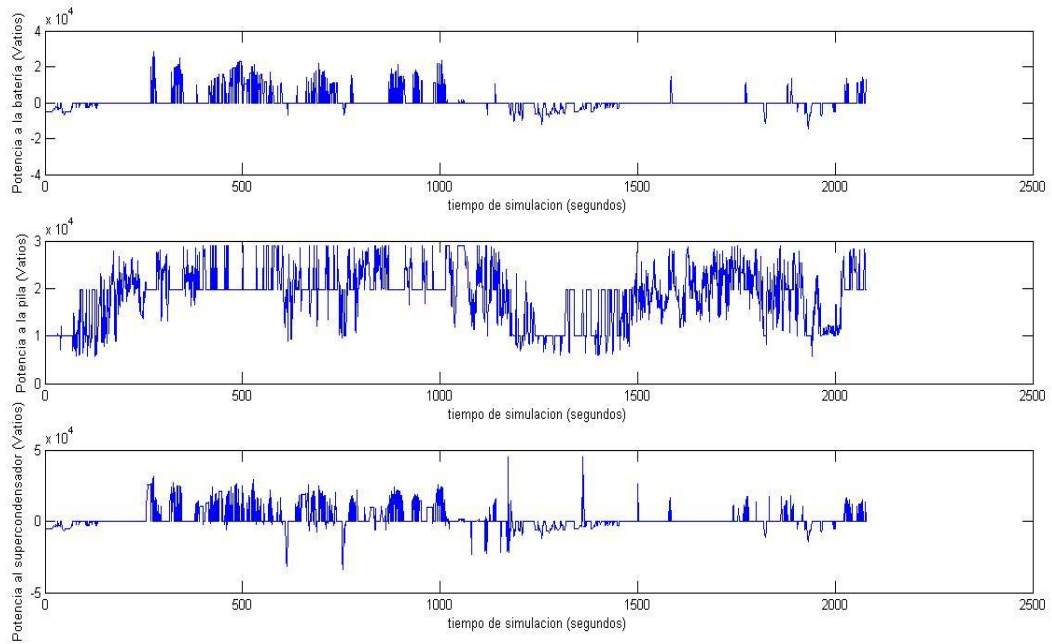


Figura 31 Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y valor de la derivada de 50.

Fuente: Simulink

A pesar de que el cambio no es tan considerable como antes, ya que el cambio del valor de la derivada tampoco lo es, las potencias que se le demandan ahora al supercondensador son más que las que se le demandaban anteriormente. Esto provoca que el supercondensador esté aún menos tiempo cargado completamente y a su vez que esté más tiempo descargado completamente. Por esta razón se tomará para seguir haciendo simulaciones el de valor de la derivada igual a 100, ya que si el supercondensador está demasiado tiempo descargado, podría darse la necesidad de usarlo y no tener carga, aunque para 50 el rendimiento global del control sea mejor, se elige el otro por esta especificación.

Al igual que para dos fuentes de potencia, el siguiente experimento que se ha llevado a cabo es la simulación del modelo completo tomando el valor de la derivada como 100 y variando el peso del vehículo de 500 a 1500 kilogramos. De nuevo lo que estamos viendo con este cambio es cómo funciona el control cuando las potencias que se demandan son mayores. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Variación de los estados de carga

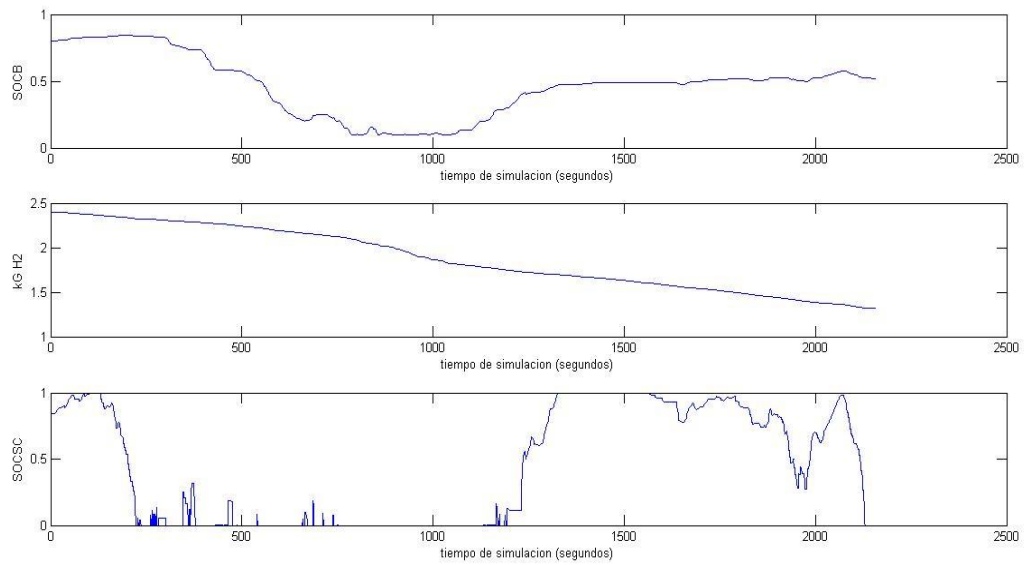


Figura 32 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500 Kg.

Fuente: Simulink

-Potencia demandada a las diferentes fuentes de potencia:

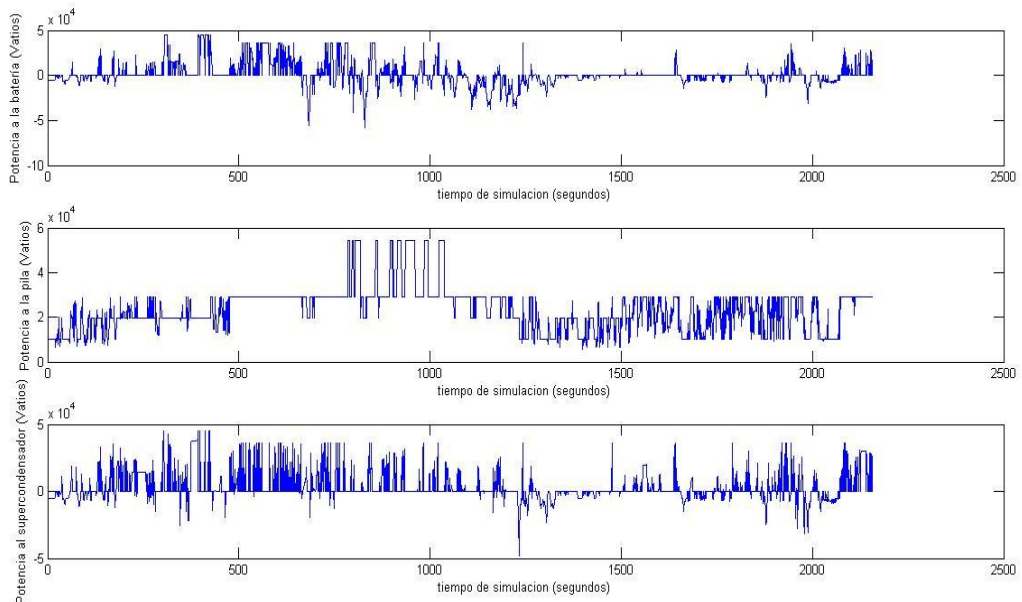


Figura 33 Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con ArtMw130 para control heurístico con tres fuentes de potencia y peso del vehículo de 1500Kg.

Fuente: Simulink

Nuevamente nos encontramos con conclusiones parecidas a las que obtuvimos en la simulación para dos fuentes de potencia, se puede ver como la pila trabaja fuera de rango para cargar la batería la cual acaba finalmente con un estado en torno al 0.5, vemos como el supercondensador está mucho tiempo descargado, lo que nos puede llevar a lo que se comentó anteriormente, de no tenerlo cargado cuando exista la necesidad de ello.

El último de los experimentos realizados y quizás el más importante junto con el del cálculo del valor de la derivada es el cambio de ciclo, ya que es muy importante conseguir un control heurístico que se adapte bien a todo tipo de situaciones, se va a observar cómo funciona este control por tanto en diferentes perfiles de conducción.

El primer ciclo para el que se ha probado es el ArtMw150, por lo que los estados de carga y distribución de potencias serán parecidas a lo que se ha simulado hasta ahora. La diferencia principal es el aumento del consumo del ciclo que pasa a 35.45 megajulios, mientras que las distribuciones y estados de carga son muy parecidos.

El segundo ciclo con el que se ha probado es con WLTP class 3, en el cual nos ha salido un coste total del ciclo de 21.22 megajulios, y las gráficas de los estados de carga y de las potencias demandadas son las siguientes:

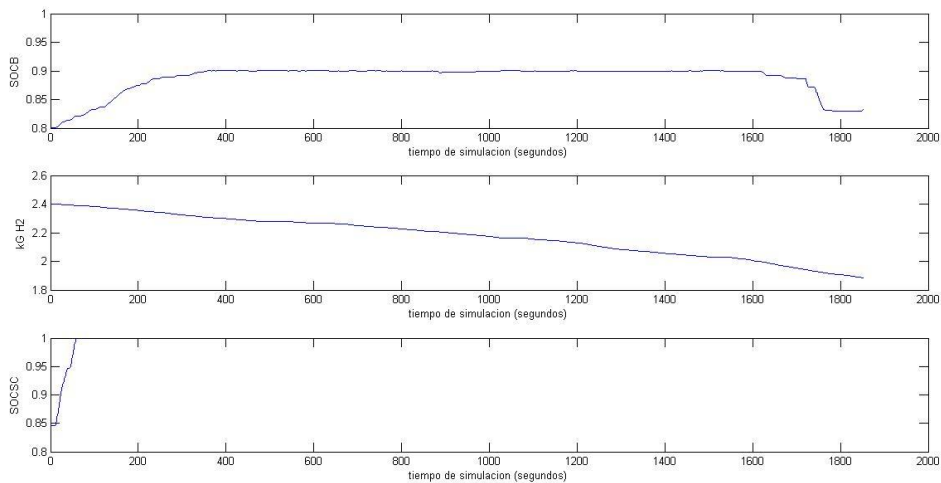


Figura 34 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con WLTP class3 para control heurístico con tres fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

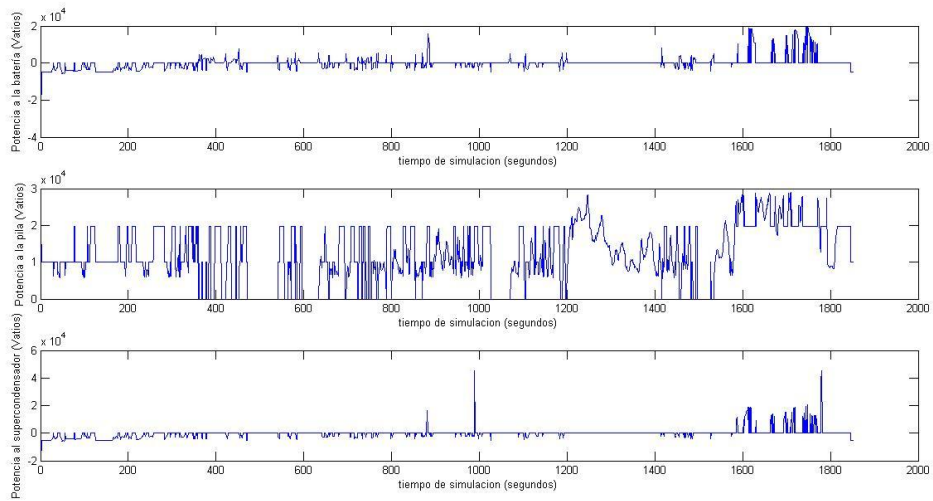


Figura 35 Potencias demandadas a la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con WLTP class3 para control heurístico con tres fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

Vemos como la pila trabaja a su máximo rendimiento casi todo el ciclo, excepto en algunas partes debido a que la batería está muy cargada y la pila se para totalmente para que la batería descargue, que era el otro caso límite para el que estaba preparado el control, esto es debido a que las potencias que se demandan son muy bajas, lo que provoca que la pila cargue tanto la batería como el supercondensador y éstos apenas tengan que ceder potencia. De la gráfica de los estados de carga, podemos ver que el control no es nada bueno para este ciclo aunque pueda realizarlo con facilidad, pero la batería esta casi todo el tiempo cargada al igual que el condensador por lo que habría que bajar el rango de funcionamiento de la pila para un control un poco más óptimo y por supuesto más adecuado para este ciclo.

El último ciclo para el que se ha ejecutado el modelo de tres fuentes de potencia con el control heurístico es para el ArtUrban, a diferencia de para el de dos fuentes de potencia, en este caso la batería nunca llega a llenarse completamente, ya que hay parte de la potencia que se destina al supercondensador, lo que da un resultado parecido al del ciclo anterior, tanto la batería como el supercondensador casi todo el tiempo muy cargados, lo que lleva a la misma conclusión que anteriormente, que no es un buen control para este ciclo debido al alto rango de trabajo de la pila de combustible y a que ésta hay momentos en los que tiene que parar totalmente para que la batería descargue.

Los estados de carga de las tres fuentes han sido:

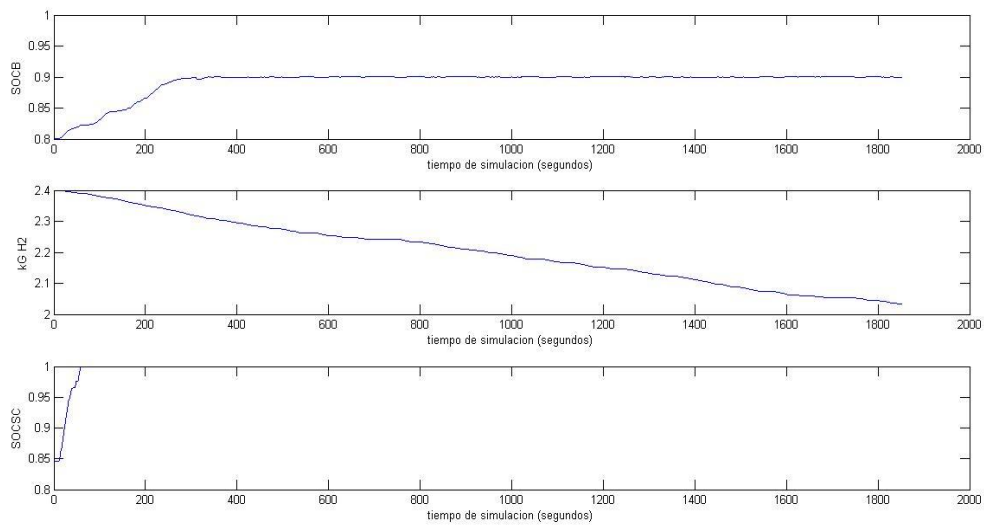


Figura 36 Estado de carga de la batería, pila y supercondensador frente al tiempo, con Art Urban para control heurístico con tres fuentes de potencia.

Fuente: Simulink

Éstos han sido todos los experimentos realizados para el control heurístico y todos los datos extraídos del mismo.

4.2. Control óptimo

El motivo prioritario por el que se desarrolla el control óptimo es la necesidad de realizar un control mucho más robusto que el heurístico capaz de minimizar mediante la distribución de la potencia el consumo de combustible final. Cuando se refiere a final, es que no se controla con la idea de minimizar punto a punto, sino con la idea de minimizar el consumo total global.

Quando se habla de control óptimo se tiende a pensar que ese control es el mejor, que es insuperable, sin embargo realmente es algo más subjetivo ya que un control puede ser óptimo en consumo de combustible pero podría ser muy malo en otro tipo de especificaciones. Así en término de control se dice que un control es óptimo si minimiza una función de coste en la que se incluyen los parámetros que se pretendan minimizar así como las restricciones que nos aparezcan.

Para mejorar el consumo de combustible de un vehículo cualquiera, la función de costo podría venir definida por la cantidad de masa de combustible consumida a lo largo del tiempo en función del poder calorífico y de la variable de control u . También se podrían incluir por supuesto en esta función de costo la cantidad de contaminante que se emite, aunque en la práctica esto no se tiene en cuenta.

Como es de esperar, el modo que minimiza el consumo es el puramente eléctrico, pero si el frenado regenerativo no es suficiente como para cargar la batería, al final del ciclo nos podemos encontrar con la batería totalmente descargada.

La no descarga de la batería suele ser requerida en procesos de certificación, en los que solo se permiten pequeñas variaciones del estado de carga de la misma, por lo que a veces

hay que poner restricciones en el costo de la función como esta, y finalmente no solo se intenta optimizar el consumo, sino un conjunto de variables que forman una función. Esta restricción del estado de carga puede ser de dos clases, restricción blanda en la que el estado de carga de la batería al final del ciclo pueda tener ligeras desviaciones del inicial, o restricción dura, en la que el estado de carga final de la batería debe ser exactamente el mismo que tenía al inicio del ciclo.

4.2.1. Control equivalent consumption minimization strategy (ECMS)

Primeramente se explicará este control para dos fuentes de potencia y posteriormente se explicará las variaciones realizadas para aplicarlos a tres fuentes diferentes.

El control ECMS es una estrategia de control para la distribución de flujos de potencia en un vehículo y está basada en el concepto de consumo de combustible equivalente.

Tanto la pila como la batería son las que contribuyen para abastecer la potencia que se está demandando, y así el flujo de potencia viene dado por la ecuación:

$$P_{DC}(t) = P_{FC} + P_B(t)$$

Donde P_{FC} es la potencia que produce la pila de combustible y P_b es la potencia que produce la batería. Los flujos de potencia quedan definidos como positivos cuando provienen de la batería o de la pila, y como negativos cuando entran, es decir se considera negativo cuando carga a la batería.

La variable de control será el factor de distribución de la potencia u que viene definido como $u(t)=P_B(t)/P_{DC}(t)$. Por lo tanto si $u=0$, significará que toda la potencia proviene de la pila de combustible y si $u=1$ que toda la potencia proviene de la batería en caso de ser positiva o que toda la potencia va hacia la batería en caso de ser negativa. Es decir que u no es más que un valor en tanto por uno de cuanta cantidad le corresponde de la potencia global a la batería.

Idealmente lo que se pretende optimizar es el consumo de hidrógeno dado en la misión. Es decir hay que minimizar la potencia que nos da el hidrógeno por el tiempo, y en términos discretos sería el sumatorio de todas las potencias en cada instante por el incremento del tiempo entre unas y otras.

Este método nos crea el principal problema con el criterio de minimización global de que para realizarlo el plan de conducción tiene que ser conocido a priori, por lo que en tiempo real no puede ser fácil implementar éste método.

Este problema se puede solucionar utilizando ECMS, una aplicación que se desarrollo inicialmente para vehículo híbridos paralelos. ECMS propone reemplazar el mínimo global por uno local, lo cual reduce el problema a minimizar el consumo de combustible equivalente en cada instante. Así para cada tiempo t con un incremento de tiempo Δt , el control encuentra el valor de la variable de control $u(t)$ que minimiza la función de costo que se define a continuación:

$$J(t) = P_{H_2}(t) + s(t) * P_e(t)$$

Donde t significa t_k puesto que son valores discretos, pero se ha omitido la k igual que se hará por simplicidad en el resto de las ecuaciones. Las cantidades $P_{H_2}(t)$ y $P_e(t)$ son el flujo

de potencia hacia la pila de combustible y el flujo de potencia hacia o proveniente de la energía reversible almacenada en el intervalo de tiempo Δt . El factor $s(t)$ que aparece en la ecuación se le denomina factor equivalente, es el parámetro en el que se basa el control ECMS y se usa para facilitar la conversión del flujo de potencia eléctrico en un flujo de potencia químico, teniendo en cuenta los rendimientos de cada uno de los elementos.

Los problemas de la minimización global y minimización local no son iguales, ya que el mínimo local se usa para hacer frente a problemas de control en tiempo real donde pueden ser relativamente fáciles de implementar, sin embargo los problemas de minimización global son no causales y por tanto no son realizables tan fácilmente en tiempo real.

El cálculo del factor $s(t)$ represente la tarea más importante y sobre la que se basa todo el control ECMS, puesto que influye mucho en el comportamiento del sistema dependiendo del parámetro que se elija. Si se elige un valor de $s(t)$ demasiado grande el uso de la energía proveniente del almacenamiento reversible será penalizada y el consumo de combustible se verá aumentado. Si el valor elegido es demasiado pequeño la energía reversible se verá favorecida al consumo de la misma y los elementos que la almacenan podrían vaciarse. Con todo esto, el valor de $s(t)$ se calculará a partir de dos valores constantes de factores equivalente s_{dis} y s_{chg} , y cuyo objetivo es evaluar el combustible equivalente de la energía reversible positiva y negativa usada al final del ciclo de conducción. Con estos dos parámetros y con la adición de una probabilidad $p(t)$ calcularemos el factor equivalente $s(t)$.

El problema que se presenta a continuación es como calcular esa probabilidad y como calcular los factores equivalentes constantes.

Para calcular los factores equivalentes, el procedimiento requiere de la ejecución del modelo para varios valores constantes de la variable de control, tarea para la que se propone aumentar el rango de capacidad de los sistemas de almacenamiento si no son muy grandes, para así poder extender el rango de la variable u . Al final de cada ejecución del ciclo los valores de energía de combustible usada que para este caso será de hidrógeno, y de energía reversible usada sobre el ciclo de conducción son guardados. Estos valores representan al final del ciclo las cantidades acumuladas de $E_{H_2}(t)$ y de $E_e(t)$.

Los valores, una vez se han guardado todos, se representan al final de todas las ejecuciones unos frente a otros, quedando una gráfica que nos da dos rectas diferenciadas con diferentes pendientes. Cada una de las pendientes representará el valor de cada uno de los dos factores equivalentes constantes. Así s_{chg} se refiere a la cantidad de energía química en julios que se necesita para almacenar un julio de energía eléctrica, s_{dis} se refiere a la cantidad de energía química en julios que se guarda cuando 1 julio de energía eléctrica es gastada. La diferencia entre los valores de los factores equivalentes constantes es resultado de las pérdidas en el camino reversible.

Con la gráfica obtenida para el cálculo de los factores equivalentes constantes, se explica el concepto de energía de combustible equivalente, que no es más que obtener para una cantidad de energía eléctrica su equivalente en energía química:

$$E_e^{eq} = s_{dis} + E f_e \quad \text{si } E f_e > 0,$$

$$E_s^{eq} = s_{chg} + Ef_e \quad \text{si } Ef_e < 0.$$

Como se puede apreciar no se tiene en cuenta el frenado regenerativo y por tanto tampoco la cantidad de energía que en él se obtiene. Dado que la energía por frenado regenerativo es constante en un ciclo, tener en cuenta el frenado regenerativo solo afectaría a la gráfica de los factores equivalentes constantes como un puro desplazamiento horizontal, por lo que los valores s_{dis} y s_{chg} no se verían afectados por ello.

Con lo que se ha comentado, se obtiene la conclusión de que la energía reversible usada al final de un ciclo de conducción puede ser convertida a energía de combustible equivalente mediante los factores equivalentes constantes.

Los valores de los factores son característicos de una condiciones de conducción por lo que existirán diferentes valores para diferentes ciclos.

Una vez que ambos parámetros son conocidos para todo el tiempo, se usarán para calcular el factor equivalente global $s(t)$ para convertir la cantidad $E_e(t)$ en energía de combustible equivalente. Como el uso de s_{dis} y s_{chg} depende del signo de E_f , cuyo valor no es conocido a priori puesto que es control en tiempo real y los valores futuros de $E_e(t)$ no son conocidos. Así $s(t)$ no puede ser sustituida con certeza por ninguno de los dos parámetros, pero se calculará introduciendo una probabilidad estimada de que $E_e(t)$ será positivo.

$$S(t) = S_{dis} * P(t) + S_{chg} * (1 - P(t))$$

Si $p(t)=1$ significará que $s(t)=S_{dis}$ y si $p(t)=0$ significará que $s(t)=S_{chg}$. El problema de calcular $s(t)$ pasa a ser el del cálculo de $p(t)$. Para calcular la probabilidad se definirá un tiempo horizonte t_h . Se realizará un balance de energía requerida (incluyendo fases de tracción y regenerativa que corresponden a la energía típica media demandada sobre el tiempo horizonte) y una cantidad correspondiente de la energía máxima eléctrica disponible proveniente de la pila de combustible (que corresponde a la energía de pila si funcionara a máxima potencia durante todo el tiempo horizonte). Con todo esto la probabilidad se calculará:

$$P(t) = \frac{E_s(t) + E_{DC}^h}{E_{FC}^h}$$

Para una pila la potencia máxima que es capaz de dar (P_{FC}^{max}) es conocida. La potencia media típica demandada P_{DC}^{avg} puede ser fácilmente calculada. Con las potencias la energía se calculará, $E_{DC}^h = t_h * P_{DC}^{avg}$ y $E_{FC}^h = t_h * P_{FC}^{max}$. Con estas igualdades, la ecuación puede ser reescrita como sigue:

$$P(t) = \frac{E_s(t)}{t_h * P_{FC}^{max}} + \frac{P_{DC}^{avg}}{P_{FC}^{max}}$$

La variable $E_e(t)$ proporciona una retroalimentación del estado de carga de la batería, es la integral de tiempo de la potencia de la batería y con ello se describe la desviación del estado de carga desde el valor inicial.

La elección del tiempo horizonte dependerá del control que se quiera tener sobre estado de carga de la batería y de la capacidad de la misma. El tiempo horizonte será más largo cuando mayores sean las desviaciones permitidas respecto al estado de carga de la batería y cuanto mayor tiempo se tenga para corregir esas desviaciones.

4.2.2. Implementación del control ECMS

La implementación del código ECMS para dos fuentes de potencia se ha variado ligeramente con respecto a lo que se ha explicado anteriormente. En primer lugar hay que calcular la potencia máxima que la pila es capaz de dar, que para este caso se ha tomado como 54500 vatios, un dato que se ha calculado a partir de las curvas dadas por el fabricante de la pila, y posteriormente hay que calcular también antes de iniciar la simulación del ciclo con este control, la potencia media del ciclo.

La potencia media del ciclo lleva a otro problema u otro parámetro a elegir, es el tiempo horizonte al que vamos a referir la potencia media. Como no se quisiera tener grandes variaciones en el estado de carga de la batería no se tendrá en cuenta un tiempo horizonte igual a todo el ciclo, es decir igual a 1800 segundos, por tanto el tiempo horizonte será más pequeño y para este caso en concreto será 360 segundos.

Una vez que se ha elegido el tiempo horizonte hay que calcular las potencias medias del ciclo para cada intervalo que se va a tener en cuenta. Por tanto hay que simular en primer lugar el ciclo pero obteniendo las potencias medias para los intervalos de 360 segundos de duración entre 0 y 1800 segundos.

Los dos últimos datos a calcular de manera offline son las de carga y las de descarga de la batería. Estos dos datos se van a calcular como se desarrollo anteriormente en la explicación del control ECMS. Se creará un modelo global del vehículo en el que la distribución de potencia para la pila y para la batería, o en su defecto para la pila y para el supercondensador no será más que un parámetro de control u que variará su valor entre menos uno y uno, siendo un porcentaje en tanto por uno de la cantidad de potencia que le corresponderá a la batería o al supercondensador en cada caso. El valor del parámetro de control se irá variando para cada simulación completa del ciclo, y la cantidad de potencia demandada a la pila y la demandada o cedida a la batería (o supercondensador) total acumuladas de todo el ciclo se irán almacenando. Este método nos proporcionará finalmente un valor de energía total de la pila E^f y un valor de energía total de la batería (o supercondensador) E_e^f para cada valor de u diferente. Esto se ha realizado con el siguiente modelo:

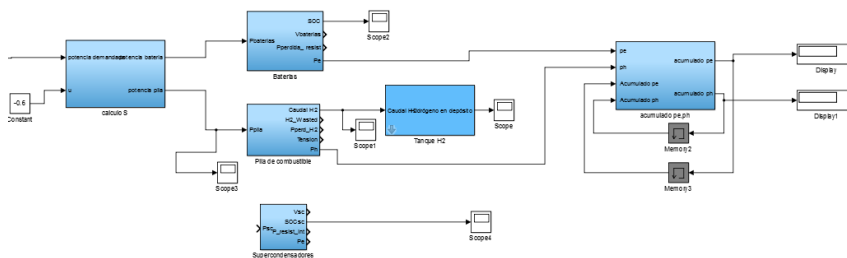


Figura 37 Modelo usado para calcular los factores equivalentes constantes.

Fuente: simulink

Donde se puede apreciar todo lo que se ha explicado. Una vez se hayan obtenido todos los valores quedan las siguientes gráficas tanto para la batería como para el supercondensador:

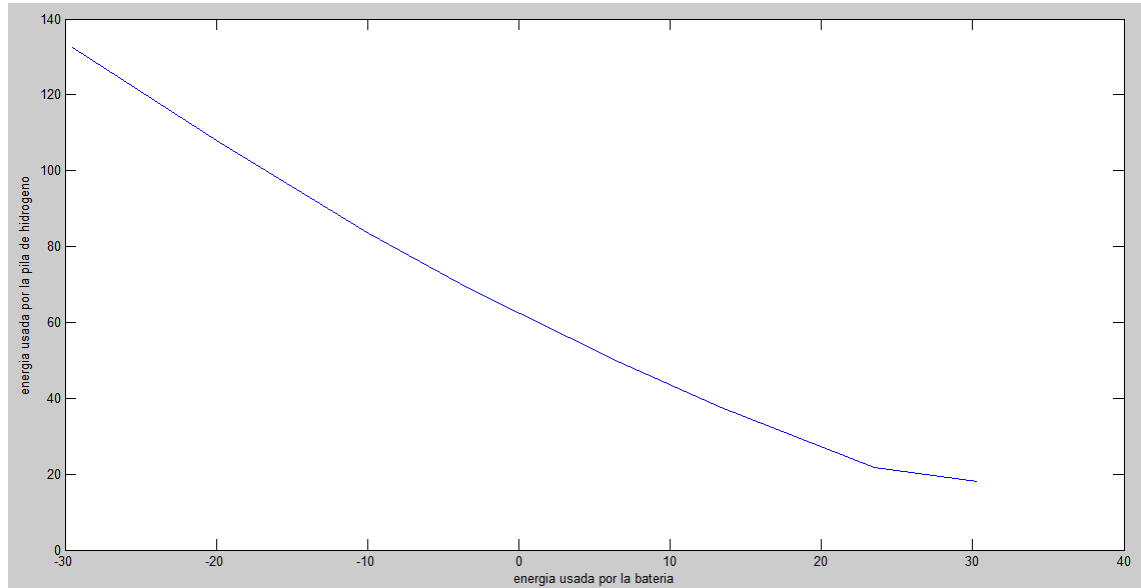


Figura 38 Curva obtenida para la batería de los factores equivalentes constantes.

Fuente: simulink

Se pueden apreciar en ambas figuras como se pueden distinguir dos rectas con diferentes pendientes que se cortan aproximadamente en cero. Las pendientes de estas gráficas nos darán los factores equivalentes constantes de carga y de descarga para la batería y para el supercondensador, así la pendiente de la recta que nos queda a la izquierda de la imagen para potencias negativas del camino reversible será el factor equivalente constante de descarga y la pendiente de la la otra recta, la que nos queda a la derecha de la imagen será la de carga.

Una vez se han calculado todos los parámetros necesarios se va a explicar el código realizado para ejecutar el control.

Explicación script distribucionECMS2

El primer paso que se ha realizado es la división en los intervalos correspondientes y la actualización del valor de la potencia media en función del tiempo de simulación.

Tras esto se ponen dos condiciones antes de iniciar el bucle de optimización, la primera es si las potencias son positivas se realizará el bucle y si el estado de carga de la batería

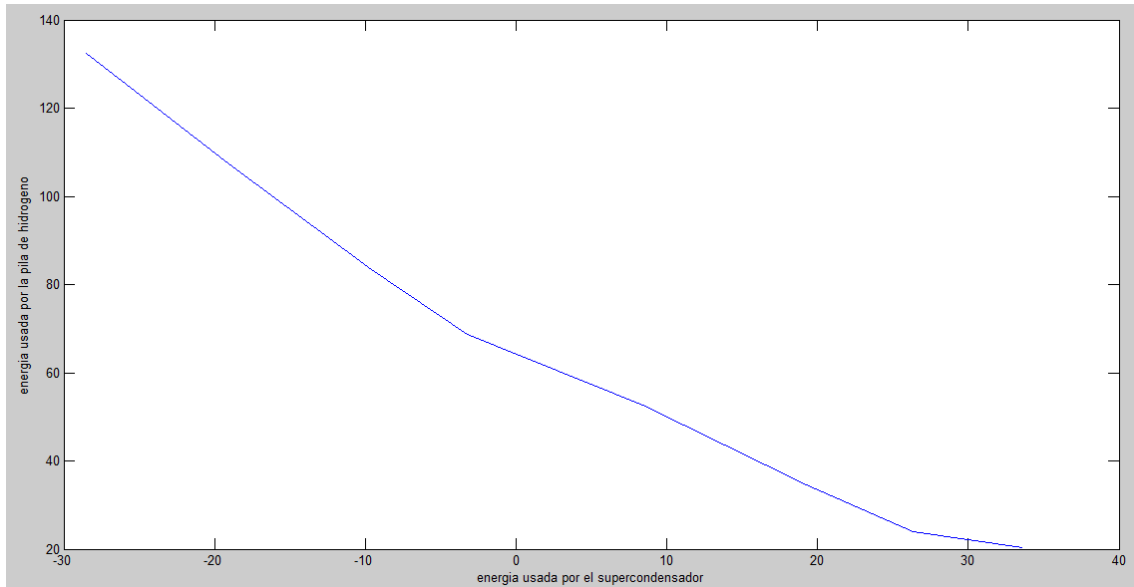


Figura 39 Curva obtenida para el supercondensador de los factores equivalentes constantes.

Fuente: simulink

mayor de 0.03 igualmente se realizará el bucle, si el estado de carga es menor la batería no dará ningún tipo de potencia, será la pila quien suministre toda la potencia.

El bucle de control se ha realizado con un bucle for, en el que se irá variando la variable de control u con un intervalo de 0 a 1 en incrementos de 0.02. En cada iteración del bucle se calculará la potencia que se le demandará tanto a la pila como a la batería, y la variable E_e como la suma de la potencia acumulada que se la ha demandado a la batería, la actual demanda y la variación de la energía cinética debido al cambio de velocidad. Este último parámetro es debido a que la energía cinética es otra forma más de acumulación de energía y por tanto debemos tenerla en cuenta a la hora del cálculo de E_e . Las velocidades que se demandan del ciclo y la masa del vehículo provocan una cantidad de energía suficientemente grande como para no poder despreciarla y por tanto es necesario tenerla en cuenta a la hora de calcular el parámetro de la energía reconvertible.

$$E_e = ac + (pb + 0.5 * m * (velant^2 - velact^2))$$

Tras el cálculo de E_e es necesario calcular la probabilidad de que la batería descargue, la probabilidad se obtendrá con la fórmula que se puso en el apartado del control ECMS, y con la probabilidad se calculará el factor equivalente como una proporción en función de la probabilidad y de los factores equivalentes constantes:

$$Prob = \frac{E_e}{t_h * 56000} + \frac{P_{DC}^{avg}}{56000}$$

$$s = s_{dis} * prob + s_{chg} * (1 - Prob)$$

Una vez que se tiene el factor equivalente es necesario calcular el rendimiento de la pila, para ello se hará una interpolación con las gráficas de la pila dadas por el fabricante, y obtendremos el rendimiento futuro que tendría la pila si se le demandara esa cantidad de potencia. Esto es lo que se conoce como un control basado en el modelo, es decir aplicando el modelo de la pila en el control se podrá obtener el rendimiento de la pila que tendría para esas características de funcionamiento, a la hora de implementar en la realidad y no en una simulación, este rendimiento variará ligeramente del real de la pila, mientras que en la simulación se puede obtener exactamente el máximo rendimiento, ya que es aplicar el modelo de la pila para controlar el propio modelo.

Por último dentro del bucle se obtendrá el valor del coste de la función J, que para este caso es:

$$J = \frac{pp}{rp} + sb * pb$$

Si el coste es menor que un coste calculado para otra distribución diferente calculada dentro del bucle, se actualizará el valor de la variable de control y se almacenará, así cuando el bucle se haya ejecutado todas las veces necesarias para distintos valores de u, al final tendremos almacenado el valor de u que minimiza en cada tiempo de muestreo el coste de la función, y por tanto se podrá minimizar el consumo.

Al finalizar el bucle de optimización, hay que actualizar los valores de las salidas y por último si la potencia que se demanda es negativa, toda se demandará a la batería, y por tanto los valores de salidas serán diferentes.

Para explicar un poco mejor que es lo que hace el control, que es calcular el coste de la función para cada valor de la variable de control, es decir el control crea en cada tiempo de muestreo una gráfica como las que se muestran a continuación:

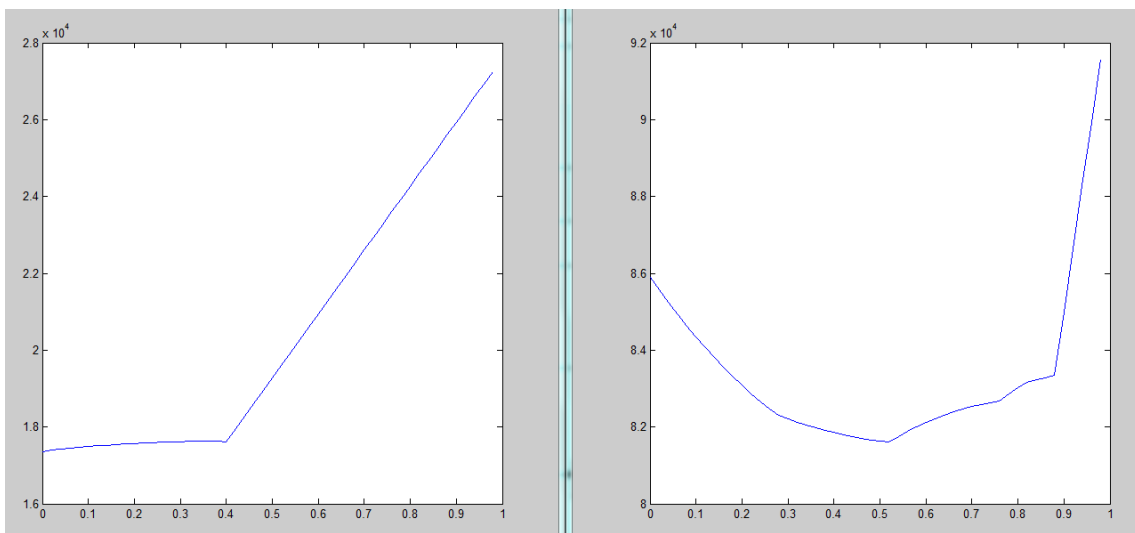


Figura 40 Ejemplo de lo que realiza el controlador.

Fuente: simulink

Que es la variación del coste de la función J en función de la variable de control u , en la figura se puede apreciar para dos instantes de tiempo diferentes, en el primero de ellos el control tomará el valor de la variable de control como 0, es decir toda la potencia se le demandará a la pila, y en el de la derecha, el control tomará una valor de la variable de control en torno a 0.5, que son los valores que hacen mínima la función de coste en cada instante de tiempo.

Con toda esta explicación del código de control las variables de entradas necesarias son, potencias demandadas, s de carga y de descarga de la batería, velocidad tanto actual como anterior para poder calcular la variación de la energía cinética, el tiempo de simulación ya que será necesario para tomar una potencia media u otra, la energía total acumulada demandada al camino reversible (E_e) y el estado de carga de la batería por si en caso de ser muy bajo no demandarle potencia a la batería, se podría realizar el control óptimo poniendo una variable a la hora de calcular el coste de la función que penalizara la variación del estado de carga de la batería, pero eso podría llevarnos a un control no demasiado óptimo y por eso no se ha tenido en cuenta esa opción. Como salidas se tienen la potencia que se demandará tanto a la batería como a la pila, la velocidad actual para realimentarla y tenerla en cuenta en el siguiente tiempo de muestreo, y por último la E_e acumulada.

Para el control ECMS con tres fuentes de potencia se ha seguido la misma dinámica que para el de dos fuentes, con algunos cambios para una buena adaptación para las tres fuentes.

La potencia máxima de la pila, las potencias medias así como el tiempo horizonte que se tendrán en cuenta serán los mismos que para dos fuentes de potencia.

Las s de carga y de descarga se calcularán de nuevo de la misma forma que antes, pero en este caso habrá que calcular una s de carga y una s de descarga para la batería y otra para el supercondensador, de forma que tendremos la relación de energías entre supercondensador con la pila y la relación de la batería con la pila, que se usará, para calcular el coste final de la función.

La idea principal que se va a seguir en este control es minimizar el coste de la función para cada tiempo de muestreo en función de los estados de carga. Así si nos quedamos sin carga o con muy poca carga en la batería por ejemplo, el control solo tendrá en cuenta el supercondensador y la pila, y realizará el algoritmo de optimización como si solo tuviéramos dos fuentes de potencia. Esto puede ocurrir porque para el control óptimo no se ha tenido en cuenta ninguna restricción de variación de estado de carga podría darse el problema de que alguna de las fuentes que se tienen pudiera quedarse sin carga. Este problema se puede solucionar añadiendo un término al coste de la función que penalizará la variación del estado de carga de la batería y del supercondensador para provocar así una desviación más pequeña y que no se queden sin carga. Pero el objetivo de esta simulación va a ser minimizar el máximo el consumo y por tanto no se ha tenido en cuenta ningún tipo de restricción.

Explicación script distribucionECMS3

En primer lugar el código diferencia entre si las potencias son positivas o negativas, en caso de ser positivas a su vez distingue cuatro casos, si tanto la batería como el supercondensador están por encima del siete por ciento de carga, si alguno de los dos está por debajo de esa carga y el otro no o si ambos están por debajo de esa carga.

Si ambas fuentes están por encima del siete por ciento de carga, se ejecutarán dos bucles de variables de control, lo cuales irán desde cero hasta uno, de forma que para cada iteración del bucle la potencia que se demande a la batería, supercondensador y pila irán variando en función del valor de estas variables de control. También se calculará en cada iteración la variable E_e , como la suma de la potencia acumulada por el camino reversible, la potencia demandada en este instante a la batería al supercondensador y la variación de la energía cinética provocada por la variación de la velocidad, la probabilidad y por último el factor equivalente tanto para la batería como para el supercondensador como sigue:

$$E_e = ac + (pb + pc + 0.5 * m * (velant^2 - velact^2))$$

$$Prob = \frac{E_e}{t_h * 56000} + \frac{P_{DC}^{avg}}{56000}$$

$$sb = S_{disc} * prob + S_{chgb} * (1 - prob)$$

$$sc = S_{disc} * prob + S_{chgc} * (1 - prob)$$

Tras esto, se calculará el rendimiento de la pila a partir de las gráficas del fabricante, realizando así, un control basado en el modelo.

Con todo esto se calculará el coste de la función como:

$$J = \frac{pp}{rp} + sb * pb + sc * pc$$

Al final se almacenarán para todas las iteraciones de los dos bucles, los valores de las variables de control que minimicen el coste de la función para cada tiempo de muestreo.

Para los casos en los que alguna de las dos fuentes de energía reversible esté por debajo del siete por ciento de carga, se realizarán las mismas operaciones que en el control ECMS para dos fuentes de potencia, de forma que no se tendrá en cuenta la fuente que esté tan descargada, y se buscará el mínimo, utilizando un solo bucle, para optimizar el consumo de combustible.

Para el cuarto caso de potencias positivas en el que ambas fuentes de potencia reversible estén muy descargadas, toda la potencia le será demandada a la pila de combustible.

Por último, cuando las potencias sean negativas, se realizará un bucle de control en el que solo se tendrán en cuenta la batería y el supercondensador, ya que son las dos únicas fuentes que pueden ser cargadas, y por tanto se realizará una optimización para nuevamente realizar con la potencia lo más óptimo que se pueda.

Finalmente con todo lo explicado quedan como entradas al bloque de control, la potencia demandada, las s de carga y descarga tanto de la batería como del supercondensador, la velocidad actual y la velocidad anterior del vehículo, la tensión de la pila, la cantidad de energía demandada al camino reversible acumulada, los estados de carga de batería y supercondensador, y el tiempo de simulación, necesario para saber cuál es la potencia media que se debe de aplicar. Las salidas serán la potencia demandada a la pila, la potencia demandada o cedida a la batería y al supercondensador y la velocidad actual para

poder realimentarla y poder calcular en el siguiente tiempo de muestreo la variación de la energía cinética.

4.2.3. Experimentos realizados con el control ECMS

Lo primero que se ha experimentado para el control ECMS con dos fuentes de potencia, es como afecta la variación de los factores equivalentes constantes a la hora del consumo y como afecta a la hora de consumir de una fuente o consumir de otra. Además todos los experimentos se han realizado con un tiempo de 1800 segundos, y con el ciclo ArtMw130 y la inclinación de VAIL2NREL, además el estado inicial de batería será 0.8 y el de la pila de combustible de 2.4 kilogramos, en las simulaciones que no lleven estas características se especificará claramente. La idea principal es obtener un resultado cualitativo de cómo de importante es la elección de dichos parámetros, cuanta importancia tienen, y cuánto afectan al consumo y al control.

Por tanto se han realizados varios experimentos con las mismas características únicamente cambiando la s de carga y las de descarga de la batería. Los resultados finales obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

	Schg=1.8 Sdis=1.9	Schg=1.8 Sdis=2.1	Schg=1.8 Sdis=2.4	Schg=2 Sdis=2.1	Schg=2 Sdis=2.4	Schg=2.2 Sdis=2.2	Schg=2.4 Sdis=2.4
Socb	0.025	0.39	0.644	0.596	0.767	0.814	0.866
Kg de H2	1.71	1.65	1.6	1.606	1.565	1.552	1.5365
Consumo (MJ)	34.04	34.34	34.92	34.71	35.34	35.53	35.84

Tabla 4 Resultados del control ECMS con dos fuentes de potencia para diferentes factores equivalente constantes.

De las tres primeras simulaciones se puede concluir que para que para una misma s de carga el aumento de la s de descarga hace que el consumo de la batería sea menor, ya que aumenta el valor de las final y por tanto aumenta coste del consumo de la batería, esto provoca mayor demanda de potencia hacia la pila haciéndola salir de los rangos de mayores rendimientos y por tanto aumentando el consumo. También se puede concluir de la tabla que para un mismo valor de s de carga, cuanta más diferencia haya con las de descarga mayor será el aumento del consumo. La idea principal es que cuanta más cantidad de potencia se demande de la batería menor será el consumo. Se podría pensar viendo la tabla al disminuir las de carga y las de descarga mucho, provocaría que se demandara mucha potencia a la batería y disminuiría el consumo, esto no es cierto, ya que al disminuir demasiado los factores equivalentes constantes, la carga de la batería no duraría todo el ciclo y por tanto la pila debería de funciona sola, por tanto aumentaría mucho el consumo en los tiempos en los que la pila funcionara sola y sin ayuda de la batería, por ejemplo para sdis=1.7 y schg=1.5 resulta un consumo de 35.37 megajulios. El objetivo es encontrar el valor adecuado que haga que la pila trabaje el mayor tiempo posible al máximo rendimiento posible.

El valor obtenido por el método explicado anteriormente da para la batería una schg=1.72 y una sdis=2.42 que resulta un consumo de 34.76, por tanto no da el mejor valor de los factores equivalentes constantes como se ha podido apreciar en el estudio realizado para diferentes valores de los mismos.

Las grandes diferencias de consumo que existen entre unos valores y otros, así como las cantidades que se demandan a la batería como a la pila, pudiendo llegar la batería a descargarse completamente o a cargarse demasiado, hacen ver claramente que este tipo de control está muy influenciado por el valor elegido para estos parámetros, a los que tiene una gran sensibilidad, y que por tanto es muy importante la buena elección de los mismos si se quiere realizar un buen control óptimo.

Para los demás experimentos realizados se ha tenido en cuenta la schg de da batería de 1.8 y la sdis de 1.9, que son las que mejores resultados han dado de rendimiento, y mejores resultados han dado de consumo. Con estos factores, se han realizado al igual que para el control heurístico experimentos para valores constantes de las pendientes.

Para pendiente constante igual a 0: El consumo final obtenido es de 31.75 megajulios, lo que lo hace mas óptimo que el heurístico realizado para dos fuentes de energía que daba un consumo de 32.25.

Para pendiente constante igual a -0.073: El resultado final de consumo es de 16.97 megajulios, un valor mucho menor que el heurístico para este mismo valor de la pendiente, que daba un resultado de consumo de 21.57 megajulios.

Para pendiente constante igual a 0.03: El consumo para la pendiente de 0.03 es de 39.9 mega julios, que es menor a 40.35 que se obtuvieron para el control heurístico.

Con todos estos experimentos realizados, se puede llegar a la conclusión de que el control óptimo funciona como se quería, y que se ha conseguido minimizar los consumos obtenidos por el control heurístico.

Se va a mostrar a continuación, la variación de los estados de carga y de las potencias demandadas para el ciclo ya con una pendiente variante en el tiempo para poder ser comparados también con el control heurístico:

El estado de carga de la batería frente al tiempo y los kilogramos de hidrógeno frente al tiempo:

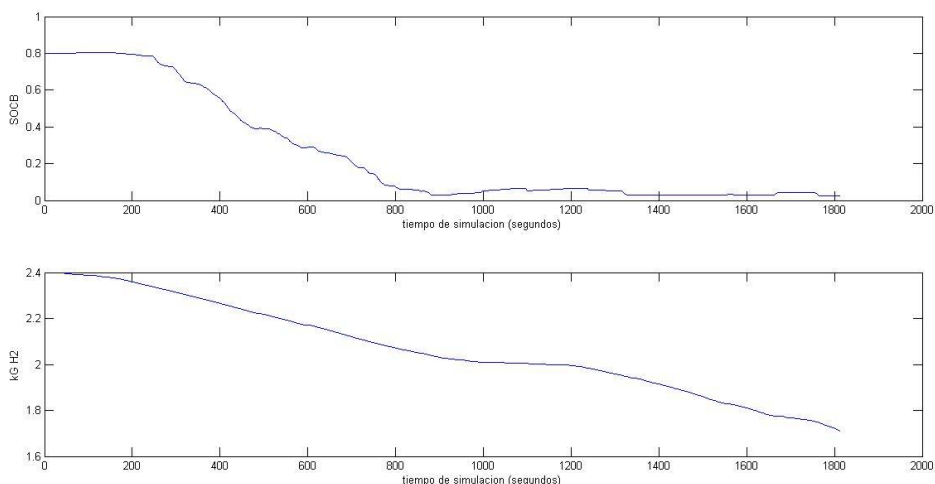


Figura 41 Estados de carga de la batería y kilogramos de hidrogeno frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia.

Fuente: simulink

Las potencias demandadas a la batería y a la pila de combustible se muestran a continuación:

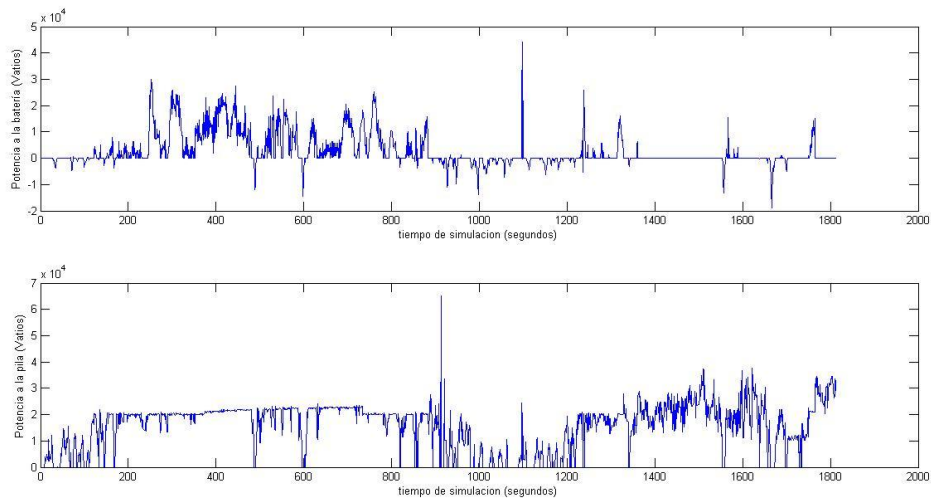


Figura 42 Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia.

Fuente: simulink

Como se puede observar la batería termina casi completamente descargada, pero habiéndose realizado un buen control que se puede apreciar en la demanda de potencias, donde se va que la pila trabaja durante largos periodos de tiempo a un régimen casi constante, que además coincide con las cantidades de potencias que maximizan el rendimiento de la pila, por tanto se ha conseguido lo que se buscaba un régimen constante de trabajo para la pila a máximo rendimiento. Esto da como resultado un consumo de 34.04 megajulios, lo que minimiza los 34.27 megajulios de consumo que tenía el control heurístico para dos fuentes de potencia.

Viendo todos los resultados obtenidos, se puede apreciar que el control óptimo realizado da bastante buenos resultados frente al control heurístico, el cual ya se diseñó para intentar minimizar el consumo del ciclo, y que por tanto el control ECMS realizado para dos fuentes de potencias funciona bastante bien.

La siguiente simulación que se ha realizado es el aumento del peso del vehículo de 500 a 1500 kilogramos, el resultado final del consumo ha sido de 52.13 megajulios un consumo superior al del control heurístico que fue de 49.77.

Las últimas simulaciones que se han experimentado son variando el ciclo de conducción. El primer ciclo con el que se ha probado ha sido ArtMw150, que fue también con el que se simuló el control heurístico, dando los siguientes resultados de variaciones de estados de carga y demandas de potencias:

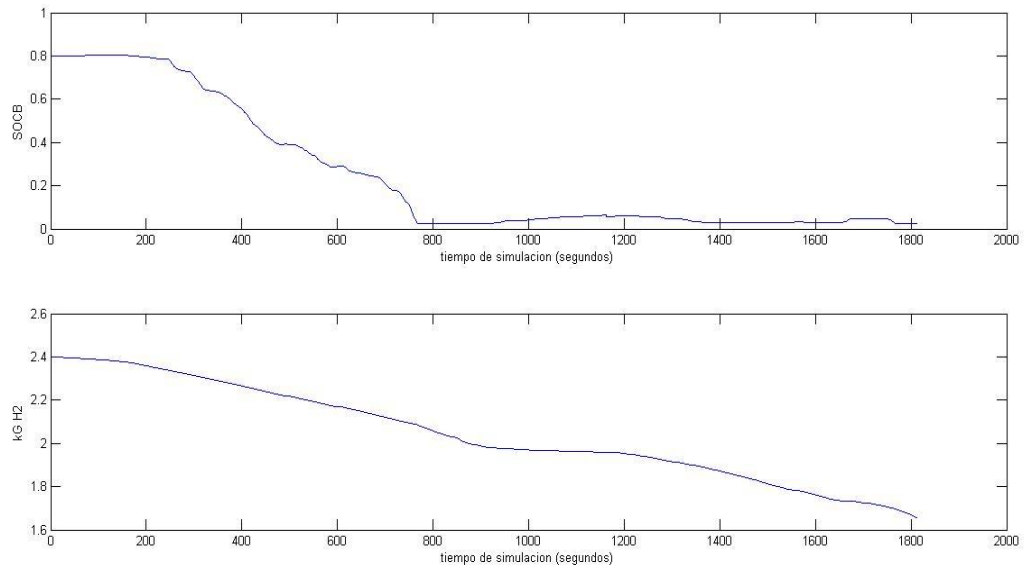


Figura 43 Estados de carga de la batería y kilogramos de hidrogeno frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.

Fuente: simulink

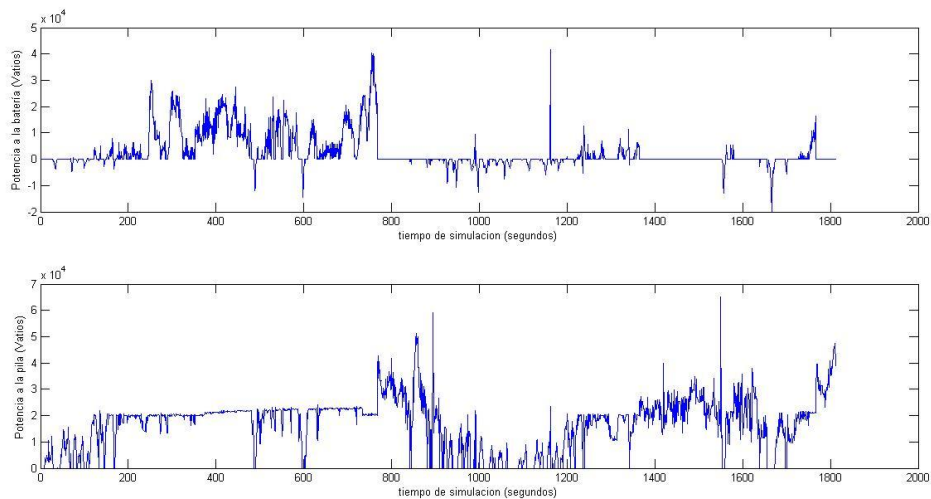


Figura 44 Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.

Fuente: simulink

El consumo global para este ciclo ha sido de 36.43 megajulios, un consumo algo mayor al que se obtuvo con el control heurístico, lo que podría provocar la conclusión de que el control óptimo no funciona muy bien.

Con respecto al ciclo ArtUrban los resultados obtenidos respecto al estado de carga de la batería, kilogramos de hidrógeno y potencias demandadas tanto a la batería como a la pila son las siguientes:

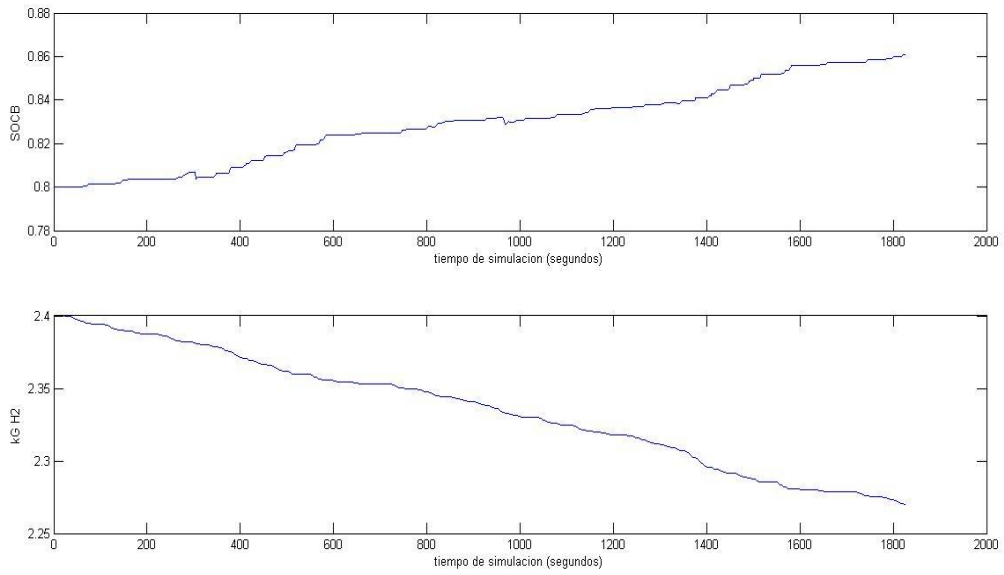


Figura 45 Estados de carga de la batería y kilogramos de hidrogeno frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.

Fuente: simulink

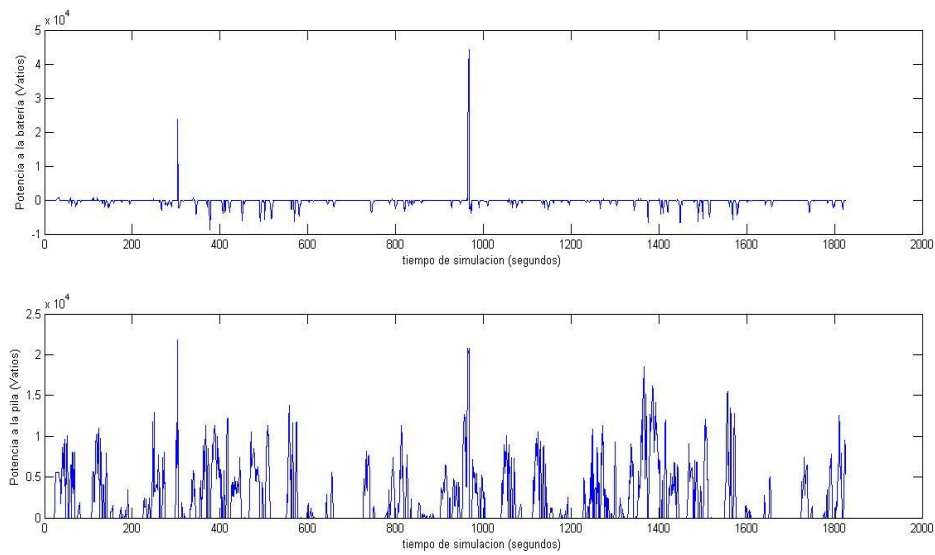


Figura 46 Potencia demandada a la batería y a la pila frente al tiempo para el control ECMS con dos fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.

Fuente: simulink

El consumo final para este ciclo ha sido 5.072 megajulios, sin embargo la batería no ha llegado a cargarse, puesto que las potencias demandadas han sido muy pequeñas y la pila no ha necesitado ayuda de la batería, por tanto el resultado es bastante bueno con respecto al control heurístico.

Finalmente como conclusión se puede obtener que el control óptimo funcione mejor que el heurístico, sobre todo cuando se realiza en el ciclo para el que se ha creado. En cuanto a la variación de ciclos, el cambio de las potencias medias así como el cambio de los factores

equivalentes constantes influyen en una buena parte, ya que los ciclos diferentes se han simulado con los mismos parámetros de potencia media y factores equivalentes constantes, y por tanto el control funciona bien pero no optimiza totalmente, además para el último ciclo simulado, los resultados han sido mejores que con el control heurístico, así el control óptimo funciona perfectamente cuando obtenemos los factores equivalentes constantes así como las potencias medias, y funciona algo peor, puesto que no optimiza todo lo que se pretende, cuando cambiamos a otros ciclos, pero siempre funcionando de alguna manera coherente, sin llegar a llenar la batería completamente por ejemplo, como pasaba con el heurístico en el ciclo ArtUrban, se podría decir que es un control más robusto.

Estos han sido todos los experimentos realizados para dos fuentes de potencia, los experimentos para tres fuentes de potencia se expondrán a continuación.

Hay que comentar que para las simulaciones con tres fuentes de potencia no se ha utilizado el modelo de la pila como tal, sino que se ha utilizado una aproximación del mismo, por lo que en lugar de realizarse una aproximación lineal entre el valor del rendimiento en función de la intensidad para un intervalo dado, puesto que las simulaciones se volvían demasiado lentas puesto que el código tenía que interpolar demasiadas veces, ya que hay dos variables de control y por tanto dos bucles, el rendimiento en cada intervalo no se ha interpolado sino que se ha tomado como constante. Esto se ha realizado utilizando el comando if de Matlab, de forma que si la intensidad, calculada como la potencia dividida por la tensión realimentada estaba en un intervalo, el rendimiento era siempre constante para ese intervalo.

Los primeros valores que hay que calcular al igual que para el control ECMS con dos fuentes de potencia, y tan importante como para ese mismo control, son los valores de factores equivalentes constantes, pero en este caso se tienen 4, ya que además de los dos de la batería se necesitan los dos del supercondensador. Tras varias pruebas variando los valores de los mismos, se llegan a conclusiones parecidas a las del control ECMS con dos fuentes de potencia, para valores demasiado pequeños de los factores del supercondensador, se demanda demasiada potencia al mismo, por lo que el supercondensador se descarga rápidamente, al igual que para valores altos apenas se demanda potencia de éste. Cuanta más cantidad de energía provenga de la batería o del supercondensador mas energía se estará ahorrando, ya que se estará evitando que la pila de combustible trabaje con rendimientos muy bajos. El objetivo es encontrar valores que provoquen que la pila trabaje la mayor parte del tiempo al mayor rendimiento posible. Partiendo de los mismo valores que ya se tenían para la batería, de 1.8 para el factor equivalente de carga y 1.9 para el de descarga se han llegado a obtener los siguientes valores:

schg de la batería: 1.88

sdis de la batería: 1.9

schg del supercondensador: 1.85

sdis del supercondensador: 2.049

Al igual que para dos fuentes de potencia, el control depende fuertemente de los valores escogidos para los factores de carga equivalente, lo que lo convierte en un control muy sensible a estos parámetros, ya que pueden provocar grandes variaciones del consumo, pero a partir de una buena elección de los mismos se pueden obtener muy buenos

resultados de optimización. Estos parámetros se han variado respecto a los obtenidos por el método de las pendientes, del cual se obtuvo una schg para el supercondensador de 1.61 y una sdis de 2.41, por lo que no es fácil de calcular.

Con estos parámetros, los resultados obtenidos para el ciclo ArtMw130 y diferentes valores constantes de la pendiente son los siguientes:

	inclinación=0 (radianes)	inclinación=-0.073 (radianes)	inclinación=0.03 (radianes)
Soc final de la batería	0.264	0.8735	0.064
Soc final del supercondensador	0.642	0.46	0
Kg de H2 final	1.73	1.993	1.565
Consumo (MJ)	31.78	16.96	40.12

Tabla 5 Resultados obtenidos para el control ECMS con tres fuentes de potencia para diferentes inclinaciones constantes.

Como se puede apreciar, los valores de consumo que se han obtenido son muy parecidos al control ECMS para dos fuentes de potencia, aunque menores que los obtenidos para el control heurístico, por lo que las variaciones de las potencias para las cuales el control estaba realizado provocan un control algo peor, que se podría conseguir con tan solo dos fuentes de potencia, pero aun así sigue realizando un control bastante bueno.

Para el ciclo ArtMw130 y la inclinación de VAIL2NREL, que son los datos con los que se han calculado los parámetros del control, tanto de potencias medias como de factores equivalentes, por lo que se obtendrá un valor de consumo más óptimo que los obtenidos hasta ahora. Los resultados obtenidos para este ciclo se muestran a continuación:

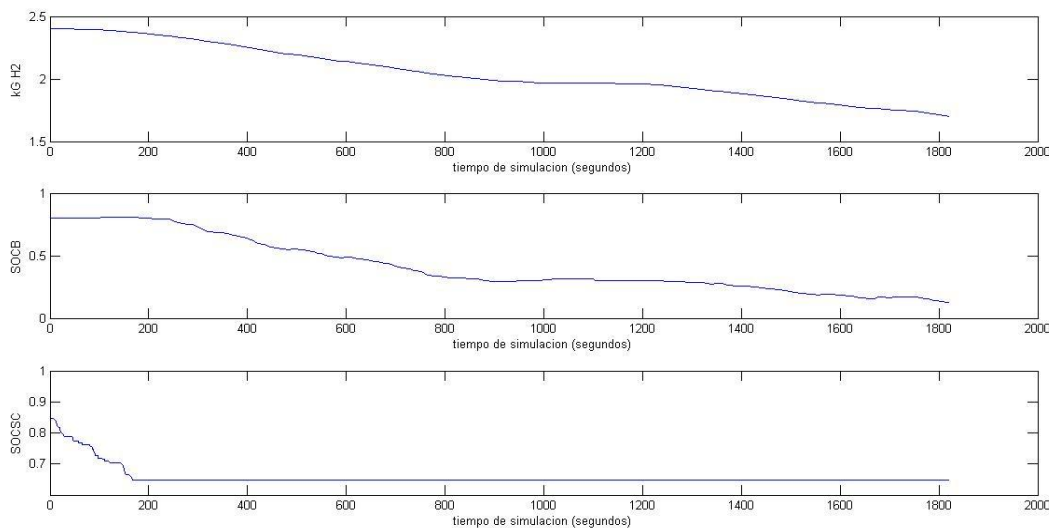


Figura 47 Estados de carga de la batería y del supercondensador y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia.

Fuente: simulink

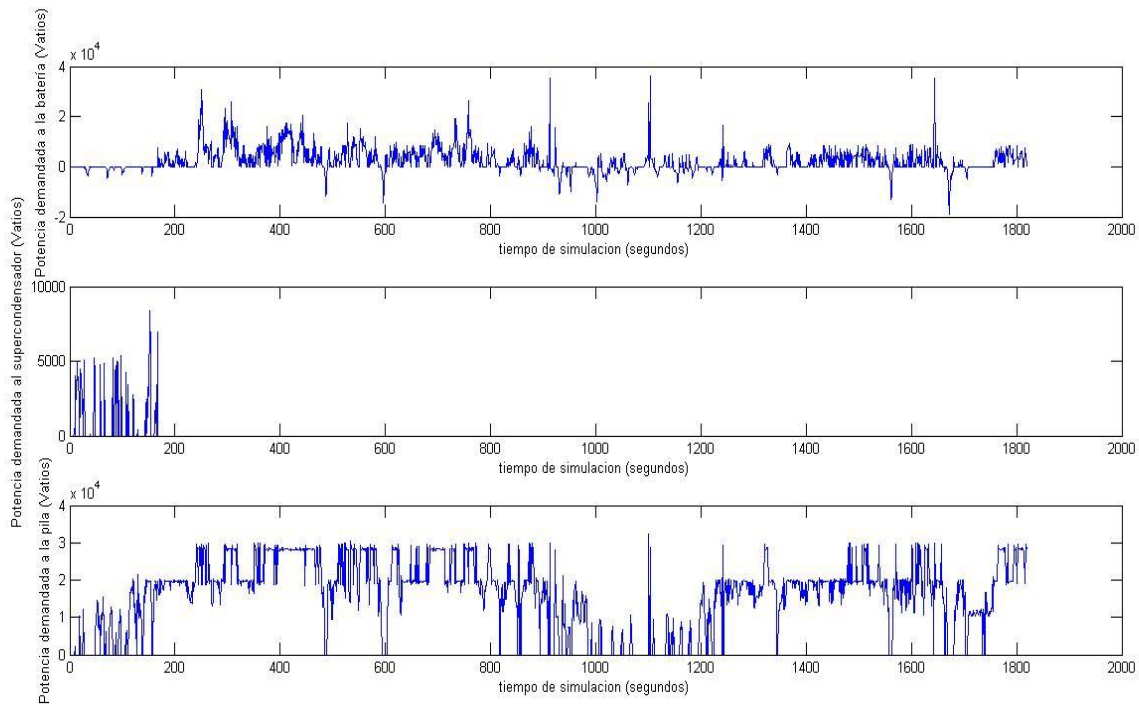


Figura 48 potencias demandadas a la batería, supercondensador y pila frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia.

Fuente: simulink

Se puede apreciar como la pila trabaja a unas potencias más o menos constantes la mayor parte del tiempo, que era lo que se pretendía realizar para conseguir el máximo rendimiento posible, y para ello se han ido buscando los valores de los factores equivalentes constantes. También se puede ver en las imágenes como el supercondensador apenas recibe demanda de potencia excepto al principio, y que hay por tanto un intervalo muy pequeño de tiempo donde las tres fuentes de potencia funcionan al mismo tiempo. Por tanto el estado de carga de la batería está constantemente decayendo, al igual que los kilogramos de hidrógeno, y se observa como el supercondensador se queda constante en un valor en torno a 0.65. Con todo ello, el consumo total del ciclo es de 33.96 megajulios, que es el menor coste conseguido para este ciclo, a pesar de que el supercondensador se utiliza muy poco, es lo suficiente como para minimizar el consumo del ciclo.

Se ha conseguido por tanto el objetivo que se pretendía, el uso de tres fuentes de potencia da mayor versatilidad al control, pudiendo usar una u otra en función de lo que más le convenga a cada tiempo, y el tener más opciones para realizarlo da como resultado una minimización del consumo para la ejecución del ciclo.

Una vez se ha comprobado que el control es capaz de optimizar el ciclo, se va a ver cómo funciona para otros ciclos, con diferentes potencias y diferentes factores equivalentes, para las simulaciones no se calcularán las nuevas potencias medias ni los nuevos factores equivalentes constantes, ya que se ha comprobado que realizando estas operaciones el control es capaz de minimizar el consumo, lo que se persigue con estas simulaciones es ver cómo funciona el control que se ha creado pero ante otras situaciones diferentes con otros perfiles de conducción.

El primero de los ciclos que se ha simulado es como en los demás casos el ArtMw150 manteniéndole la inclinación del mismo ciclo para el cual se han realizado las demás simulaciones. Los datos obtenidos de estados de carga y de potencias demandadas se muestran a continuación:

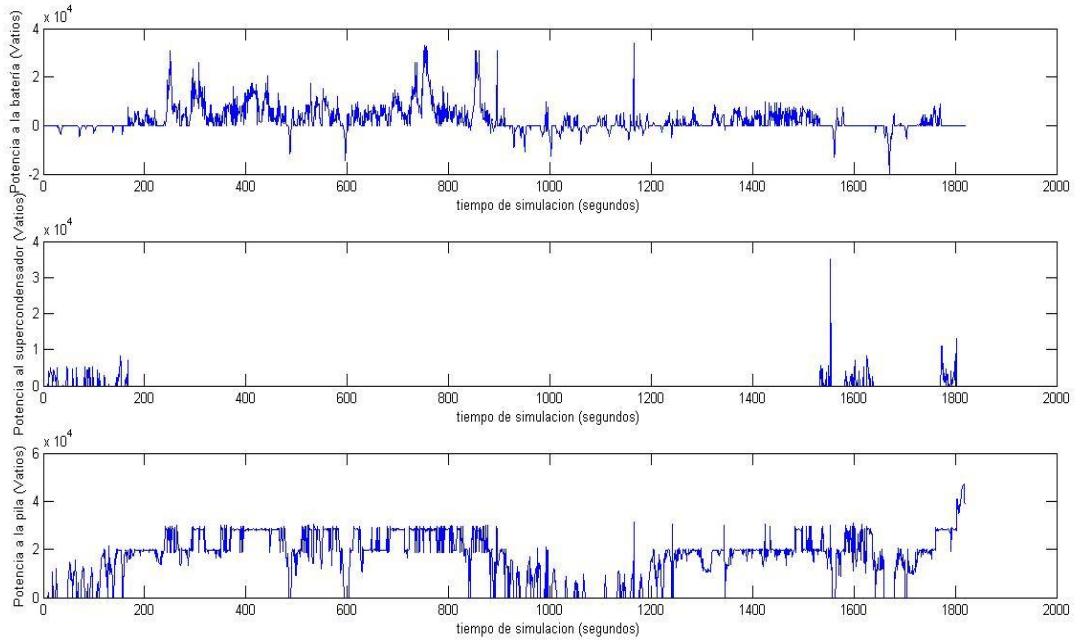


Figura 49 Potencias demandadas a la batería, supercondensador y pila frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.

Fuente: simulink

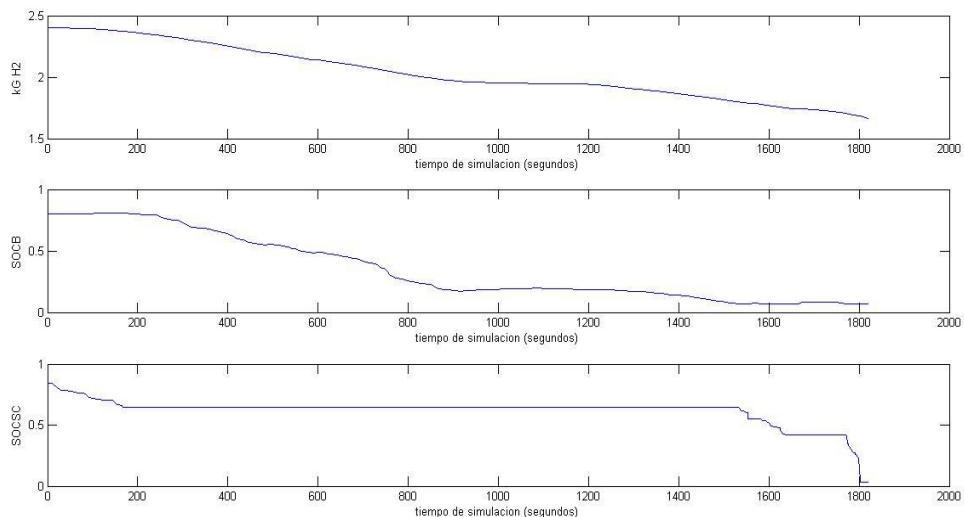


Figura 50 Estados de carga de la batería y del supercondensador y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo ArtMw150.

Fuente: simulink

El supercondensador es usado en dos zonas muy diferenciadas y llega a quedarse a cero de estado de carga, nuevamente la pila trabaja a un régimen constante de potencias con ayuda de la batería, y del supercondensador en los dos momentos que se han comentado, y llegando casi a agotarse también la batería, puesto que este nuevo ciclo demanda mas potencias que el ArtMw130.

El resultado de consumo total ha sido de 36.52 megajulios, una cantidad mayor que el control ECMS con dos fuentes de potencia, y mayor que la obtenida con el control heurístico, el cambio de los parámetros hace que el control no optimice tanto como se pretendía.

Para el ciclo WLTP class3 los resultados obtenidos son los siguientes:

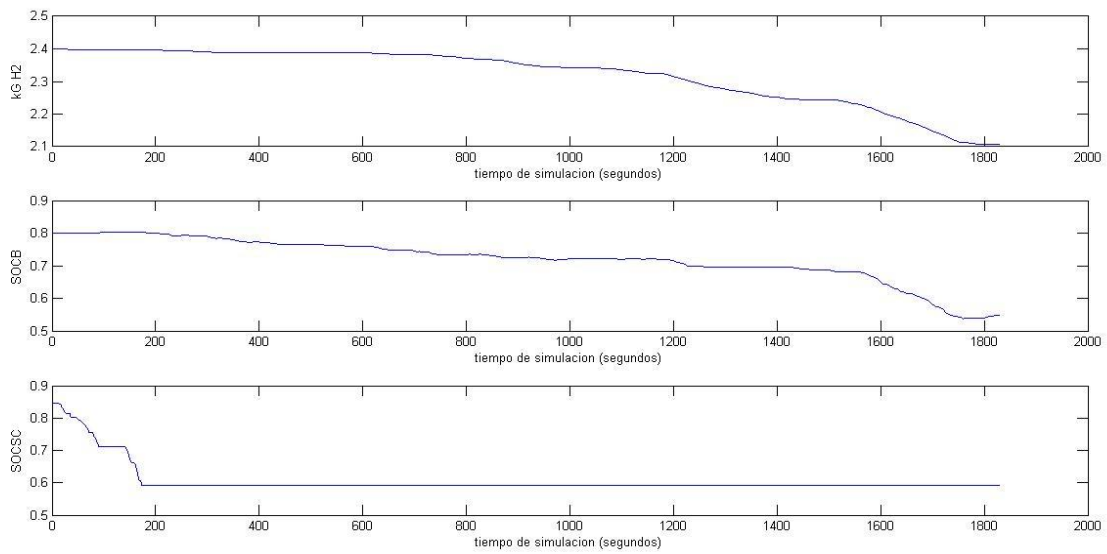


Figura 51 Estados de carga de la batería y del supercondensador y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo WLTP class3.

Fuente: simulink

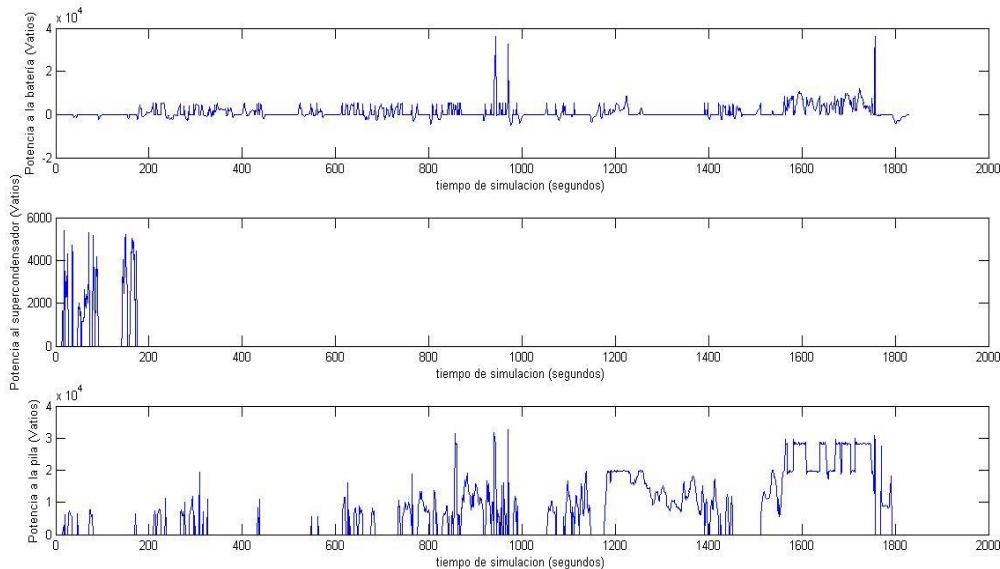


Figura 52 potencias demandadas a la batería, supercondensador y pila frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo WLTP class3.

Fuente: simulink

Con las gráficas obtenidas a la vista, el resultado final del consumo es de 14.26 megajulios, un valor mucho menor que el obtenido con el control heurístico para tres fuentes de potencia, lo que nos lleva a una conclusión de que dependiendo del ciclo, el control ECMS podría no optimizar tanto como se pretende, pero en otras ocasiones puede realizar grandes disminuciones de consumo, lo que provoca que sea un buen control, ya que si no optimiza mucho tampoco da un consumo muy grande, pero en general puede dar unas buenas optimizaciones respecto a un control heurístico.

Por último se van a mostrar los resultados de cómo se comporta este control ante el ciclo de conducción ArtUrban:

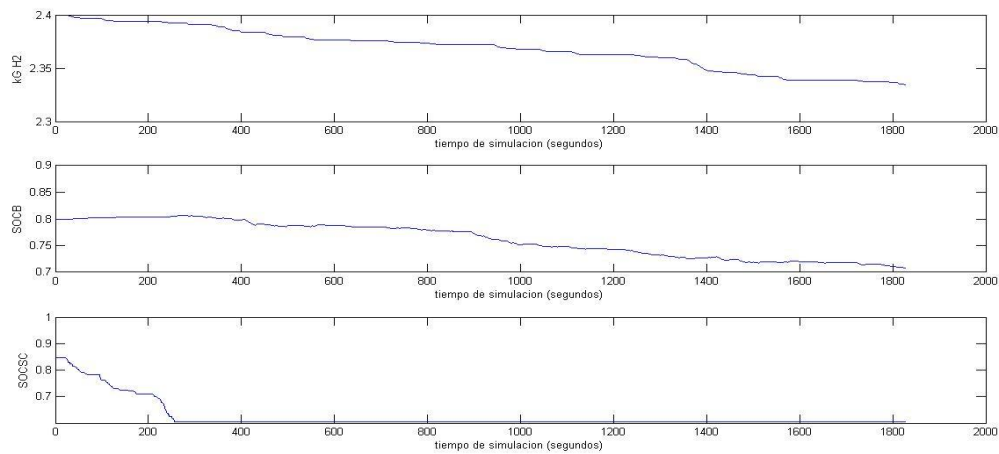


Figura 53 Estados de carga de la batería y del supercondensador y kilogramos de hidrógeno frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.

Fuente: simulink

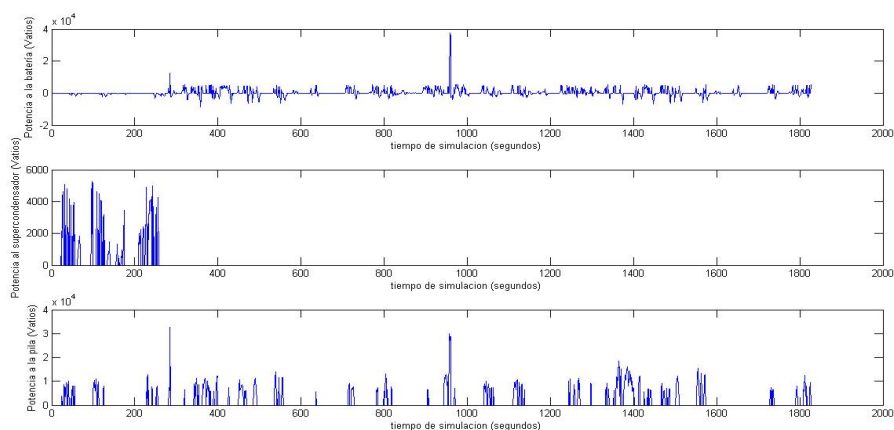


Figura 54 potencias demandadas a la batería, supercondensador y pila frente al tiempo para el control ECMS con tres fuentes de potencia para el ciclo Art Urban.

Fuente: simulink

Como en este ciclo las potencias son mucho más pequeñas que para los demás que se han simulado, el único que termina con muy poca carga es el supercondensador, mientras que la batería y la pila terminan con mucha carga. En las potencias se puede ver como toda la demanda, o gran parte de ella, era hacia el supercondensador, lo que ha provocado que acabara descargándose y que a partir de ahí, el control ha utilizado mas a la batería.

El resultado final de consumo del ciclo ha sido de 3.593 megajulios, lo que confirma aún mas lo que se ha expuesto sobre el control ECMS para tres fuentes de potencia, que la mayoría de las veces realiza un control mucho mas óptimo que el heurístico, que para este ciclo proporcionó un consumo de 5.072 megajulios.

Con este último ciclo se terminan los experimentos que se han realizado sobre el control ECMS para tres fuentes de potencia, donde se ha pretendido extraer la mayor información posible del mismo.

CAPÍTULO 5. Conclusiones

Como objetivo del trabajo se propuso realizar un modelado completo de un vehículo híbrido con tres fuentes diferentes de potencia y además realizar un control para dicho vehículo.

Usando algunos modelos más físicos y teóricos, y otros más prácticos a partir de los datos aportados con el fabricante, se ha conseguido obtener un modelo completo de dicho vehículo. Se le han aplicado 2 tipos de controles, que a su vez se han desarrollado tanto para dos como para tres fuentes de potencia diferentes.

Se ha desarrollado un control tipo heurístico, y un control semi-óptimo llamado equivalent consumption minimization strategy, que se basa en convertir la energía reconvertible tanto de la batería como del supercondensador en hidrógeno equivalente.

Tras las comparativas de dichos controles, se puede llegar a la conclusión que el control ECMS tanto para dos fuentes de potencia como para tres, funciona mejor que su correspondiente heurístico, obteniendo mejores resultados de consumo finales, a pesar del intento de realizar el heurístico para minimizar dicho consumo. Aunque en algunos ciclos el resultado del heurístico ha sido mejor, y en muy poca cantidad, en la gran mayoría el resultado del ECMS ha minimizado bastante el consumo obtenido por el heurístico, pudiendo considerarse un control mejor que el heurístico, aunque también con algo más de carga computacional.

Una conclusión muy importante extraída de los experimentos, es la grandísima dependencia del control ECMS respecto a los factores equivalentes constantes, ya que una variación relativamente pequeña de ellos puede provocar variaciones considerables en el consumo del ciclo, además de lo difícil que resulta calcular dichos parámetros, ya que los obtenidos mediante el proceso explicado no fueron los realmente utilizados para optimizar lo máximo posible el ciclo. Todo esto es un punto negativo a resaltar bastante importante del control ECMS.

Como trabajos futuros se pueden realizar un nuevo control óptimo al vehículo modelado, utilizando otro tipo de técnicas como redes neuronales, o un control que tras varios factores equivalentes y potencias medias calculadas para diferentes ciclos, sea capaz en tiempo real de averiguar cual tiene que ir tomando para minimizar el consumo.

Bibliografía

- Buie L, Fry M, Fussey P, Mitts C (2004) An application of cost based power management control strategies to hybrid fuel cell vehicles. SAE paper 2004-01-1299.*
- Butler KL, Ehsani M, Kamath P (1999) A Matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design. IEEE Transactions on vehicular Technology 48(6):1770-1778.*
- Carlos M, David M, Carlos B, M Angel R, E.F Camacho, Elena G, Alejandro O Modeling and torque control for a 4-wheel-drive electric vehicle.*
- Delprat S, Lauber J, Guerra TM, TM Rimaux J (2004) Control of a parallel hybrid powertrain. IEEE Trans. on vehicular Technology 53(3):872-881.*
- L. Guzzella; A. Sciarretta, vehicle propulsion systems. Introduction to modeling and optimization. second edition.*
- Maxoulis CN, Tsinoglou DN, Koltsakis GC (2004) Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles. Energy Conversion and management 45:559-573.*
- P. Rodatz*, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle.*
- Rizoluis D, Burl J, Beard J (2001) Control strategies for a series-parallel hybrid electric vehicle. SAE Paper 2001-01-1354.*
- Chamorro, Juan Pablo (2013): Diseño de una estrategia para la gestión energética de un vehículo híbrido enchufable.*
- Moreno De la Carrera, Alejandro (2004): Control óptimo de la energía en un vehículo híbrido eléctrico empleando redes neuronales.*

Anexos

ANEXO A: CÓDIGOS MATLAB DE LOS MODELOS

- script rendmotor

```
function u=rendmotor(a)

%a(1) es la potencia generada por el bloque generador de potencias en
funcion
%del perfil de velocidades.
%a(2) es el par
%a(3) es la potencia regenerada en los tiempos anteriores
%u(1) es la potencia real que le llega al distribuidor, que será mayor
cuando
%esta cediendo, se divide por el rendimiento del motor, y menor cuando
esté
%cargandose, se multiplica por el rendimiento de carga.
%u(2) es la potencia regenerada acumulada.
format long
potencia=a(1);
par=a(2);

if a(1)==0
    u(1)=0;
    u(2)=a(3);

end

if potencia>0 && par < 150
    x=[0 10 20 30 40 50 60 70 90 110 150];
    y=[0 0.55 0.75 0.77 0.80 0.83 0.83 0.83 0.84 0.84 0.84];
    rend=interp1(x,y,par,'linear');
    u(1)= a(1)/rend;
    u(2)= a(3);
end
if potencia>0 && par >= 150
    rend=0.84;
    u(1)= a(1)/rend;
    u(2)= a(3);
end

if potencia<0
    u(1)= potencia*0.5;
    u(2)= a(3)+ (-1)*(u(1));
end
if u(1)>65000
    u(1)=65000;
end
```

- **script inclinacion**

```
function u=inclinacion(a)
%a es la distancia recorrida por el vehiculo
%u es el angulo de inclinacion
c= load('VAIL2NREL.mat');
i=0;
for k=1:1277
    if c.Alti_vs_Distance.Dist(k)<a &&
c.Alti_vs_Distance.Dist(k+1)>a
        tinclinacion=c.Alti_vs_Distance.Grade(k);
        inclinacion=atan(tinclinacion);
        i=1;
    end
end
if i==0
    inclinacion=0;
end
u=inclinacion;
```

- **script ahorro**

```
function u=ahorro(a)
%a(1)Estado de carga restante de las baterias al final del ciclo.
%a(2)Hidrogeno restante al final del ciclo.
%a(3)Estado de carga del supercondensador al final del ciclo.
%a(4) Estado inicial de carga de la bateria.
%a(5) Estado inicial de Kg de hidrogeno.
%a(6)Estado inicial de carga del supercondensador.
%u Gasto total medio en kilojulios segun el estado de las fuentes de
%potencia, que hemos tenido para un recorrido, a pesar de que el
programa
%se llama ahorro, es asi porque nos permite calcular como ahorrar mas
%energia para un camino dado, pero en realidad lo que calcula es
cuanto se
%ha gastado.
f=a(4) - a(1);
g=a(5) -a(2);
h=a(6) -a(3);
u=(f*6600000+g*42000000+h*980392)/1000;
```

- **script etpar**

```
function u=calculoetpar(a)
% a es temperatura de la bateria
% u es la deltaET

a=a-273;
T=[-20 -10 0 25 40 55];
et=[-0.60 -0.45 -0.25 0 0.20 0.50];

for j=2:length(T)
    if (a==T(j-1))
        u=et(j-1);
    end
    if (a>T(j-1)) && (a<T(j))
        u=((a-T(j-1))/(T(j)-T(j-1)))*(et(j)-et(j-1))+et(j-1);
    end
end
```



```
end
```

```
if (a>=55)
    u=0.25;
end
if (a<=-20)
    u=-0.325;
end
```

- **script caculoenergiapar**

```
function u=calculoenergia(a)
%a(1) es la tension de la bateria
%a(2) es la intensidad de la bateria
% u es el potencial de la bateria.
Rint=0.5*10^-3;
u=a(1)-Rint*a(2);
```

- **script caculobetapar**

```
function u=calculobeta(a)
% a es temperatura de la bateria
%u es la beta
a=a-273;
T=[-20 -10 0 25 40 55];
beta=[1.29 1.22 1.16 1 0.952 0.926];

for j=2:length(T)
    if (a==T(j))
        u=beta(j-1);
    end
    if (a>T(j-1)) && (a<T(j))
        u=((a-T(j-1))/(T(j)-T(j-1)))*(beta(j)-beta(j-1))+beta(j-1);
    end
end

if (a>=45)
    u=0.975;
end
if (a<=-10)
    u=-0.325;
end
```

- **script caculobetapar**

```
function u=calculobeta(a)
% a es temperatura de la bateria
%u es la beta
a=a-273;
T=[-20 -10 0 25 40 55];
beta=[1.29 1.22 1.16 1 0.952 0.926];

for j=2:length(T)
    if (a==T(j))
        u=beta(j-1);
    end
    if (a>T(j-1)) && (a<T(j))
        u=((a-T(j-1))/(T(j)-T(j-1)))*(beta(j)-beta(j-1))+beta(j-1);
    end
end
```

```

    end
end

if (a>=45)
    u=0.975;
end
if (a<=-10)
    u=-0.325;
end
end

```

- **script caculoalfapar**

```

function u=calculoalfapar(a)
% a es intensidad de la batería

C=75;

if(a>0)
i=[0.5 1 2 3 5 6]*C;
alfa=[1 0.99 0.98 0.98 0.97 0.97];

for j=2:length(i)
    if (a==i(j-1))
        u=alfa(j-1);
    end
    if (a>i(j-1) && (a<i(j)))
        u=((a-i(j-1))/(i(j)-i(j-1)))*(alfa(j)-alfa(j-1))+alfa(j-1);
    end
    if (a<0.5*C)
        u=1;
    end
    if (a>=6*C)
        u=0.97;
    end
end
else
    u=0.93;
end
end

```

- **script caculopar1**

```

function u=calculopar1(a)

%a(1) es la aceleración
%a(2) es la velocidad
%a(3) es la inclinación

%u(1) es el par
%u(2) es la velocidad angular del motor
format long
aceleracion=a(1);
velocidad= a(2);

densidadaire=1.204; % Densidad del aire (kg/m³)
Af=1.9675; % Area frontal (m²)

```

```

cd=0.32;           % Coeficiente friccion aire
mv=500;           % Masa del vehiculo (kg)
cr=0.011;        % Coeficiente de rozamiento
g=9.8;           % Gravedad (m/s2)
gamma=4.021;     % Relacion entre velocidad del motor y velocidad
lineal: w_mot=(gamma*velocidad_lineal)/radio_rueda
rueda=0.32;      % Radio de la rueda
inerciam=0.84375; % Inercia del motor
inerciar=0.6125; % Inercia de la rueda
mi=mv+(1/rueda^2)*inerciar+(gamma^2)/(rueda^2)*inerciam; % Masa
inercial total
mp=mv;           % Masa pesante

Fa=0.5*densidadaire*Af*cd*velocidad^2; % Fuerza del aire
Fr=mp*cr*g*cos(a(3)); % Fuerza de rozamiento
Fg=mp*g*sin(a(3)); % Fuerza de la gravedad
if(velocidad==0)
    Fr=0;
end

Fm=mi*aceleracion+Fa+Fr+Fg;
uaux=Fm*rueda;
u(1)= uaux/gamma;

w=velocidad/rueda;
u(2)= w*gamma;

```

- **script caculopotenciacoche1**

```

function u=caculopotenciacoche(a)
%a(1) es la velocidad angular.
%a(2) es el par.
%a(3) es la velocidad lineal.

P=a(1)*a(2);
a(1)=a(1)*60/(2*pi);

if(a(1)<2000 && a(2)>=0)
    Pperdidass=0.016*abs(a(2))^2+0.0082*abs(a(1))^(1.5);
end
if(a(1)>=2000 && a(2)>=0)
    Pperdidass=4.05*10^(-
9)*abs(a(2))^2*abs(a(1))^2+0.0082*abs(a(1))^(1.5);
end
if(a(2)<0)
    u=(P)*0.8;
end
if(a(2)==0)
    u=0;
end
if(a(2)>0)
    u=P+Pperdidass;
end

if(a(3)==0)
    u=0;
end

```

end

- **script caculopotemperaturapar**

```
function u=calculotemperatura(a)
%a(1) es la intensidad de la bateria
%a(2) es la tensionn de la bateria
%a(3) es la energia entregada por la bateria
%a(4) es la temperatura de la bateria

% u es el incremento de temperatura de la bateria. Posteriormente se
% integrara.

R1=0.5*power(10,3); %Resistencia interna
A=0.3006/13; % Area por celda
m=1.73; % Masa de una celda
cp=925; % cp
Ta=23+273; % Temperatura ambiente
hc=200; %coeficiente de enfriamiento o de refrigeraci;n
% Comento la siguiente linea porque no hay datos de ninguna R2 en el
% datasheet
%u=(a(1)^2*R1+(1/R2)*(a(2)-a(3)-a(1)*R1)^2-hc*A*(a(4)-Ta))/(m*cp);
u=(a(1)^2*R1-hc*A*(a(4)-Ta))/(m*cp);
```

- **script caculopotensionpar**

```
function u=calculotensionpar(a)
%a(1) es el estado de descarga (SOD)
%a(2) es delta de et

V_25=[4.1 3.98 3.69 3.53 3.41 3.35 2.7];
cap_rel_25=[0 10 40 70 90 95 100]/100;

u=a(2)+interp1(cap_rel_25, V_25, a(1), 'linear');
```

- **script curvapolarizacion1**

```
function u=curvapolarizacion1(a)
%a(1) es la tension anterior
%a(2) es la potencia

%u(1) es el caudal de H2
%u(2) es el H2 desaprovechado
%u(3) es la potencia que no se aprovecha del H2
%u(4) es la tension de la pila

format long

intensidad = a(2)/a(1);
```

```

n=256;          % Numero de celulas de la pila.
F=96485;       % Constante de Faraday.
m=0.002;       % Masa molar del hidrogeno.
caudalh2_teo=m*n*intensidad/(2*F); % Caudal H2 teorico

if a(2)<0       %Para evitar que le entren potencias negativas
    a(2)=0;
end

if a(2)>0.5     %asegurar que no uso un rendimiento=0 --> caudal infinito
    x=[0       25       50       100       150       200       250
300
350];
    y=[0       0.5       0.54       0.56       0.55       0.53       0.51
0.48
0.44];
    rendimiento=interp1(x,y,intensidad,'linear');

    caudalh2 = caudalh2_teo/(rendimiento);

else
    caudalh2=0;
    caudalh2_teo=0;
    rendimiento=1;
end

x=[0 18 36 54 72 108 144 180 216 252 288 324 360];
y=[247.105 224.766 216.601 210.420 204.577 197.725 191.773 184.165
178.744 172.238 166.384 159.708 155.739];
tension=interp1(x,y,intensidad,'linear');

u(1)=caudalh2;
u(2)=caudalh2-caudalh2_teo;
u(3)=(a(2)/rendimiento)-a(2);
u(4)=tension;

if a(2)==0
    u(4)=a(1);
end

```

- **script curvapolarizacion2**

```

function u=curvapolarizacion1(a)
%a(1) es la tension anterior
%a(2) es la potencia

%u(1) es el caudal de H2
%u(2) es el H2 desaprovechado
%u(3) es la potencia que no se aprovecha del H2
%u(4) es la tension de la pila
%u(5) es el rendimiento

format long
% u=zeros(1,3);
intensidad = a(2)/a(1);
if intensidad >350 %% Es necesario para que el modelo se ejecute y no
de error de salida invalida para calcular la sdis y schg
    intensidad = 350;

```

```

end

n=256;      % Numero de celulas de la pila.
F=96485;   % Constante de Faraday.
m=0.002;   % Masa molar del hidrogeno.
caudalh2_teo=m*n*intensidad/(2*F); % Caudal H2 teorico

if a(2)<0    %Para evitar que le entren potencias negativas a la pila
    a(2)=0;
end

% Efecto de la eficiencia de la pila:
if a(2)>0.5 %asegurar que no uso un rendimiento=0 --> caudal infinito
    x=[0 25 50 100 150 200 250 300 350];
    y=[0 0.5 0.54 0.56 0.55 0.53 0.51 0.48 0.44];
    rendimiento=interp1(x,y,intensidad,'linear');

    caudalh2 = caudalh2_teo/(rendimiento);

else
    caudalh2=0;
    caudalh2_teo=0;
    rendimiento=1;
end

x=[0 18 36 54 72 108 144 180 216 252 288 324 360];
y=[247.105 224.766 216.601 210.420 204.577 197.725 191.773 184.165
178.744 172.238 166.384 159.708 155.739];
tension=interp1(x,y,intensidad,'linear');

u(1)=caudalh2;
u(2)=caudalh2-caudalh2_teo;
u(3)=(a(2)/rendimiento)-a(2);
u(4)=tension;
u(5)=rendimiento;

if a(2)==0
    u(4)=a(1);
end
end

```

ANEXO B: CÓDIGOS MATLAB DE LAS DISTRIBUCIONES

- **script DISTRIBUCIONHEU2**

```
function u=distribucionheu2(a)
% a(1) potencia demandada
% a(2) estado de carga de la bateria
% u(1) es la potencia que se le demandará/cederá a la batería
% u(2) es la potencia que se le demandará a la pila
pdemandada=a(1);
socb=a(2);

%% CASUISTICA PARA POTENCIAS POSITIVAS
if pdemandada >= 0
    % pp=pdemandada;
    if socb > 0.1 && socb <0.9
        if pdemandada >= 5700 && pdemandada <= 29000
            pp= pdemandada;
            pb=0;
            if socb < 0.5
                pp=29000;
                pb=-(29000-pdemandada);
            end
        else
            if pdemandada > 29000 && socb
                pp=19700;
                pb=pdemandada-pp;
            else
                pp=29000;
                pb=pdemandada-pp;
            end
            if pdemandada < 5700
                if socb <= 0.5
                    pp=19700;
                    pb=-(pp-
pdemandada);
                else
                    pp=15000;
                    pb=pdemandada-pp;
                end
            end
        end
    elseif socb <= 0.1
        if pdemandada <= 54500
            pp=54500;
            pb=-(pp-pdemandada);
        else
            pp=54500;
            pb=0;
        end
    end
end
```

```

        end
    elseif socb >=0.9
        pp=0;
        pb=pdemandada;
    end
end
%% CASUISTICA PARA POTENCIAS NEGATIVAS
if pdemandada < 0
    if socb <0.5
        pp=19700;
        pb=pdemandada-pp;
    else
        pp=15000;
        pb=pdemandada-pp;
    end
end
u(1)=pb;
u(2)=pp;

```

- **script DISTRIBUCIONHEU3**

```

function u=distribucionheu3(a)
% a(1) potencia demandada
% a(2) estado de carga de la bateria
% a(3) estado de carga del supercondensador
% a(4) Derivada de la potencia
% u(1) es la potencia que se le demandará/cederá a la batería
% u(2) es la potencia que se le demandará a la pila
% u(3) es la potencia que se le demandará/cederá al supercondensador
pdemandada=a(1);
socb=a(2);
socc=a(3);
derpotencia=a(4);
pp=19700;
pb=0;
pc=0;

%% CASUISTICA PARA POTENCIAS POSITIVAS
if pdemandada >= 0
    if socb > 0.1 && socb < 0.9
        if pdemandada >= 5700 && pdemandada <= 29000
            pp= pdemandada;
            if socb < 0.4
                pp=29000;
                pb=-(29000-pdemandada);
            end
            if socc == 0 && socb >0.2
                pp=29000;
                pc=-(29000-pdemandada);
            end
        end
    else
        if pdemandada > 29000 && socb> 0.6
            pp=19700; %% potencia de la pila para el maximo rendimiento
            if socb > 0 && derpotencia <=100
                pb=pdemandada-pp;
            end
        end
    end
end

```



```

else socc > 0.3 && derpotencia >100
    pc=pdemandada-pp;
end

else
    pp=29000;
    if socb > 0 && derpotencia <=100
        pb=pdemandada-pp;

        else socc > 0 && derpotencia >100
            pc=pdemandada-pp;
        end

    end
end
if pdemandada < 5700

    if socb <= 0.4
        pp=19700;
        pb=-(pp-pdemandada);

        elseif socb >0.4 && socc < 0.5
            pp=19700;
            pc=-(pp-pdemandada);
        else
            pp=10000;
            pb=(pdemandada-pp)/2;
            pc=(pdemandada-pp)/2;

        end

    end
end
elseif socb<=0.1
    if pdemandada <= 54500
        pp=54500;
        pb=-(pp-pdemandada);

        else
            pp=54500;
            pb=0;

        end

    elseif socb>=0.9
        pp=0;
        pb=pdemandada;
        pc=0;

    end
end

end
end

%% CASUISTICA PARA POTENCIAS NEGATIVAS
if pdemandada < 0

    if socb <=0.4
        pp=19700;
        pb=pdemandada-pp;

        elseif socb >0.4 && socc < 0.4
            pp=19700;
            pc=pdemandada-pp;
        else
            if socc ~= 1 && socb ~= 1

```

```

        pp=10000;
        pc=(pdemandada-pp)/2;
        pb=(pdemandada-pp)/2;
    end

    end

end
u(1)=pb;
u(2)=pp;
u(3)=pc;

```

- **script DISTRIBUCIONECMS2**

```

function u=distribucionECMS2(a)
%a(1) Potencia que se demanda
%a(2) Schg
%a(3) sdis
%a(4) Velocidad actual del vehiculo
%a(5) tension de la pila
%a(6) velocidad anterior
%a(7) tiempo de simulacion
%a(8) Ee acumulada
%a(9) SOCB
%u(1) Potencia para la bateria
%u(2) Potencia para la pila
%u(3) Velocidad actual para realimentar
% F=[];
% T=[];
Jmin=Inf; % para darle un valor al coste de la funcion e ir
actualizandola
%th=1800;
    th=360;
schg=a(2);
sdis=a(3);
% potmed=14040;
potmaxpila=54500;
m=500;
porcentaje=1;
ac=a(8);
if a(7) <=360
potmed= 9241.66;
end
if a(7)>360 && a(7) <=720
    potmed=28222.22;
end
if a(7) >720 && a(7) <=1080
    potmed=12719.44;
end
if a(7) >1080 && a(7) <= 1440
    potmed= 14141.66;
end
if a(7) > 1440 && a(7) <=1800
    potmed = 19608.33;
end
if a(7) >1800
    potmed=14500;
end
if a(1) > 0
if a(9) < 0.03

```

```

        u(1)=0;
        u(2)=a(1);
    u(3)=a(4);
    u(4)=ac;
    u(5)=0;
else

for i=0:0.02:1
    pb=i*a(1);%potencia que le corresponde a la bateria
    pp=(1-i)*a(1);%potencia que le corresponde a la pila
    Ee=ac+(pb+0.5*m*(a(6)^2-a(4)^2)); % energia Ee
    prob=(Ee/(th*potmaxpila))+(potmed/potmaxpila);%probabilidad de la
    bateria, aplicando la formula correspondiente

    s=sdis*prob+(1-prob)*schg; %s(t) de la bateria, que usaremos para
    pasar la potencia de la bateria, y poder comparar costes de la funcion

    if a(1) > 1
        intensidad=pp/a(5);
        x=[0 25 50 100 150 200 250 300 350];
        y=[0 0.5 0.54 0.56 0.55 0.53 0.51 0.48 0.44];
        rp=interp1(x,y,intensidad,'linear');
    else
        rp= 0.56;
    end

    J=pp/rp+s*pb; % coste de la funcion
    % F=[F,J];
    % T=[T,i];
    if J < Jmin % si el coste es menos que el coste minimo,
    actualiza el coste minimo
        Jmin=J;
        porcentaje=i;

    end

end
% if a(7)== 283
% figure
% plot(T,F)
% end

u(1)=a(1)* porcentaje;
u(2)=a(1)* (1-porcentaje);
u(3)=a(4);
u(4)=ac+((a(1)*porcentaje)+0.5*m*(a(6)^2-a(4)^2));
u(5)=prob;
end
else
    u(1)= a(1);
    u(2)=0;
    u(3)=a(4);
    u(4)=ac+(a(1)+0.5*m*(a(6)^2-a(4)^2));
    u(5)=1;
end
end

```

- **script DISTRIBUCIONECMS3**

```

function u=distribucionECMS3(a)
%a(1) Potencia que se demanda
%a(2) Schg de la bateria
%a(3) sdis de la bateria
%a(4) Schg del supercondensador
%a(5) sdis del supercondensador
%a(6) Velocidad actual del vehiculo
%a(7) velocidad anterior del vehiculo
%a(8) Tension de la pila
%a(9) Ee
%a(10) Estado de carga de la batería
%a(11) Estado de carga del supercondensador
%a(12) Tiempo de simulacion
%u(1) es la potencia que se le demandará/cederá a la batería
%u(2) es la potencia que se le demandará a la pila
%u(3) es la potencia que se le demandará/cederá al supercondensador
%u(4) velocidad actual para realimentar

Jmin=inf;
th=1800;
pdemandada=a(1);
schgb=a(2);
sdisb=a(3);
schgc=a(4);
sdisc=a(5);
velact=a(6);
velant= a(7);
tension=a(8);
% potmed=14040;
ac=a(9);
socb=a(10);
socc=a(11);
tt=a(12);
if tt <=360
potmed= 9241.66;
end
if tt>360 && tt <=720
    potmed=28222.22;
end
if tt >720 && tt <=1080
    potmed=12719.44;
end
if tt >1080 && tt <= 1440
    potmed= 14141.66;
end
if tt > 1440 && tt <=1800
    potmed = 19608.33;
end
if tt >1800
    potmed=14500;
end

m=500;%masa del vehiculo
if pdemandada > 0
if socb>0.07 && socc > 0.07
a=0.5;
b=0.5;

```

```

for k=0:0.02:1 %tres bucles para ir dandole distintos porcentajes de
la potencia, de 0 a 1, tanto a la bateria como a la pila como al
supercondensador
    for j=0:0.02:1
        if k+j<=1
bateria
            pb=k*pdemandada;%potencia que le corresponde a la
supercondensador
            pc=j*pdemandada;%potencia que le corresponde al
pila
            m=j+k;
            pp=(1-m)*pdemandada;%potencia que le corresponde a la
            Ee=ac+(pb+pc+0.5*m*(velant^2-velact^2));
            %
            Eec=ac2+pc;
            prob=(Ee/(th*56000))+(potmed/56000);
            %
            probb=(Eeb/(th*56000))+(potmed/56000);
            sb=sdisb*prob+(1-prob)*schgb;
            sc=sdisc*prob+(1-prob)*schgc;

            intensidad=pp/tension;
            %
            x=[0 25 50 100 150 200 250 300 350];
            %
            y=[0 0.5 0.54 0.56 0.55 0.53 0.51 0.48 0.44];
            %
            rp=interp1(x,y,intensidad,'linear');
            if intensidad <=25
                rp= 0.5;
            end
            if intensidad > 25 && intensidad <= 50
                rp=0.54;
            end
            if intensidad > 50 && intensidad <= 100
                rp=0.56;
            end
            if intensidad >100 && intensidad <=150
                rp=0.55;
            end
            if intensidad > 150 && intensidad <=200
                rp=0.53;
            end
            if intensidad > 200 && intensidad <= 250
                rp=0.51;
            end
            if intensidad > 250 && intensidad <=300
                rp=0.48;
            end
            if intensidad > 300
                rp=0.44;
            end
            end

            J=pp/rp+sb*pb+sc*pc;
            if J<Jmin % si el coste es menos que el coste minimo,
actualiza el coste minimo
                Jmin=J;
                a=k;% se guardan los valores de los porcentajes
del coste minimo
                b=j;
            end
        end
    end
end
end

```

```

end
else
    if socb<=0.07 && socc>0.07
        a=0;
        b=1;
        for i=0:0.02:1
            pc=i*pdemandada;%potencia que le corresponde a la bateria
            pp=(1-i)*pdemandada;%potencia que le corresponde a la pila

            Ee=ac+(pc+0.5*m*(velant^2-velact^2)); % energia almacenada en la
            bateria mas la energia cinetica
            prob=(Ee/(th*56000))+(potmed/56000);%probabilidad de la bateria,
            aplicando la formula correspondiente
            sc=sdisc*prob+(1-prob)*schgc;

            intensidad=pp/tension;
            % x=[0 25 50 100 150 200 250 300 350];
            % y=[0 0.5 0.54 0.56 0.55 0.53 0.51 0.48 0.44];
            % rp=interp1(x,y,intensidad,'linear');
            if intensidad <=25
                rp= 0.5;
            end
            if intensidad > 25 && intensidad <= 50
                rp=0.54;
            end
            if intensidad > 50 && intensidad <= 100
                rp=0.56;
            end
            if intensidad >100 && intensidad <=150
                rp=0.55;
            end
            if intensidad > 150 && intensidad <=200
                rp=0.53;
            end
            if intensidad > 200 && intensidad <= 250
                rp=0.51;
            end
            if intensidad > 250 && intensidad <=300
                rp=0.48;
            end
            if intensidad > 300
                rp=0.44;
            end

            J=pp/rp+sc*pc; % coste de la funcion
            if J < Jmin % si el coste es menos que el coste minimo,
            actualiza el coste minimo
                Jmin=J;
                b=i;
            end
        end
    end
    if socc <=0.07 && socb >0.07
        a=1;
        b=0;
        for i=0:0.02:1
            pb=i*pdemandada;
            pp=(1-i)*pdemandada;

```

```

Ee=ac+(pb+0.5*m*(velant^2-velact^2));
prob=(Ee/(th*56000))+(potmed/56000);
sb=sdisb*prob+(1-prob)*schgb;

intensidad=pp/tension;
% x=[0 25 50 100 150 200 250 300 350];
% y=[0 0.5 0.54 0.56 0.55 0.53 0.51 0.48 0.44];
% rp=interp1(x,y,intensidad,'linear');

if intensidad <=25
    rp= 0.5;
end
if intensidad > 25 && intensidad <= 50
    rp=0.54;
end
if intensidad > 50 && intensidad <= 100
    rp=0.56;
end

if intensidad >100 && intensidad <=150
    rp=0.55;
end
if intensidad > 150 && intensidad <=200
    rp=0.53;
end
if intensidad > 200 && intensidad <= 250
    rp=0.51;
end
if intensidad > 250 && intensidad <=300
    rp=0.48;
end
if intensidad > 300
    rp=0.44;
end
J=pp/rp+sb*pb; % coste de la funcion
if J < Jmin % si el coste es menos que el coste minimo,
actualiza el coste minimo
    Jmin=J;
    b=i;
end

end
end
if socc <=0.07 && socb <=0.07
    a=0;
    b=0;
end

end
c=a+b;
u(1)=pdemandada*a;%valores finales obtenidos para el coste minimo de
la funcion
u(2)=pdemandada*(1-c);
u(3)=pdemandada*b;
u(4)=velact;
u(5)=ac+pdemandada*a+pdemandada*b+0.5*m*(velant^2-velact^2);

else
for i=0:0.02:1

```

```

        pb=i*pdemandada;
        pc=(1-i)* pdemandada;
        J=schgb*pb+schgc*pc;
        if J < Jmin % si el coste es menos que el coste minimo,
actualiza el coste minimo
            Jmin=J;
            b=i;
        end
    end
    u(1)=pdemandada*b;%valores finales obtenidos para el coste minimo de
la funcion
    u(2)=0;
    u(3)=pdemandada*(1-b);
    u(4)=velact;
    u(5)=ac+pdemandada*b+pdemandada*(1-b)+0.5*m*(velant^2-velact^2);

end

```