

Trabajo de Fin de Grado.  
Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica

Control y modelado de vehículo híbrido basado en  
baterías y supercondensador.

Autor: Diego Corcoba Fernández

Tutor: Carlos Bordons Alba

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

Sevilla, 2018





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica

# **Control y modelado de vehículo híbrido basado en baterías y supercondensador.**

Autor:

Diego Corcoba Fernández

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Dpto. de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Trabajo de fin de grado: Control y modelado de vehículo híbrido basado en baterías y supercondensador.

Autor: Diego Corcoba Fernández

Tutor: Carlos Bordons Alba

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

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

Gracias a mis padres por haberme apoyado y haberme dado la oportunidad de estudiar en una ciudad que no es la mía con todo el esfuerzo y sacrificio que ello ha conllevado.

No puedo olvidar a mis amigos que me han acompañado, y en ocasiones, guiado, durante estos años. Amigos que tendré para siempre y con los que he compartido tanto buenos como malos momentos a lo largo de la carrera.

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

Muchas gracias a todos.

*Diego Corcoba Fernández*

*Universidad de Sevilla*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

En este trabajo se ha llevado a cabo el modelado de un vehículo híbrido compuesto por un sistema de baterías y un supercondensador.

El trabajo ha estado basado en el coche del departamento 'FOX' que se nos ha cedido amablemente para investigación y para poder realizar prácticas en él.

El trabajo consiste en el modelado del vehículo y el control de la potencia contando con dos fuentes de energías, así como, explicar los elementos necesarios para poder implementarlo en el vehículo.

En la parte de control de la potencia se han realizado dos controles, uno heurístico y otro control para óptimo para reducir el RMS de la batería.



<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
1.1.	Apartado introductorio	14
1.2.	Historia de los vehículos eléctricos	14
1.3.	Sistema de configuración de los vehículos híbridos	16
1.4.	FOX	23
1.5	Intereses y objetivos	24
<b>3</b>	<b>MODELADO</b>	<b>27</b>
3.1	Driving cyle	29
3.2	Vehículo	30
3.3	Transmisión	33
3.4	Motor eléctrico	35
3.5	Batería	37
3.6	Supercondensador	40
3.7	Igbt	43
<b>4</b>	<b>ESTRATEGIAS DE CONTROL</b>	<b>44</b>
4.1.	Control heurístico	44
4.1.1	Ciclo NEDC	46
4.1.2	Ciclo USA CITY II	50
4.1.3	Ciclo USA FTP-75	54
4.1.4	Ciclo WLTP	58
4.2	Control para reducción RMS de la batería	62
4.2.1	Ciclo NEDC	63
4.2.2	Ciclo USA CITY II	67
4.2.3	Ciclo USA FTP-75	73
4.1.4	Ciclo WLTP	79
5	Conclusiones	82
6	Bibliografía	83

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Apartado introductorio**

Los combustibles fósiles son y han sido la principal fuente de energía en los diferentes medios de transporte, pero está cambiando.

Ya sea por la preocupación por el agotamiento del petróleo, por el cambio climático, o por temas políticos para no depender del precio que pongan los productores de crudo (OPEP) está habiendo una transición paulatina hacia modelos de sostenibilidad tanto en la producción de energías como en los medios de transporte y poco a poco, también en las ciudades sostenibles.

Por estas razones, han ido apareciendo vehículos más eficientes como los vehículos híbridos y los vehículos eléctricos.

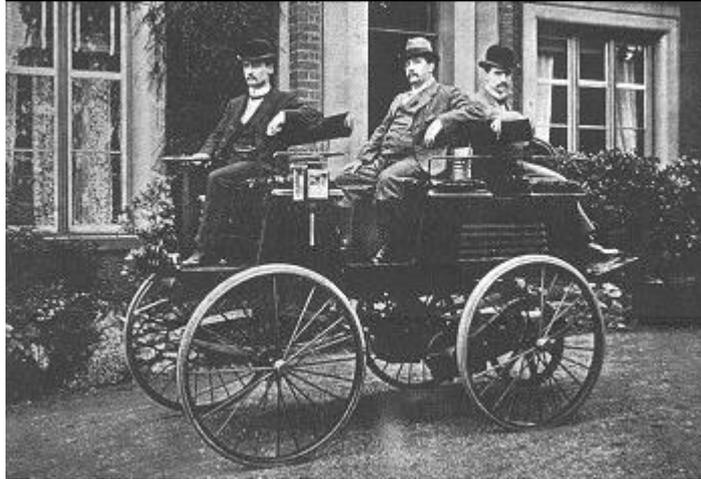
## **1.2. Historia de los vehículos eléctricos**

La historia del vehículo eléctrico comienza a mediados del siglo XIX. La invención del primer modelo de vehículo eléctrico es atribuida a Ányos Jedlik que en 1828 fabrico un pequeño coche alimentado por un motor eléctrico.

Durante la siguiente década hubo varios intentos más hasta que en 1837 el químico Robert Davidson fabricó un coche propulsado por un motor eléctrico y con unas rudimentarias baterías fabricadas por células galvánicas.

Las baterías recargables, que proporcionan un medio viable para el almacenamiento de la electricidad a bordo de un vehículo no llegaron hasta 1859, con la invención de la batería de plomo-ácido por el físico francés Gaston Planté. Camille Alphonse Faure, otro científico francés, mejoró significativamente el diseño de la batería en 1881; sus mejoras aumentaron considerablemente la capacidad de las baterías y permitió directamente su fabricación a escala industrial.

El interés en los vehículos de motor aumentó considerablemente en la década de 1890 y principios de 1900. Los taxis eléctricos alimentados por baterías se hicieron disponibles a finales del siglo XIX. En Londres, Walter C. Bersey diseñó una flota de tales taxis y los introdujo a las calles de la capital británica en 1897.

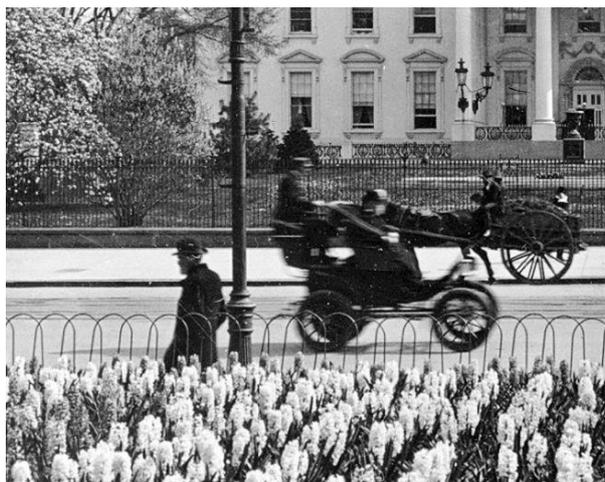


*Coche eléctrico construido por Thomas Parker (1895).*

En el mismo año, en la ciudad de Nueva York, la Samuel's Electric Carriage and Wagon Company comenzó a utilizar 12 carruajes eléctricos. La compañía funcionó hasta 1898 con hasta 62 cabinas en operación hasta que fue reformada por sus financistas para formar la Electric Vehicle Company.

La aceptación de los coches eléctricos fue inicialmente obstaculizada por la falta de infraestructura para la recarga de energía, pero ya en 1912, muchas casas estaban dotadas con suministro de electricidad, lo que permitió un aumento en la popularidad de los coches. A comienzos de siglo, el 40% de los automóviles eran impulsados a vapor, el 38% eran eléctricos, y el 22% de gasolina. En Estados Unidos se habían registrado 33.842 coches eléctricos, y se convirtió en el país donde los coches eléctricos habían ganado la mayoría de aceptación.

Después de disfrutar el éxito a comienzos del siglo XX, el coche eléctrico comenzó a perder posiciones en el mercado del automóvil. Para la década de 1920, una infraestructura vial mejorada requería de vehículos con un rango mayor que el ofrecido por los coches eléctricos. El descubrimiento en todo el mundo de grandes reservas de petróleo conllevó una amplia disponibilidad de la gasolina, haciendo a estos coches más baratos de operar a través de largas distancias.



*El taxi eléctrico de Columbia Electric (1896-99) en Pennsylvania Avenue, Washington DC, visto desde Lafayette Park en 1905*

Finalmente el coche eléctrico quedó en desuso hasta que la tecnología ha permitido realizar coches con una autonomía bastante grande y con una velocidad de carga bastante rápida. Todo esto ha sido impulsado por la crisis del petróleo y por la intención de independencia por parte tanto de los estados como de las empresas.

Todo esto ha sido gracias primero a Toyota, ya que empezó a fabricar coches híbridos antes que sus competidores y a Tesla, dotando de una red de supercargadores a los usuarios de sus vehículos.

### 1.3. Sistema de configuración de los vehículos híbridos

Los vehículos se pueden clasificar según su nivel de hibridación y la configuración de su sistema de propulsión.

En orden son:

- Híbrido ligero: se trata de un vehículo de combustión normal que consta de un motor eléctrico para el sistema de start/stop de los vehículos.
- Híbrido asistido: este modelo de vehículos consta de un motor a combustión que es el principal y un pequeño motor eléctrico que actúa como apoyo al de combustión. Gracias a esto se pueden realizar configuraciones de coches en las cuales se necesita un motor más pequeño (por lo tanto menor consumo) pero sin sacrificar la potencia total del vehículo.

En los modelos actuales se puede elegir si quieres usar o no solo el motor eléctrico, aunque la autonomía es mínima (en torno a los 2 km) es útil para trayectos muy cortos. Estos vehículos son denominados también "range extender" debido a que para un mismo modelo, con este sistema aumenta la autonomía del vehículo.

- Híbrido completo: este tipo de montaje ya permite el funcionamiento en ambos modos con una autonomía mayor. Esta caracterizado por el uso del motor de combustión como fuente principal de generación de energía. Se aprovecha los tiempos de frenada para recargar la batería. Los modelos más actuales permiten circular en modo eléctrico hasta velocidades por debajo de los 50 km/h de media, siempre y cuando el nivel de carga lo permita.

Gracias a esto se consigue un ahorro importante en el combustible. Según los fabricantes, en torno a un 50% de combustible.

- Híbrido enchufable: estos son los más recientes y los más eficientes también. Se caracterizan por tener un sistema de baterías completo con autonomía suficiente para hacer trayectos de media distancia sin necesidad de utilizar el motor de gasolina. Las baterías se recargan a través de la red eléctrica, por esto, en el mundo anglosajón se utiliza la denominación **PHEV** de "Plug-in Hybrid Electric Vehicle".

La autonomía de estos vehículos suele rondar entre 50 y 70 km en función de los modos de conducción únicamente en modo eléctrico. Lo que es una ventaja para la gran mayoría de la gente ya que los trayectos suelen ser cortos día a día.

Esta es la tendencia actual de realizar coches debido a que es posible realizarlos más asequibles y con las ventajas de ambos sistemas. Es el sistema que más impacto ha tenido dentro del sector de coches "premium" con modelos de grandes marcas como son Porsche o Mercedes-Benz.

Según su sistema de impulsión los vehículos eléctricos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Híbridos en serie:**

Los sistemas híbridos en serie utilizan un motor de combustión para extender el rango de conducción de un coche eléctrico. Usando un generador a la salida del motor de combustión se puede alimentar directamente el motor eléctrico o puede cargar una batería. De este modo, el modo de operación del motor de combustión no está relacionado con la potencia demandada en cada instante. Gracias a esto, puede 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.

En este tipo de vehículos se tiene conectado por un lado el motor de combustión a un generador y este, a su vez, conectado a un convertidor de potencia. También se encuentra conectado a este convertidor la batería. Este convertidor se conecta al motor eléctrico y a través de la transmisión se conecta al sistema de tracción del vehículo.

Se pueden tener 4 modos de operación para este sistema:

U=1: Funcionamiento en modo puramente eléctrico, se puede activar si las baterías tienen suficiente carga. Para este modo el motor se encuentra desconectado.

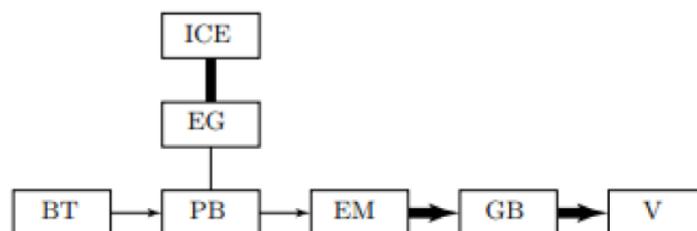


Figura 1: flujo de potencia en híbridos serie para U=1.

U=0: En este modo el banco de baterías se encuentra totalmente descargado, por lo que se utiliza el motor de combustión interna para propulsar el vehículo y un extra que es utilizada para cargar la batería.



Figura 2: flujo de potencia en híbridos serie para  $U=0$ .

$0 < U < 1$ : este es el modo de funcionamiento más común en estos tipos de configuraciones. Cuando la potencia demandada por el vehículo está por encima de la óptima se manda energía de la batería para suministrar la diferencia.

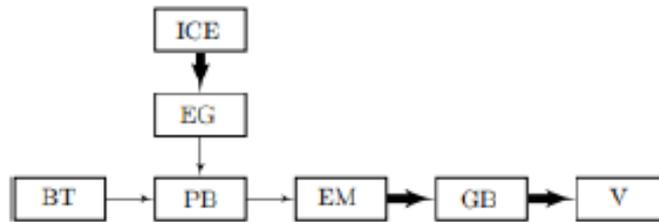


Figura 3: flujo de potencia en híbridos serie para  $0 < U < 1$ .

Durante las fases de frenado, el motor de combustión se apaga y parte de esa energía se utiliza para recargar las baterías.

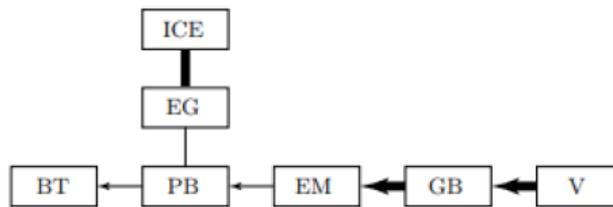


Figura 4: flujo de potencia en híbridos serie para frenada regenerativa

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 y V los ejes del vehículo.

#### - **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. 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.

En este caso la conexión entre el tren de potencia y las ruedas es mecánica, es decir, se conectan tanto el motor eléctrico como el de combustión a la transmisión y de este al eje 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.

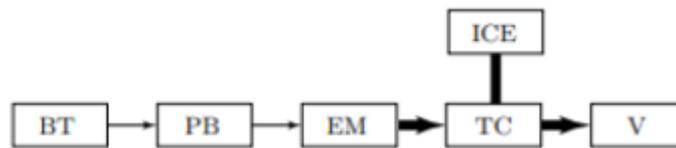


Figura 5: flujo de potencia en híbridos paralelo para  $U=1$ .

$U=0$ : cuando la batería se encuentra descargada toda la potencia es realizada por el motor de combustión, esta se utiliza para cargar las baterías y para mover el vehículo.

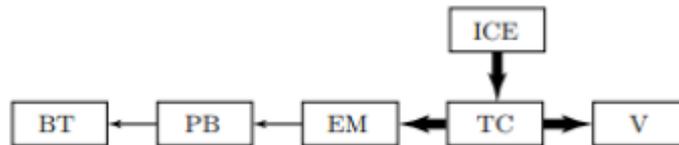


Figura 6: flujo de potencia en híbridos paralelo para  $U=0$ .

En este montaje aparece un nuevo modo de control y se permite que el motor no cargue las baterías y toda la energía se utilice en mover el coche.

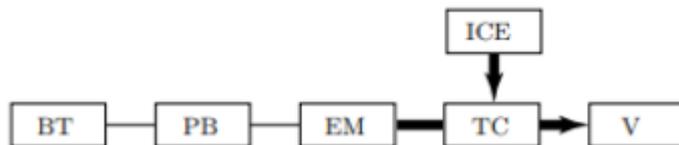


Figura 7: flujo de potencia en híbridos paralelo para  $U=0$  y sin carga de batería.

$0 < U < 1$ : este es el modo más común en estos vehículos. El motor de combustión funciona en su rango óptimo de consumo y el resto de la energía es aportada por las baterías. Los dos motores funcionan simultáneamente.



Figura 8: flujo de potencia en híbridos paralelo para  $0 < U < 1$ .

También en este montaje cuando el vehículo frena se aprovecha parte de esa energía para devolverse hacia las baterías.



Figura 9: flujo de potencia en híbridos paralelo para frenada regenerativa

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

- **Híbridos serie-paralelo:**

En medio de las dos opciones se encuentra el Híbrido serie-paralelo o 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 y el otro como generador y el sistema start/stop.

En estos vehículos se utiliza un conjunto de engranajes planetarios, con lo cual aparecen distintos modos de conducción nuevos.

ZEV:

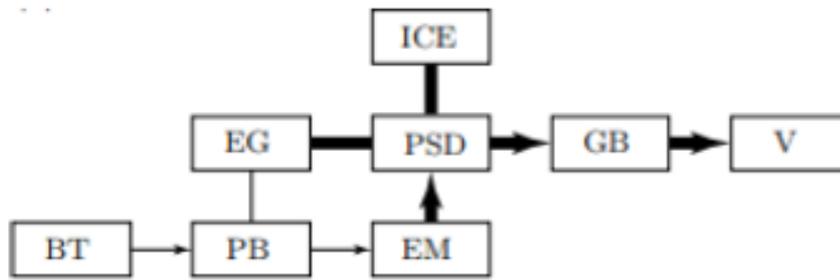


Figura 10: flujo de potencia en híbridos serie-paralelo en modo ZEV.

Recarga de las baterías:

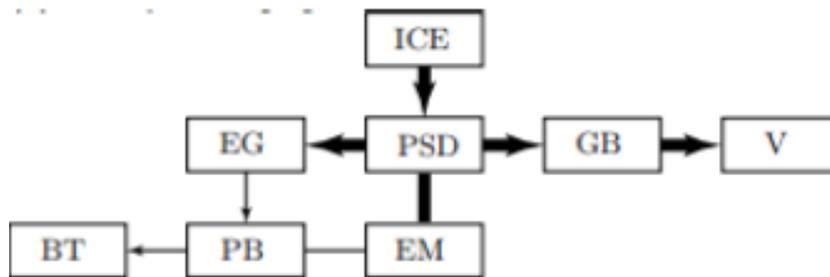


Figura 11: Flujo de potencia en híbridos serie-paralelo en modo recarga de baterías.

Asistente de potencia:

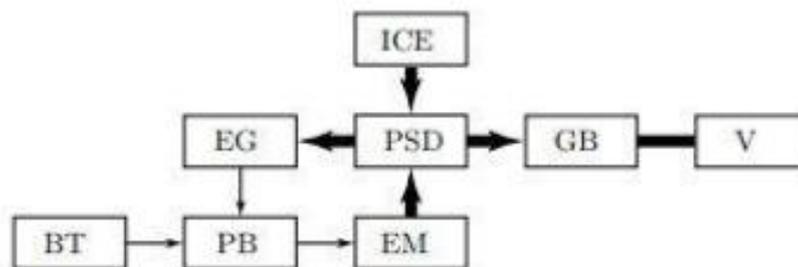


Figura 12: flujo de potencia en híbridos serie-paralelo en modo asistente de potencia.

Frenada regenerativa:

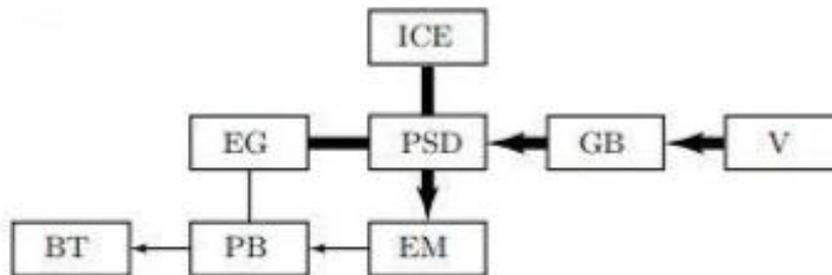


Figura 13: flujo de potencia en híbridos serie-paralelo en modo frenada regenerativa.

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 son los engranajes planetarios.

## 1.4. FOX



Figura 14: FOX

El vehículo FOX está diseñado sobre el chasis de competición S2 fabricado por SilverCars.

Ha sido modificado para poder introducir los cuatro motores necesarios para la arquitectura "in-wheel". Los motores usados son eléctricos sin escobillas alojados en las ruedas, que reciben la energía de un conjunto de baterías.

Cada motor brushless (sin escobillas) dispone de 7 kW de potencia. Son alimentados mediante un convertidor de potencia que convierte la corriente continua de las baterías en corriente alterna. Se usan motores brushless a pesar de su mayor coste económico, por las ventajas que ofrece en términos de rendimiento, ya que al no haber rozamiento la pérdida por calor es mínima, y además, generan menos ruido. A su vez, se utiliza la corriente alterna debido a que proporciona más rendimiento en la entrega de potencia durante largos periodos de tiempo, lo cual para nuestra aplicación es claramente ventajoso. Los motores van alojados en las ruedas y conectados directamente a las mismas, sin ningún tipo de eje, por lo que el rendimiento en la entrega de par a las ruedas es máximo.

La fuente de energía eléctrica está compuesta por 6 paquetes de baterías de 4 celdas cada una.

Son baterías de iones de litio que usan como elemento catódico el fosfato de hierro y de manganeso (LiFeMnPO<sub>4</sub>), se usan este tipo de baterías por varios motivos: el primero es que son las baterías de litio más respetuosas con el medio ambiente, ya que no tendría sentido hablar de movilidad sostenible usando elementos altamente contaminantes, a su vez tienen una gran densidad de carga y ésta es muy estable en el tiempo, lo que nos permite

ahorrar peso puesto que las baterías en un coche eléctrico suele ser el elemento más pesado y es por tanto un factor clave en la autonomía, por otra parte tienen un ciclo de vida muy alto lo que nos asegura una buena vida útil ya que es muy ineficiente para un prototipo cambiar las baterías frecuentemente, y por último, no ven empeorado su rendimiento con el aumento de temperatura, todo lo contrario, pueden aumentar su eficiencia. Para controlarlas, usamos un sistema comercial de gestión de baterías (BMS).

## 1.5: INTERESES Y OBJETIVOS.

En la actualidad, el uso excesivo del petróleo en los medios de transporte causa una contaminación excesiva lo que ha hecho que los niveles de CO<sub>2</sub> estén en máximos históricos, como también los son los óxidos de nitrógeno emitidos por los diésel.

Por estas razones los gobiernos cada vez son más restrictivos a la hora de permitir niveles de contaminación, sobre todo, en los grandes núcleos urbanos. Esto lo hemos podido vivir en España en el caso de Madrid que, debido a su alta contaminación, se ha ido prohibiendo la entrada a la zona centro a vehículos que no tuvieran certificado ECO y limitando la velocidad máxima a 70 km/h en las radiales M-30 y M-40 cuando los niveles se elevaban demasiado.

Ahora, con las nuevas leyes que quiere aprobar la Unión Europea, los vehículos diésel tienen los días contados, esto los fabricantes lo saben y cada vez fabrican menos coches con motores diésel.



Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Anfac, y Comisión Europea

Figura 15: evolución de matriculaciones de vehículos diésel, gasolina y otros junto con el precio de operación de estos.

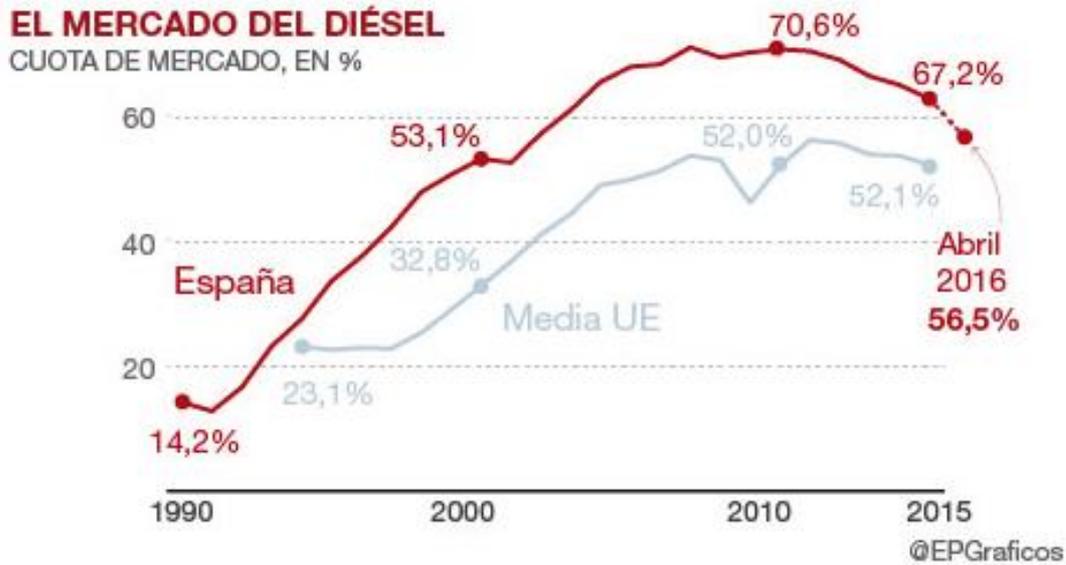


Figura 16: cuota de mercado vehículos diésel en España vs UE.

Fuente: El periódico de Cataluña.

Como se observa en estas gráficas los vehículos diésel cada día son menos y, hoy por hoy, en el segmento que domina nuestras carreteras (me refiero a los coches SUV) es muy complicado encontrarlos en versiones diésel, y las marcas que lo fabrican, es con una oferta muy limitada.

Evolución del CO<sub>2</sub>:

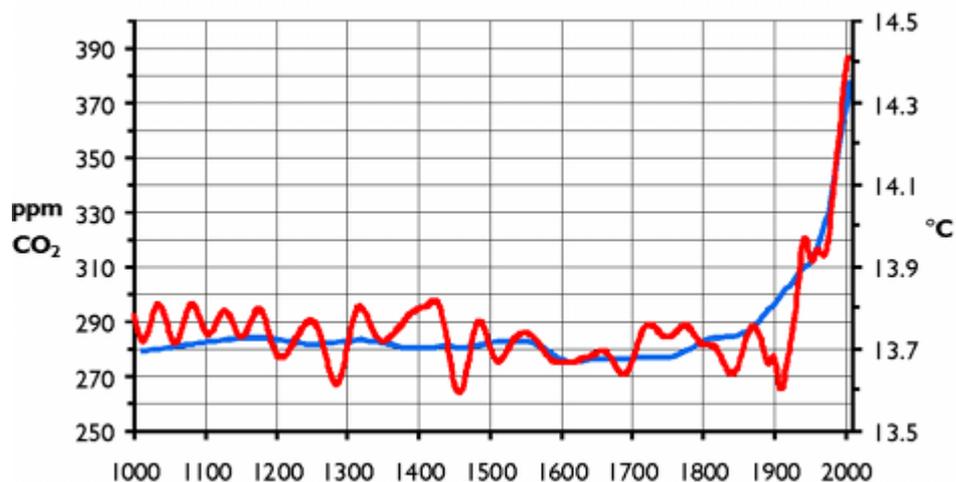


Figura 17: relación entre temperatura y CO<sub>2</sub> con el paso del tiempo.

Fuente: periódico Abadía Digital.

Este efecto es el calentamiento global. Y una solución a este problema es el desplazamiento y el abastecimiento de recursos sostenibles.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es la modelación de un vehículo híbrido sin emisiones basado en baterías y supercondensadores.

Todo esto se realizará en Matlab Simulink, donde se implementará un modelo de todos los elementos necesarios para realizar dos estrategias de control.

## CAPITULO 3: MODELADO.

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 estudio, se ha modelado un vehículo completo con un sistema de potencia basado en baterías y un supercondensador.

Cada sistema a su vez, se divide en subsistemas para facilitar el diseño. Una vez están todos los subsistemas funcionando, encajan como un puzle unos con otros.

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

Cuasi estático: En la simulación cuasi estática 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 cuasi estático.

Lo primero que voy a mostrar es el modelo completo para ir luego desgranando cada elemento.

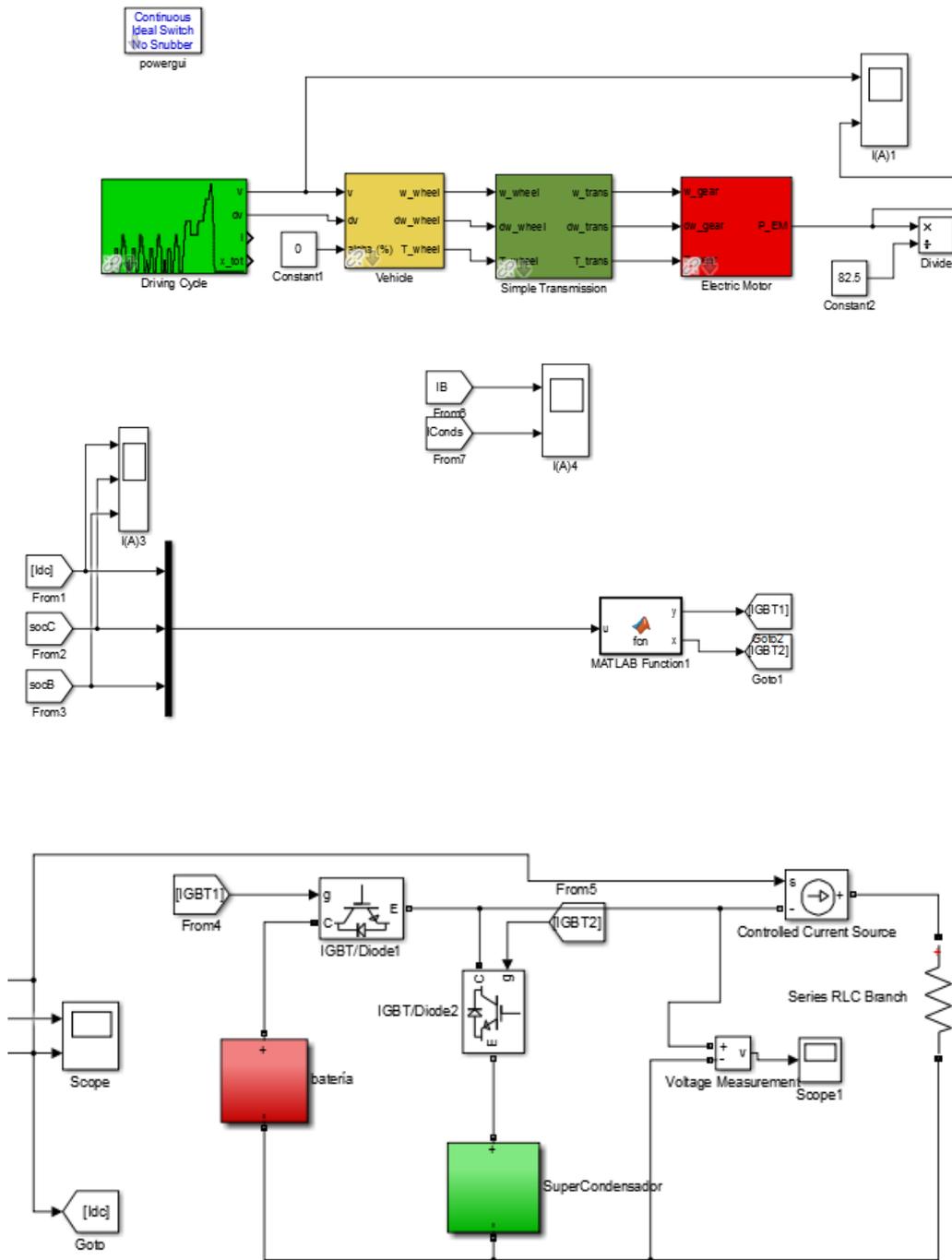


Figura 18: modelo de vehículo híbrido basado en baterías y supercondensadores.

La figura está dividida en dos para mejor visualización.

## DRIVING CYCLE:

Si empezamos de derecha a izquierda podemos ver que tenemos un bloque llamado 'Driving Cycle':

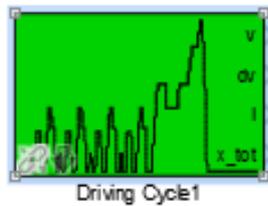


Figura 19: 'Driving Cycle'

Este bloque tiene almacenado los datos de los test de comprobación realizados por los diferentes países para dar unos datos comunes a nivel de emisiones consumos etc. en todos los vehículos que salen al mercado.

Este dato es la curva de velocidad que debe seguir un vehículo para la fase de testeo. Gracias a esto nosotros podemos sacar los demás datos:

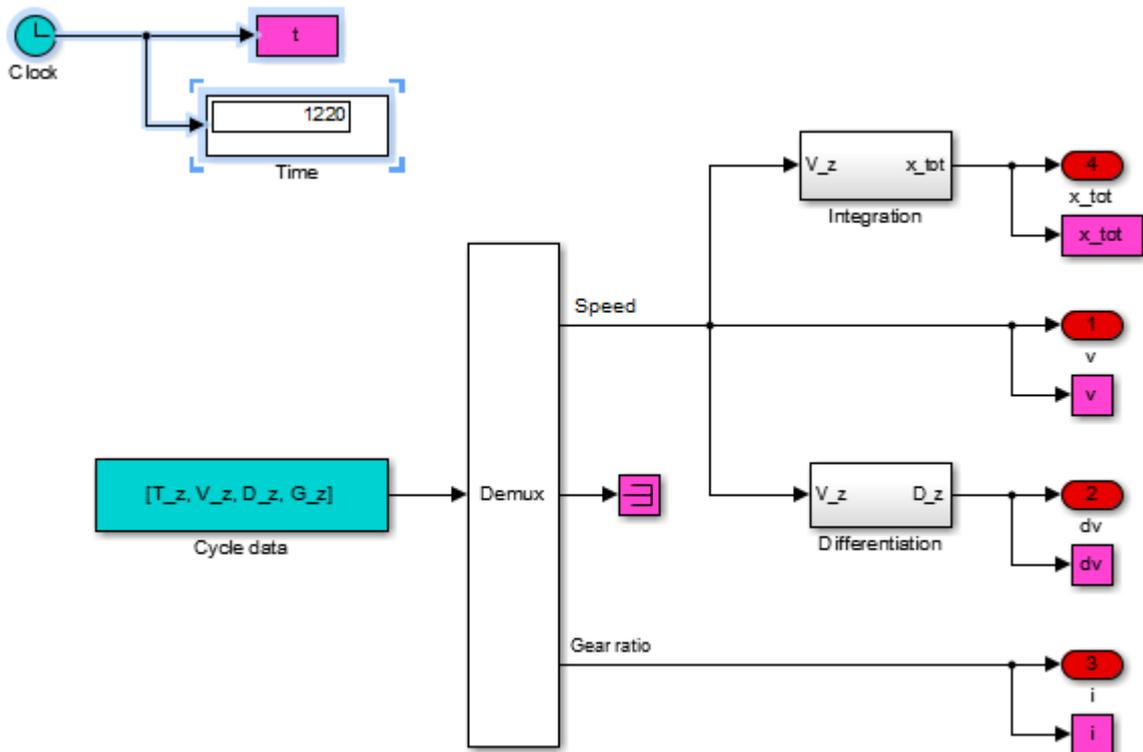


Figura 20: esquema interno del bloque 'Driving Cycle'

Este bloque coge los datos del ciclo que nosotros hemos cargado previamente, como por ejemplo, el NEDC europeo y obtenemos a través de la integración de la velocidad, la posición y a través de su derivada la aceleración.

Por lo tanto las salidas del bloque serán: velocidad, aceleración, marcha y posición.

Si continuamos el siguiente bloque es el modelo del vehículo:

### VEHICULO:

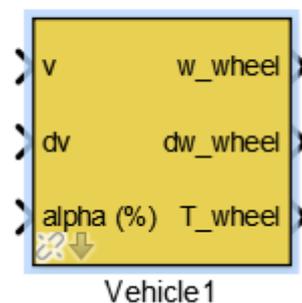


Figura 21: modelo del vehículo.

En las simulaciones cuasi estáticas, las entradas del vehículo son la velocidad, la aceleración y el ángulo de la carretera. Con esta información la fuerza  $F_t$  actúa sobre el vehículo.

Para estos modelos se asume que el vehículo circula a una velocidad constante  $v$ , aceleración  $a$ , y pendiente  $\alpha$  para un periodo corto de tiempo.

Una vez que  $F_t$  es conocida, las pérdidas de potencia se calculan para cada punto de operación.

Finalmente para calcular la fuerza necesaria para desplazar el vehículo a la velocidad requerida tendremos que aplicar una fuerza que me desplace la masa y venza las resistencias.

La ecuación básica que utilizaremos será la segunda ley de Newton aplicada a nuestro caso:

$$F_{t,i} = m_v \cdot a_i + F_{r,i} + F_{a,i} + F_{g,i}$$

Donde  $m_v$  es la masa del vehículo,  $a_i$  es la aceleración instantánea,  $F_{r,i}$  es la fuerza de rozamiento instantánea,  $F_{r,a}$  es la fuerza de resistencia aerodinámica instantánea y  $F_{g,i}$  es la fuerza gravitacional instantánea sobre el vehículo.

$$F_{t,i} = m_v \cdot a_i + c_r \cdot m_v \cdot g \cos(\alpha_i) + 1/2 \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v_i^2 + m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha_i).$$

Donde  $c_r$  es el coeficiente de rozamiento de rodadura,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $A_f$  es el área frontal del vehículo,  $c_d$  es el coeficiente de rozamiento con el aire  $v$  es la velocidad del vehículo y  $\alpha$  es el ángulo de la carretera. Todo esto para el instante que estamos analizando.

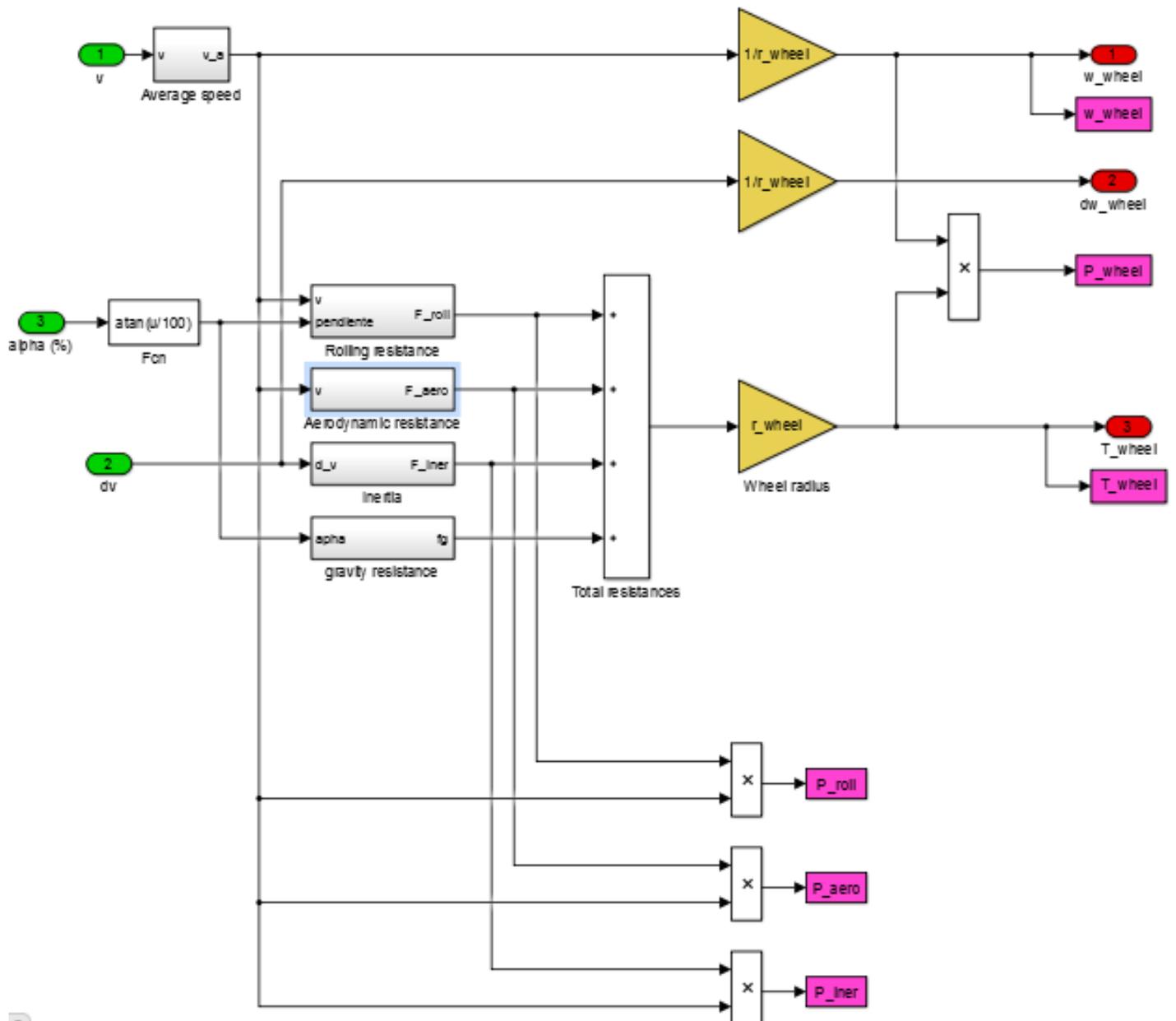


Figura 22: modelo del vehículo internamente.

Una vez miramos en el interior del modelo empezando de arriba hacia abajo lo primero que hacemos es una media de la velocidad entre nuestro instante y el instante anterior para tomar un promedio en

el tramo de la velocidad. Cuanto más pequeño sea el intervalo de iteración, mejor funcionará el modelo.

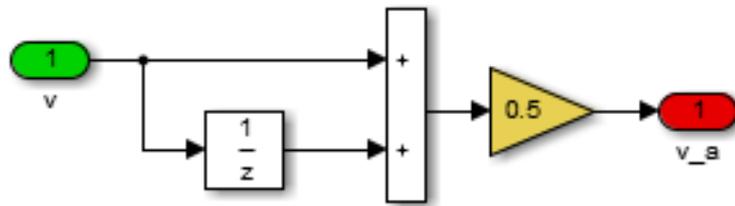


Figura 23: obtención de la velocidad en las ruedas.

Para obtener la velocidad en las ruedas, simplemente dividimos la velocidad lineal entre el radio de la rueda.

El siguiente paso que se realiza en este modelo es aplicar la segunda ley de Newton como se ha explicado anteriormente, es decir como la suma de las fuerzas de inercia, resistencia a la rodadura, resistencia aerodinámica y resistencia gravitatoria.

Para poder utilizar el desnivel proporcionado en porcentaje es necesario transformarlo a grados.

Así pues la resistencia de rodadura,  $F_r = c_r \cdot m \cdot v \cdot g \cos(\alpha)$  lo obtenemos en Simulink como:

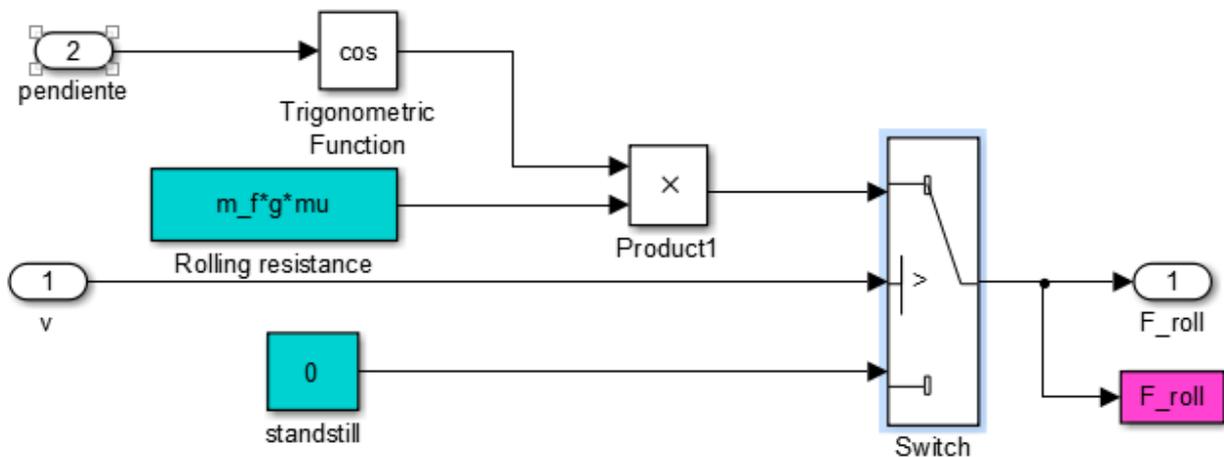


Figura 24: obtención de la fuerza de la rodadura.

Y la resistencia aerodinámica,  $F_v = 1/2 \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2$  lo obtenemos en Simulink como:

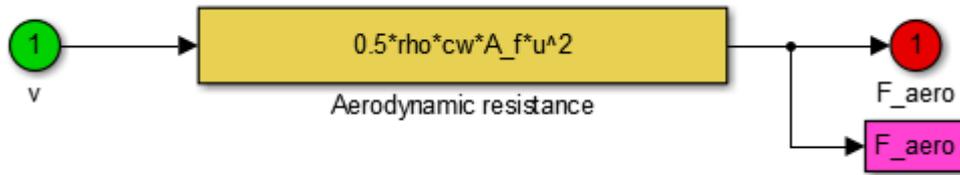


Figura 25: obtención de fuerza aerodinámica.

Una vez tenemos todas las fuerzas, lo que se realiza es la división por el radio de la rueda de nuevo para obtener el par en la rueda para cada instante. Hacemos lo mismo con la aceleración.

También se obtienen en el modelo la potencia en la rueda y la de las fuerzas de rodadura, aerodinámica e inercia.

Si continuamos hacia la derecha, el siguiente bloque de transmisión:

## TRANSMISIÓN:

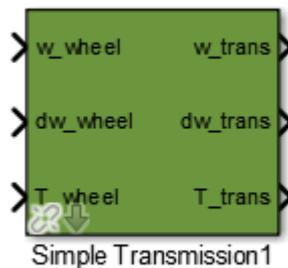


Figura 26: modelo de la transmisión.

Un sistema de transmisión es un conjunto de engranajes que nos permite adecuar la velocidad de giro del motor con la velocidad de giro de las ruedas.

En el caso de los coches eléctricos debido a que el motor eléctrico tiene un rango de funcionamiento muchísimo mayor que los motores de combustión, por esta razón, se suele utilizar un sistema de transmisión simple.

Estos sistemas se basan simplemente en un conjunto de engranajes que actúan de reductora.

Cabe destacar que no se utiliza en todos los modelos de coches eléctricos, debido a que los motores no tienen problemas de funcionamiento en rangos muy grandes en comparación a los motores de combustión.

En nuestro proyecto hemos utilizado una transmisión simple con una única relación.

Por lo tanto, para transformar la velocidad del motor a la velocidad de las ruedas basta con dividir este valor por la relación fijada. Lo mismo con la aceleración.

Para el par lo que tenemos que hacer es dividir la velocidad de giro entre las pérdidas por fricción, (dato que estimamos) y se introduce como parámetro. Este valor lo sumamos al par y el resultado se divide entre la relación de transmisión.

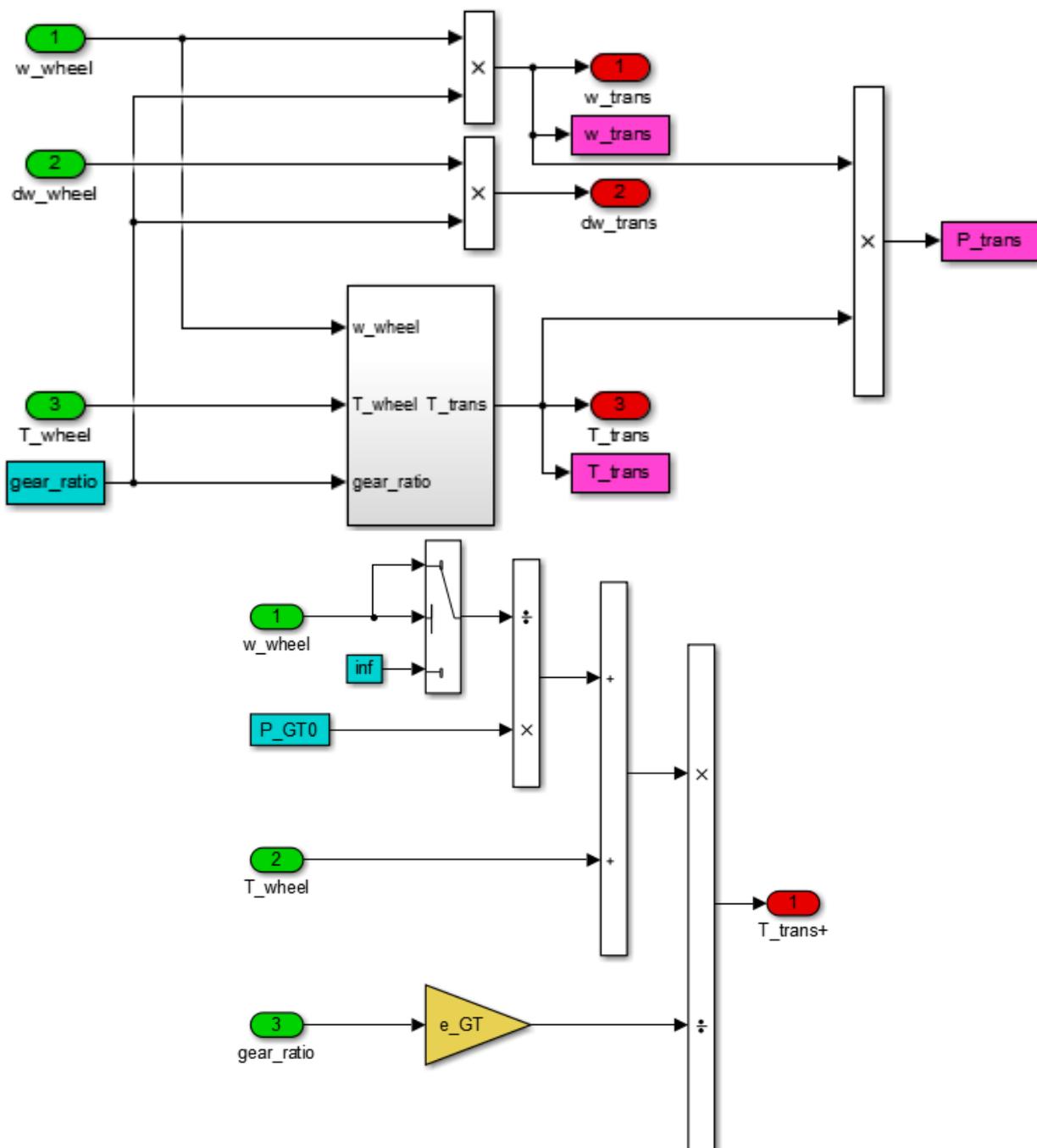


Figura 27: modelo de la transmisión.

El siguiente bloque es el motor eléctrico:

## MOTOR ELÉCTRICO:



Figura 28: modelo del motor eléctrico.

El funcionamiento de un motor eléctrico es más sencillo que el de combustión y el rango de entrega de potencia es lineal en revoluciones bajas.

Vamos a ver una comparativa entre la un motor eléctrico y uno de combustión en torno a la entrega de par en función de las revoluciones.

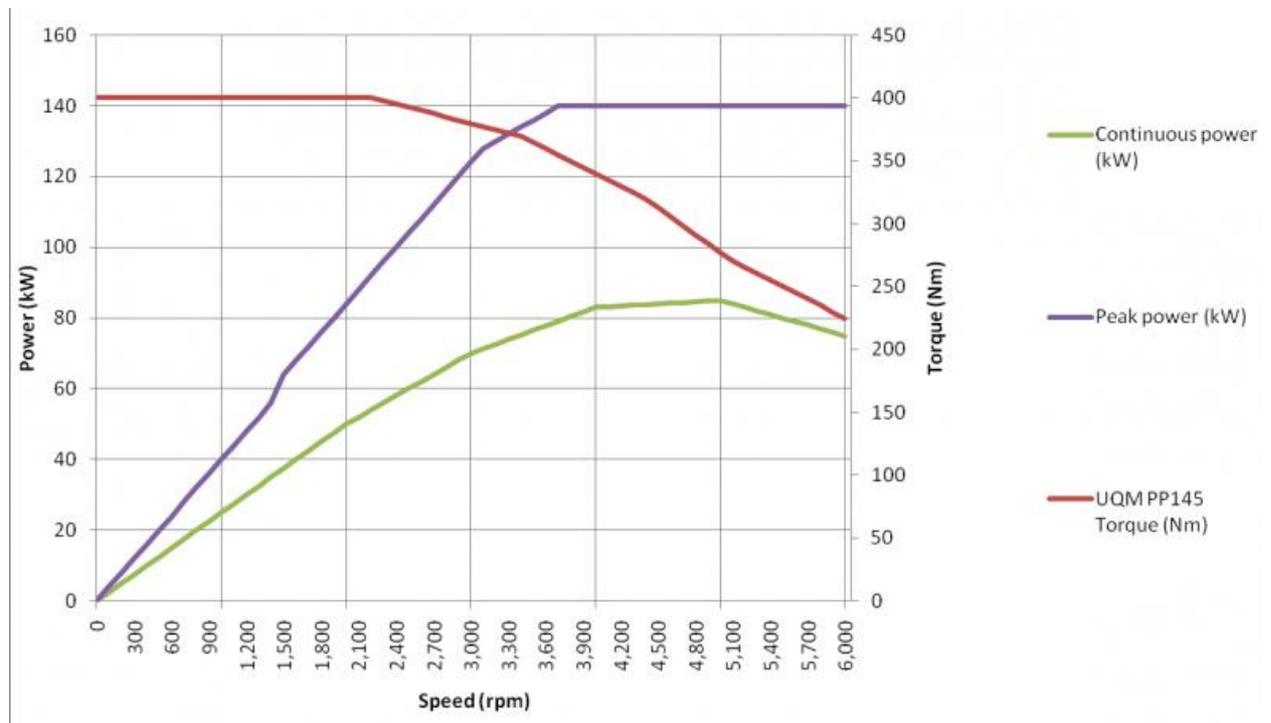


Figura 29: curvas para un motor eléctrico  
Fuente: periódico EL PAÍS.

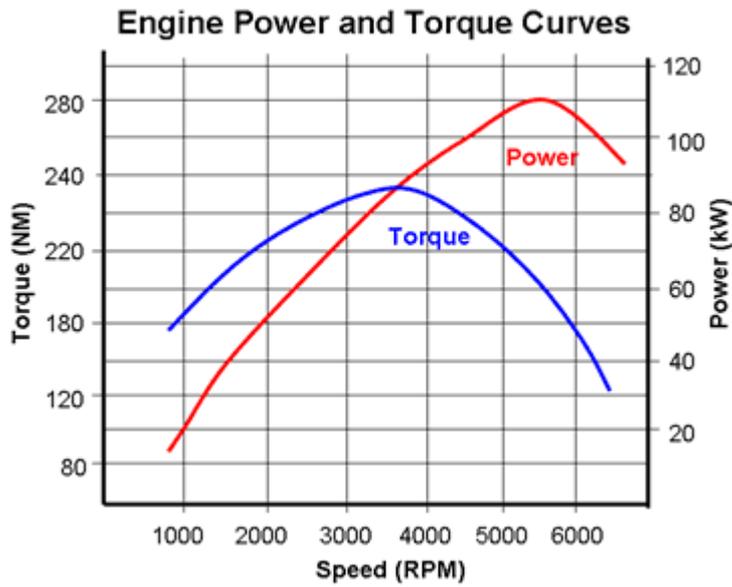


Figura 30: curvas para un motor de combustión.  
Fuente: periódico EL PAÍS.

Como se observa el par es mucho más constante para los vehículos eléctricos. Este bloque simplemente accede a un mapa precargado y coge los valores del motor

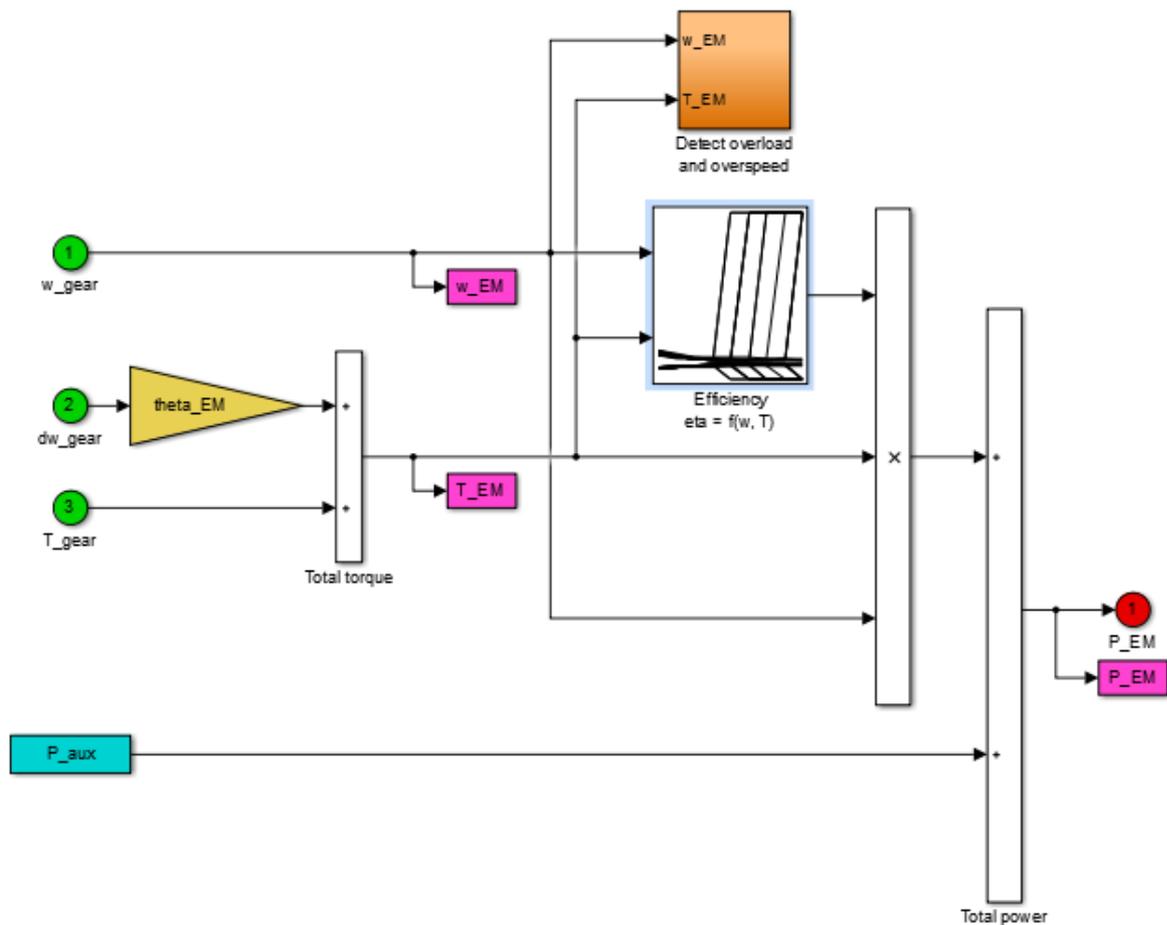


Figura 31: modelo del motor eléctrico.

Como se observa el modelo accede al mapa en función de la velocidad, aceleración y par

demandado por el vehículo. Con estos datos busca en el mapa la potencia del motor.

## BATERÍA:

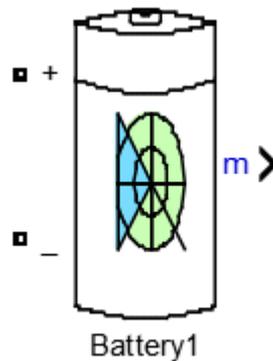


Figura 32: modelo de la batería.

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.

Para este bloque he utilizado el bloque de batería de Simulink, ya que es un modelo muy bueno. Este bloque implementa un modelo genérico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables.

El circuito equivalente de la batería es:

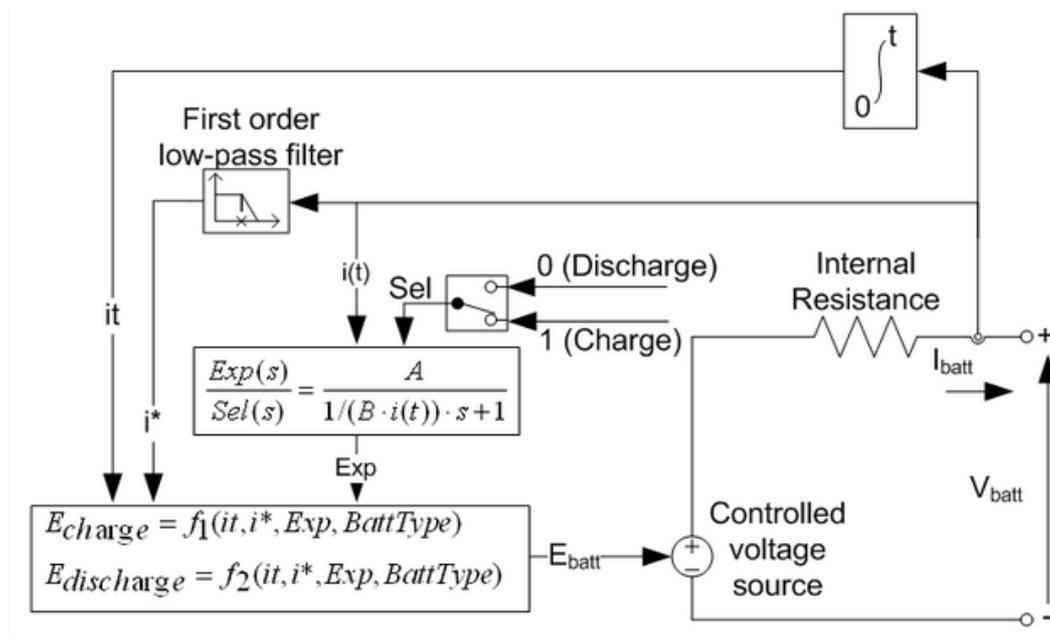


Figura 33: circuito equivalente de la batería.  
Fuente: Matlab.

Para nuestro modelo, elegiremos la opción de batería de ion-litio, cuyo modelo de carga y descargas es:

### Discharge Model ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

### Charge Model ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it).$$

Figura 34: modelo de carga y descarga en la batería.  
Fuente: Matlab.

Donde:

$E_{\text{Batt}}$  = Nonlinear voltage (V)

$E_0$  = Constant voltage (V)

$\text{Exp}(s)$  = Exponential zone dynamics (V)

$\text{Sel}(s)$  = Represents the battery mode.  $\text{Sel}(s) = 0$  during battery discharge,  $\text{Sel}(s) = 1$  during battery charging.

$K$  = Polarization constant ( $\text{Ah}^{-1}$ ) or Polarization resistance (Ohms)

$i^*$  = Low frequency current dynamics (A)

$i$  = Battery current (A)

$it$  = Extracted capacity (Ah)

$Q$  = Maximum battery capacity (Ah)

$A$  = Exponential voltage (V)

$B$  = Exponential capacity ( $\text{Ah}^{-1}$ )

Cogiendo los parámetros obtenidos por el fabricante de nuestra batería y metiéndolos en nuestro modelo obtenemos:

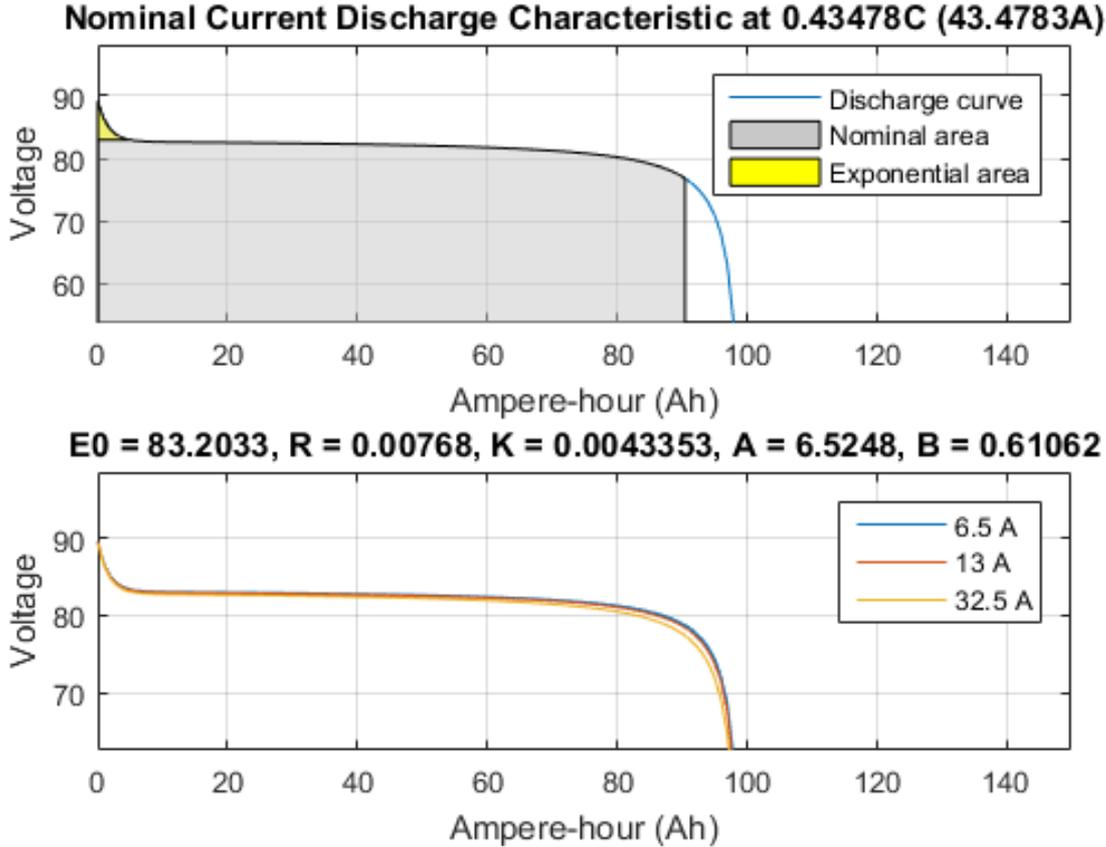


Figura 35: curvas de carga y descarga de la batería.

## SUPERCONDENSADOR:

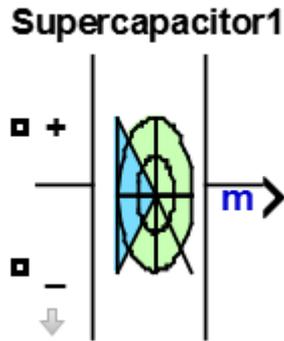


Figura 36: modelo del supercondensador.

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.

Para este modelo he utilizado el de Simulink también.

El supercondensador implementa un modelo parametrizado para representar los más populares tipos de supercondensador. El modelo equivalente es:

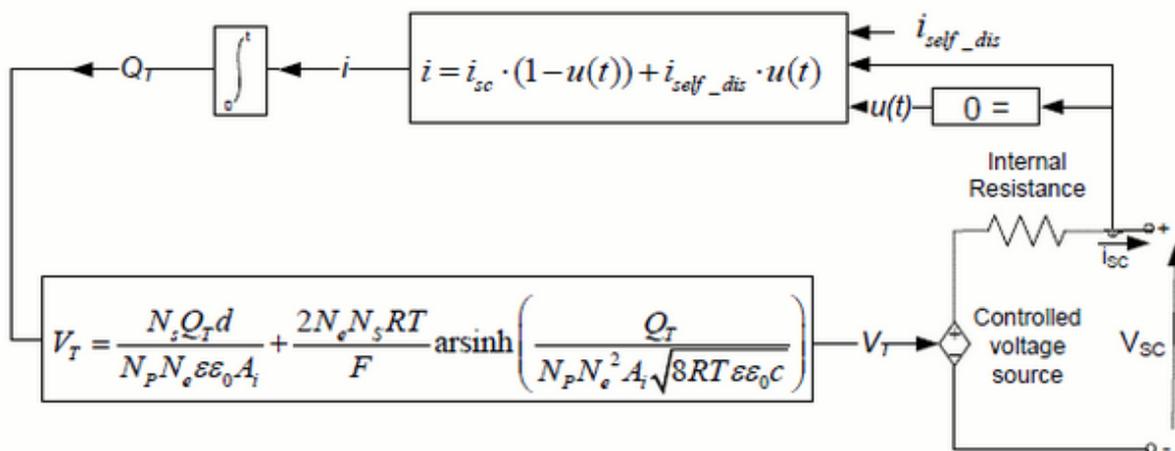


Figura 37: circuito equivalente supercondensador.  
Fuente: Matlab

El voltaje del supercondensador se calcula como:

$$V_{SC} = \frac{N_s Q_s d}{N_p N_e \epsilon \epsilon_0 A_s} + \frac{2N_s N_e RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{Q_T}{N_p N_e^2 A_s \sqrt{8RT \epsilon \epsilon_0 c}} \right) - R_{SC} \cdot i_{SC}$$

Con:

$$Q_T = \int i_{SC} dt$$

Para representar el fenómeno de auto descarga del supercondensador se modifica cuando  $I_{sc} = 0$  como:

$$Q_T = \int i_{self\_dis} dt$$

Donde:

$$i_{self\_dis} = \begin{cases} \frac{C_T \alpha_1}{1 + sR_{SC} C_T} & \text{if } t - t_{oc} \leq t_3 \\ \frac{C_T \alpha_2}{1 + sR_{SC} C_T} & \text{if } t_3 < t - t_{oc} \leq t_4 \\ \frac{C_T \alpha_3}{1 + sR_{SC} C_T} & \text{if } t - t_{oc} > t_4 \end{cases}$$

Donde las variables utilizadas son:

$A_i$	Interfacial area between electrodes and electrolyte (m <sup>2</sup> )
$c$	Molar concentration (mol m <sup>-3</sup> ) equal to $c = 1/(8NAr^3)$
$F$	Faraday constant
$i_{sc}$	Supercapacitor current (A)
$V_{sc}$	Supercapacitor voltage (V)
$C_T$	Total capacitance (F)
$R_{sc}$	Total resistance (ohms)
$N_e$	Number of layers of electrodes
$NA$	Avogadro constant
$N_p$	Number of parallel supercapacitors
$N_s$	Number of series supercapacitors
$QT$	Electric charge (C)
$R$	Ideal gas constant
$d$	Molecular radius
$T$	Operating temperature (K)
$\epsilon$	Permittivity of material
$\epsilon_0$	Permittivity of free space

## IGBT:

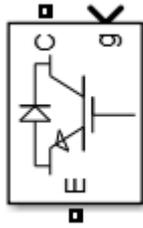


Figura 38: transistor IGBT.

El transistor bipolar de puerta aislada (conocido por la sigla IGBT, del inglés *Insulated Gate Bipolar Transistor*) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT.

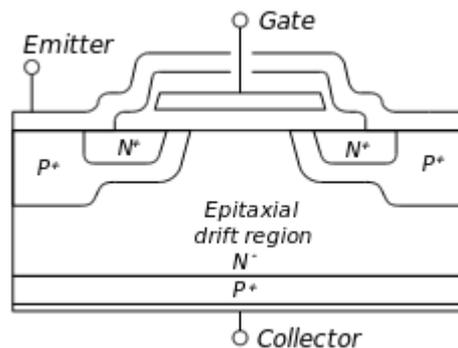


Figura 39: esquema transistor IGBT.

En este trabajo se utilizan los IGBT como interruptores para, en función de los programas de control, utilizar energía de la batería o del supercondensador según se desee.

## CAPITULO 4: ESTATEGIAS 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 pueden 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.

### 4.1. Control heurístico

La implementación del control heurístico se realiza cuando hay más de una fuente de potencia, debido a que si solo hubiera una no haría falta controlar nada. La potencia demandada sería la que correspondiera en cada instante al elemento concreto que esté abasteciendo.

Puesto que nuestro sistema consta de una batería y un supercondensador, nuestro requisito será que la batería gaste la menor energía posible.

Para la implantación de este control es necesario contar con los datos proporcionados por la ECU de la batería y el supercondensador, estos datos vienen proporcionados por el sistema que viene de fábrica y son: la tensión de ambas fuentes y las corrientes de entrada y salida de ellas.

Hay que tener en cuenta que la capacidad de entregar energía por parte de la batería es mucho mayor que la del supercondensador, por tanto, la fuente principal de entrega de potencia es la batería y el supercondensador es una ayuda para entrega de potencia para aquellos casos que la batería no pueda llegar o para entregas de potencia muy baja en la que la batería no sea necesaria.

En el control heurístico lo he programado de forma que siempre que se pueda gaste la energía del supercondensador para ahorrar al máximo la carga de la batería, ya que está programado también que toda la energía recuperada por el frenado regenerativo sea aprovechado en medida que se permita, por el supercondensador primero y la sobrante hacia la batería.

Para realizar este control, hemos tenido en cuenta que la batería no se puede descargar en ningún caso por motivos de seguridad de la misma, ya que descargas completas de las baterías provoca deterioro en su capacidad y su durabilidad.

Por tanto uno de los requisitos es que la capacidad de la batería no baje del 10%.

Otro requisito es que el condensador no se descargue del todo, aunque los condensadores no tienen problemas como las baterías a nivel de descarga, puede provocar corrientes muy elevadas que no son nada recomendables para todo el sistema. Una solución sería montar un circuito de potencia tipo boost, pero no aporta ninguna mejora tangible para un sistema de este calibre, sería aumentar el costo para no obtener ningún beneficio.

Voy a proceder a explicar la función de control en Matlab:

La función tiene como entradas la corriente demandada por el vehículo al motor para cumplir con la demanda de la potencia del vehículo. También tiene como entradas el SOC tanto de la batería como del supercondensador.

El SOC es el porcentaje que la carga que tienen estos dispositivos.

Lo primero que hacemos es distinguir si la batería tiene carga o no.

Si tiene carga, es decir, más del 10% de carga podemos realizar un control del sistema.

Siempre y cuando la corriente sea negativa (frenado regenerativo) y quepa en el condensador la energía será almacenada en el condensador, una vez llenado, la batería será el destino final de esta energía.

Para corrientes positivas, es decir, demanda de energía por el vehículo el control priorizará el uso de la energía por el supercondensador hasta que no sea posible por la demanda requerida.

A continuación se expone el programa de control:

```
%%idc =u1
%%SOCc= u2
%%socB= u3

function [y,x]= fcn(u)

    if u(3) < 100 && u(3)> 10
        if u(1) < 0 && u(2) > 5 && u(2) < 100
            y=0;
            x=1;

        elseif u(1) < 0 && u(2) >= 100
            y=1;
            x=0;

        elseif u(1) >= 0 && u(2) > 5 && u(2) < 100
            y=0;
            x=1;

        elseif u(1) >= 0 && u(2) <= 5
            y=1;
            x=0;
        else
            y=0;
            x=0;
        end
    else
        y=0;
        x=0;
    end

end
```

#### 4.1.1 Ciclo NEDC:

A continuación voy a presentar los resultados del experimento con el ciclo NEDC:

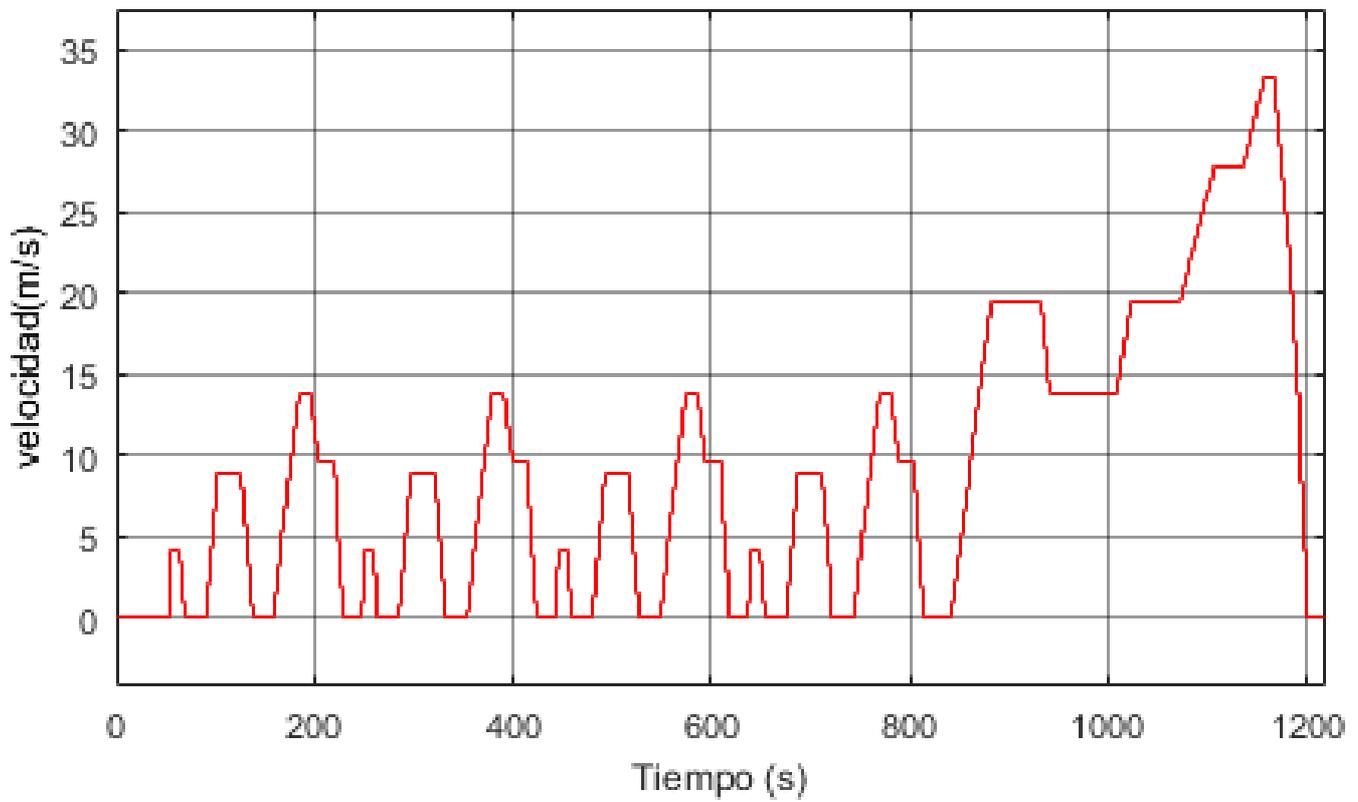


Figura 40: velocidad de referencia para el experimento con control heurístico NEDC.

Fuente: Simulink.

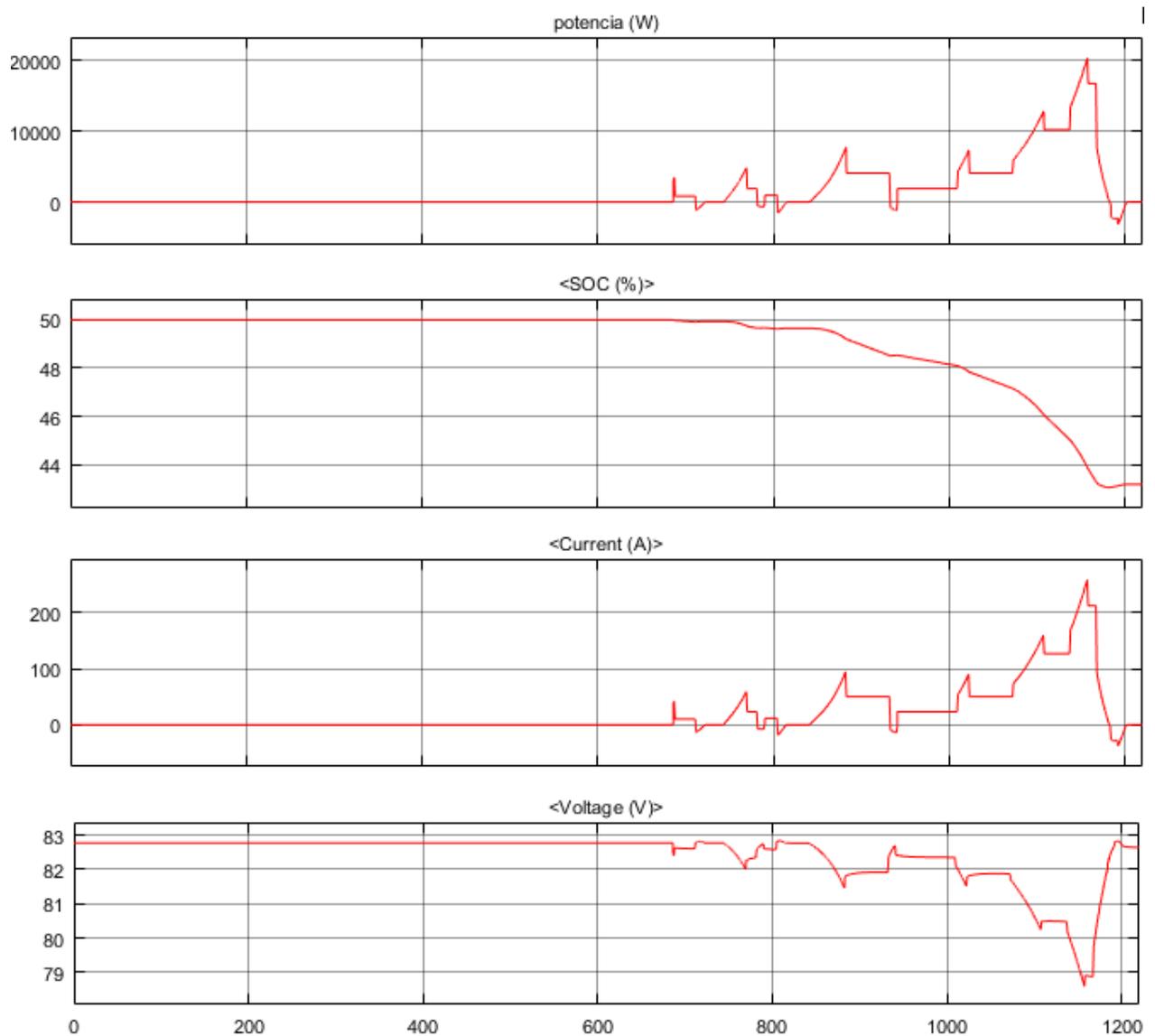


Figura 41: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en NEDC.

Fuente: Simulink.

En estas cuatro gráficas se puede observar como no se utiliza la energía de la batería hasta más de la mitad del experimento y esto es debido a que no es necesario utilizar esta energía porque con la del supercondensador es suficiente.

Como se puede observar la potencia entregada por la batería es de 20 kilowatios pico para velocidades cercanas a 120 km/h lo cual es un valor promedio dentro de los vehículos eléctricos.

La entrega de corriente máxima es casi 260 amperios, lo cual es un valor bastante aceptable de entrega de energía y sin riesgo para la batería ya que como se vio en su apartado puede entregar sin problema hasta 300 amperios de corriente.

Las ligeras oscilaciones de tensión en la batería son normales ya que en la zona de trabajo de la batería el sistema el voltaje oscila en función de la energía entregada.

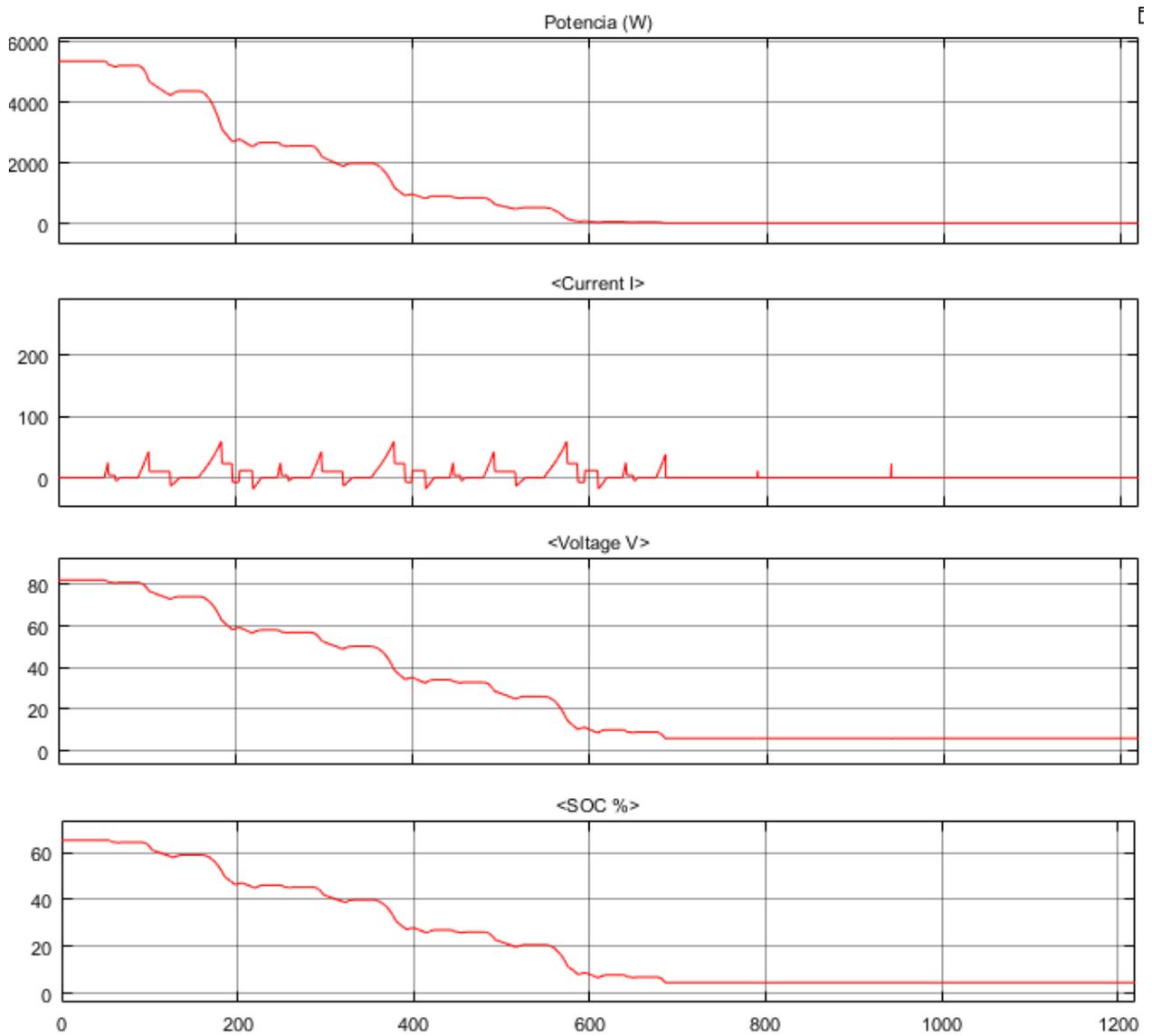


Figura 42: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en NEDC.

Fuente: Simulink.

Como se puede observar el supercondensador va entregando toda la potencia que tiene almacenada hasta que finalmente se descarga completamente.

Los rangos en los cuales la corriente es negativa es cuando se utiliza la frenada regenerativa para cargar el condensador.

Como se puede ver al utilizar un coche ligero como es el FOX, la potencia en velocidades bajas también es baja.

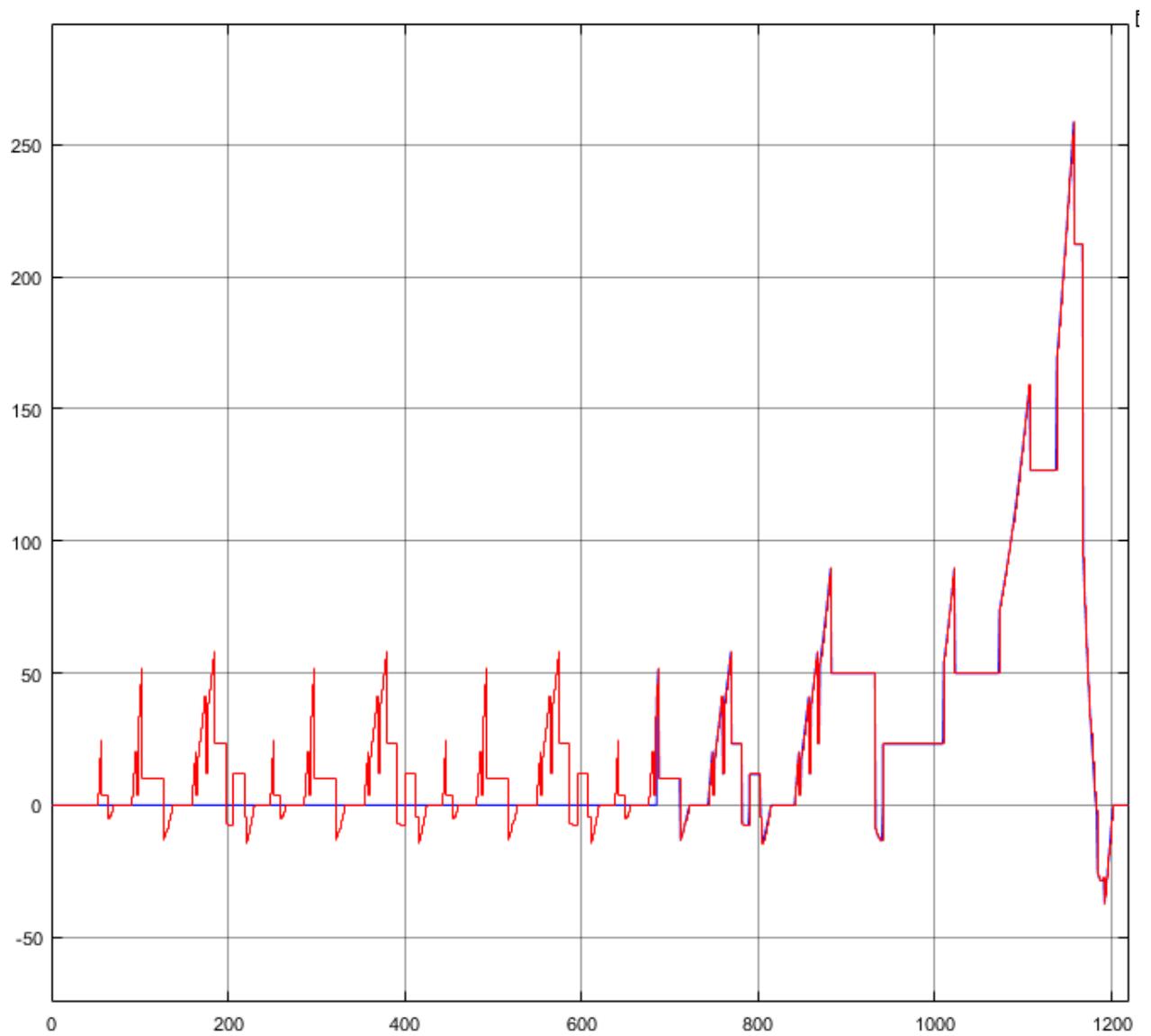


Figura 43: potencia total (rojo) vs potencia entregada por la batería (azul).

Fuente: Simulink.

Como se puede ver la batería no entrega nada de potencia hasta más de la mitad del experimento, que es donde asume toda la carga.

#### 4.1.2 Ciclo USA CITY II:

A continuación voy a presentar los resultados del experimento con el ciclo USA CITY II:

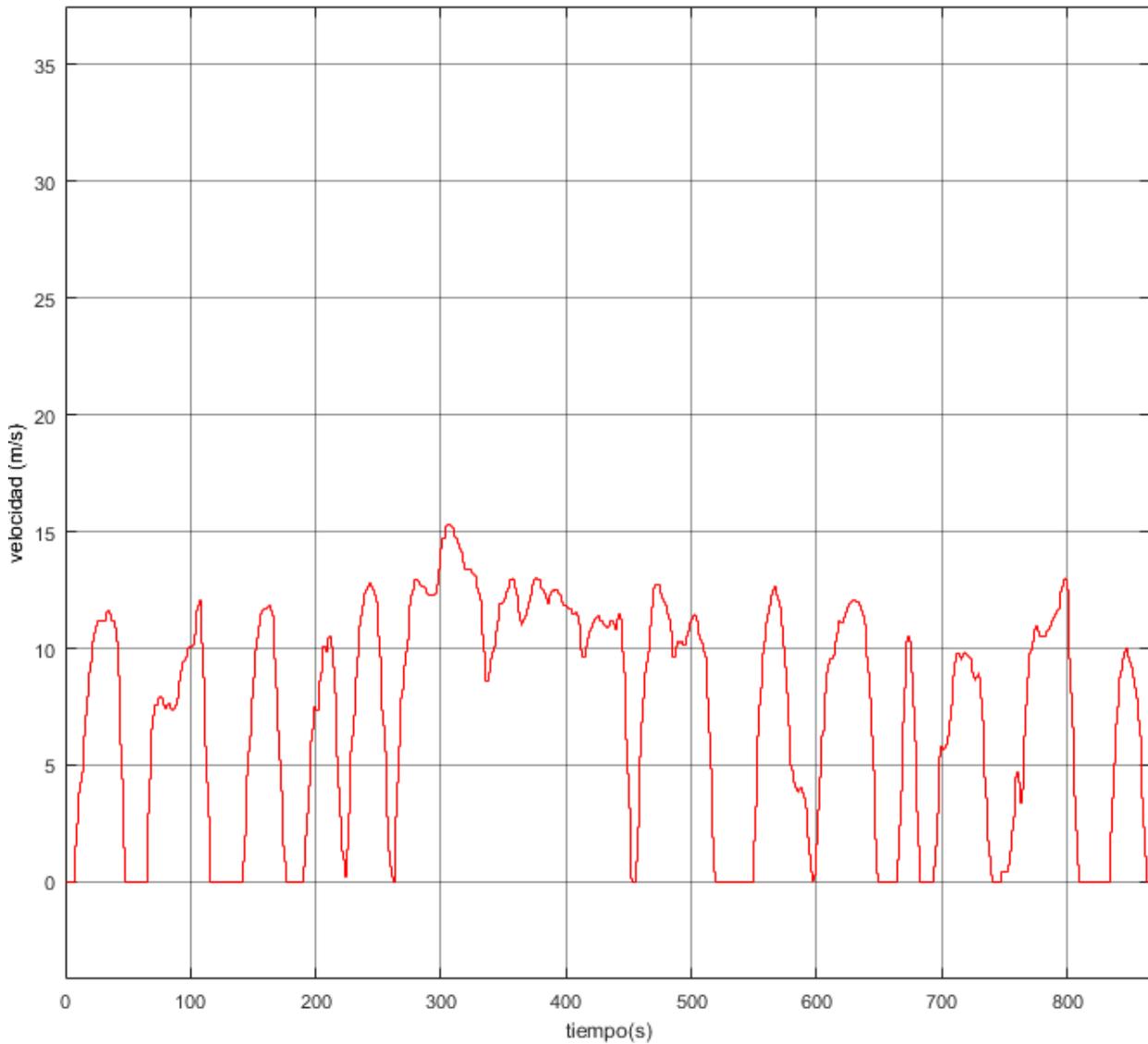


Figura 44: velocidad en ciclo USA CITY II.

Fuente: Simulink.

Este es un ciclo principalmente urbano pero con una conducción bastante más brusca que el ciclo NEDC y eso se nota en las fuertes aceleraciones que sufre el vehículo.

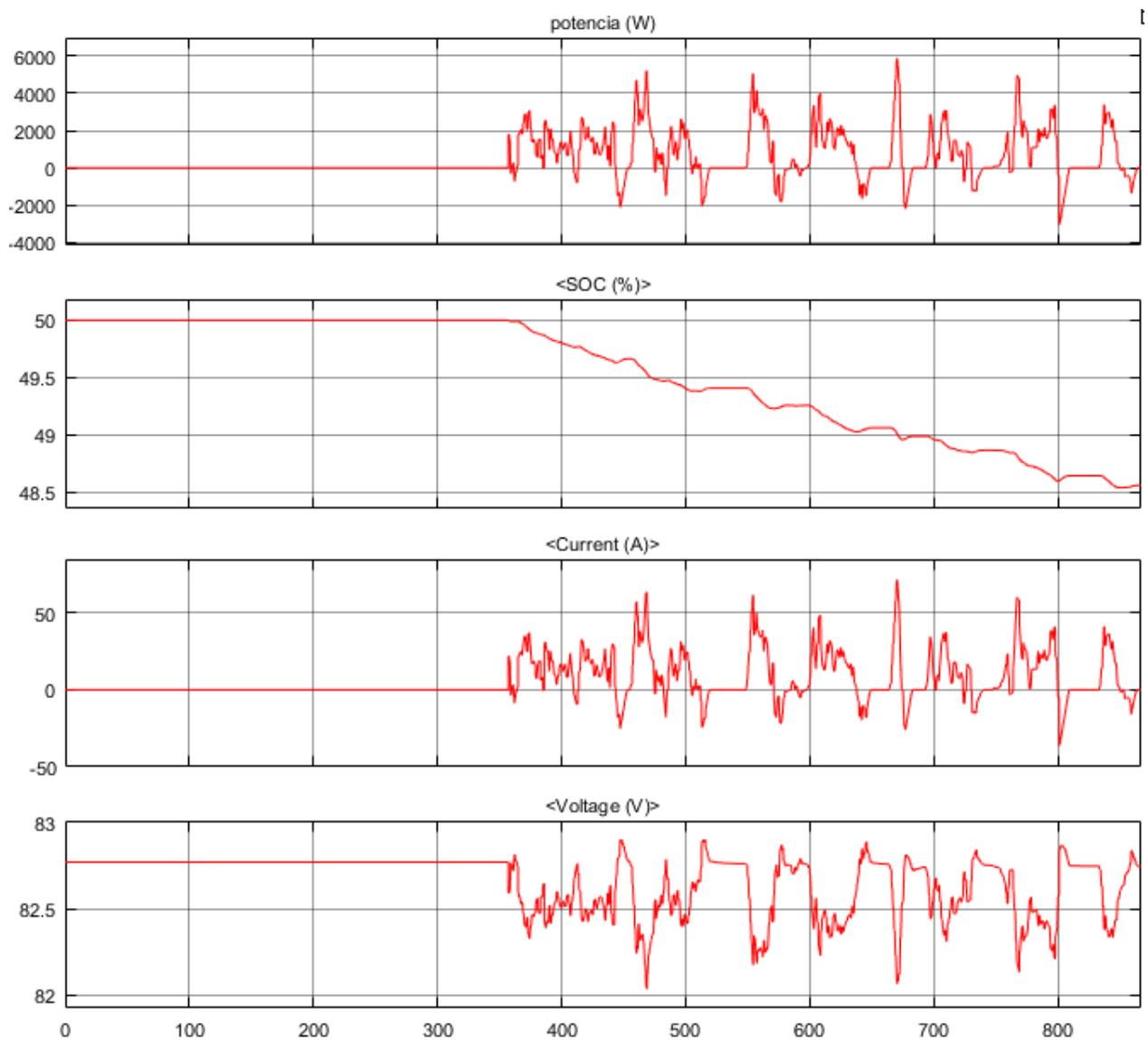


Figura 45: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

En estas cuatro gráficas se puede observar como no se utiliza la energía de la batería hasta un poco antes de la mitad del experimento y esto es debido a que no es necesario utilizar esta energía porque con la del supercondensador es suficiente.

Como se puede observar la potencia entregada por la batería es de 6 kilovatios pico para velocidades cercanas a 55 km/h lo cual es un valor promedio dentro de los vehículos eléctricos.

La entrega de corriente máxima es casi 55 amperios, lo cual es un valor bastante aceptable de entrega de energía y sin riesgo para la batería ya que como se vio en su apartado puede entregar sin problema hasta 300 amperios de corriente.

Las ligeras oscilaciones de tensión en la batería son normales ya que en la zona de trabajo de la batería el sistema el voltaje oscila en función de la energía entregada.

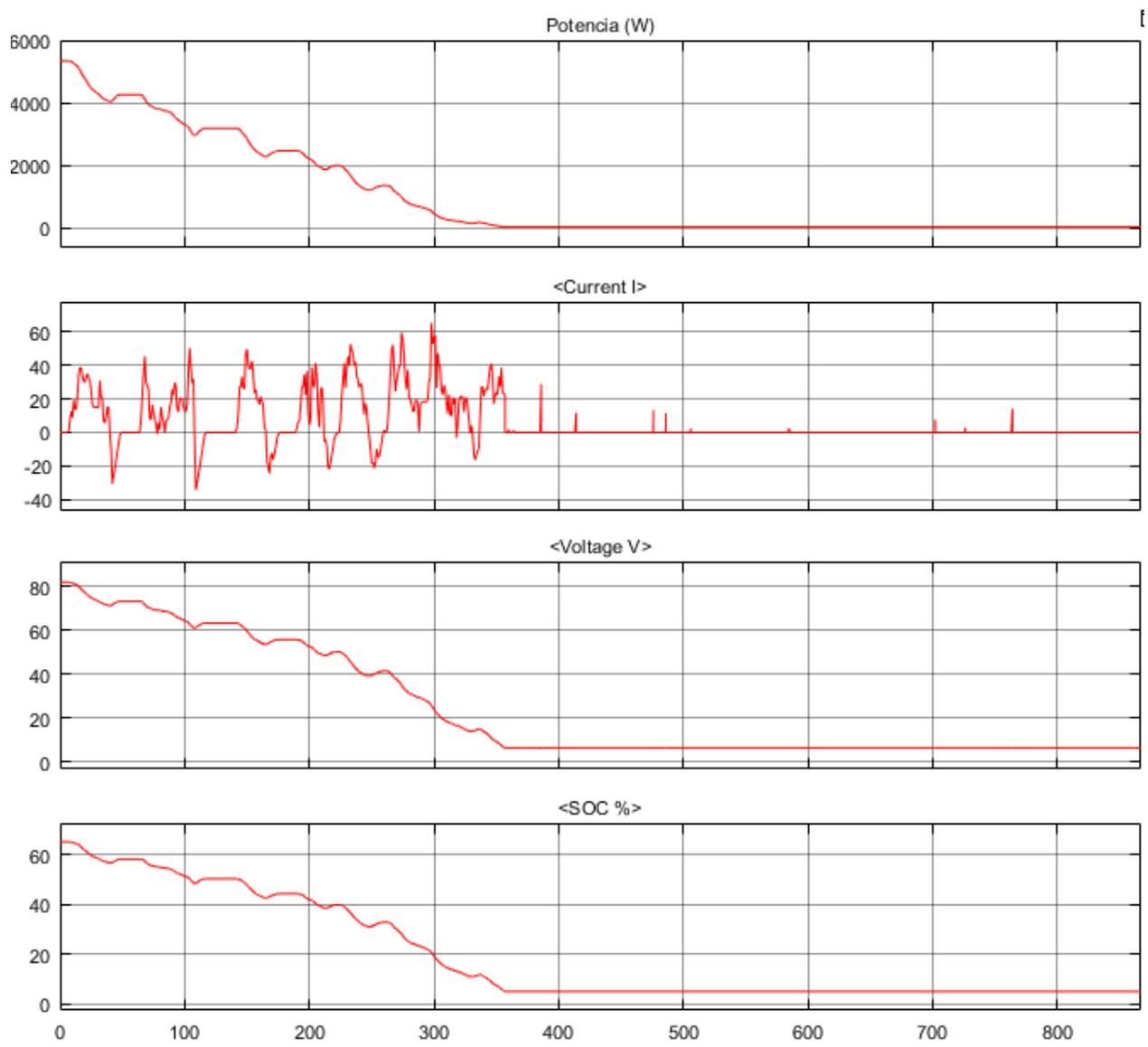
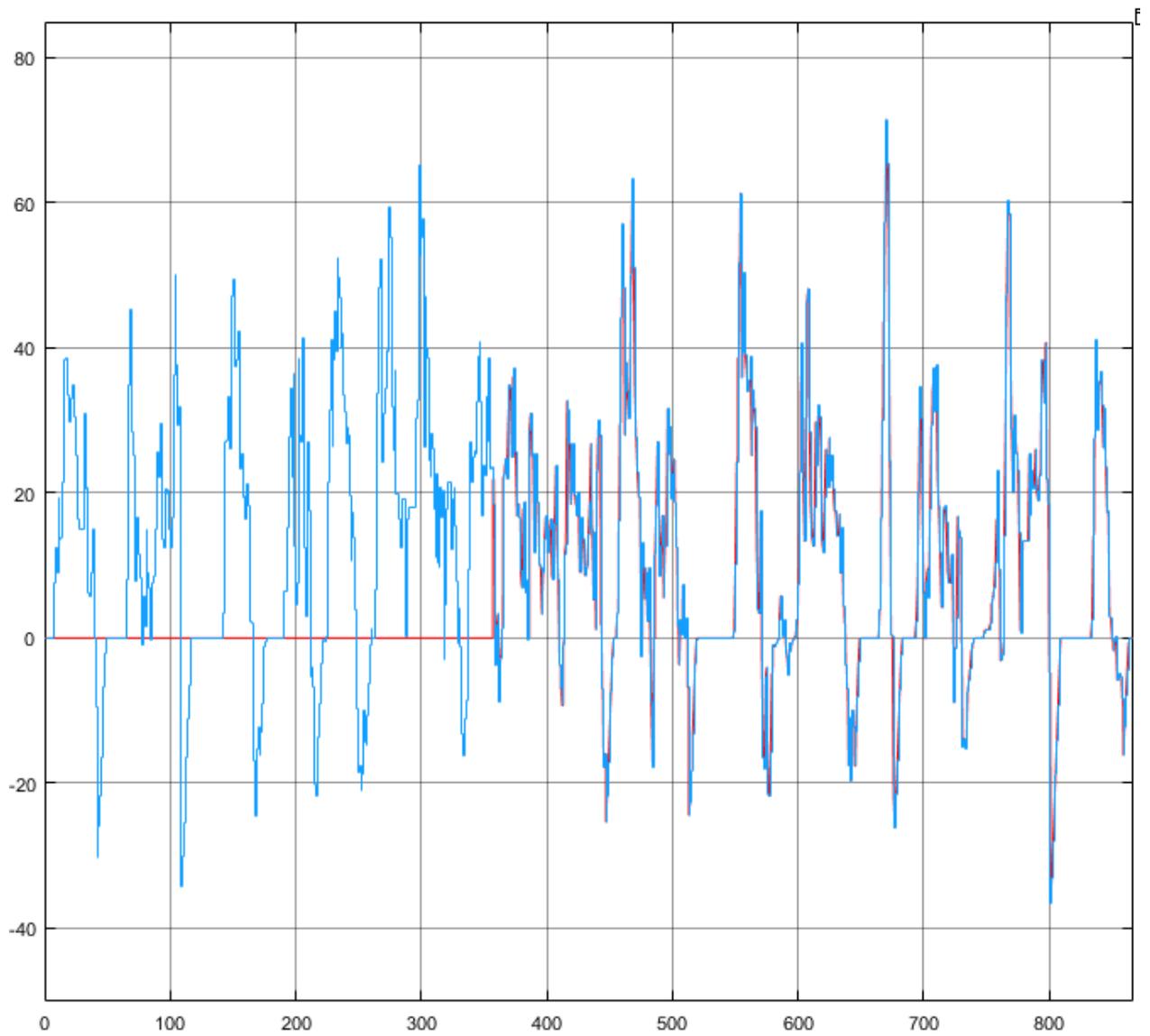


Figura 46: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

Se hace uso del condensador hasta que no queda capacidad en él.



*Figura 47: potencia total (azul) vs potencia entregada por la batería (rojo).*

*Fuente: Simulink.*

Se puede ver que mientras el condensador tiene capacidad la batería no aporta energía. Después de esto, es la batería la que asume toda la carga.

### 4.1.3 Ciclo USA FTP-75:

A continuación voy a presentar los resultados del experimento con el ciclo USA FTP-75 (ciclo con pequeños tramos de velocidades altas y principalmente ciudad):

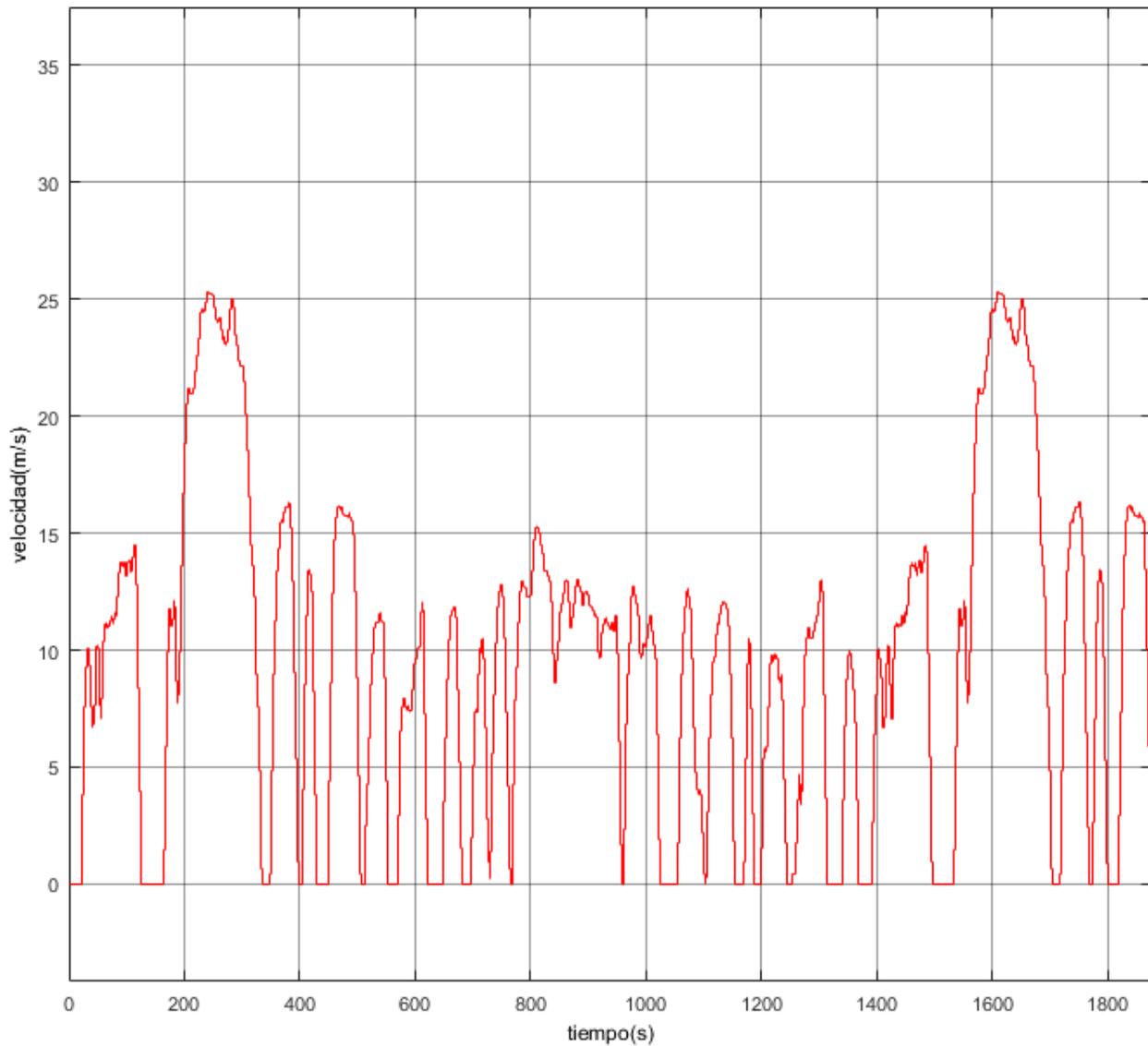


Figura 48: velocidad de referencia para el experimento con control heurístico USA FTP-75.

Fuente: Simulink.

Este es un ciclo más agresivo aún que el anterior y con velocidades superiores. Por tanto se espera una descarga más rápida de los elementos que en los casos anteriores.

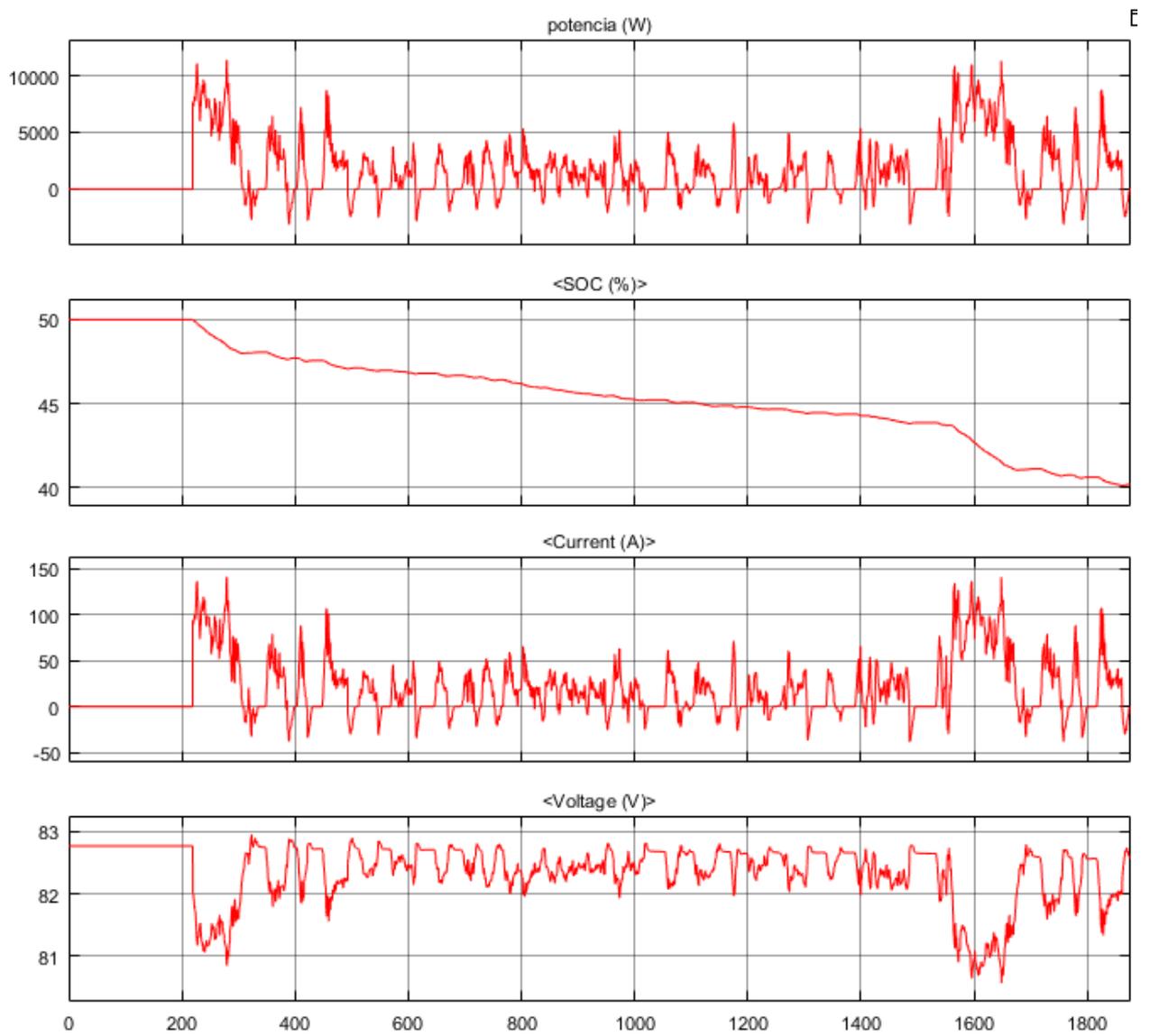


Figura 49: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en USA FTP-75

Fuente: Simulink

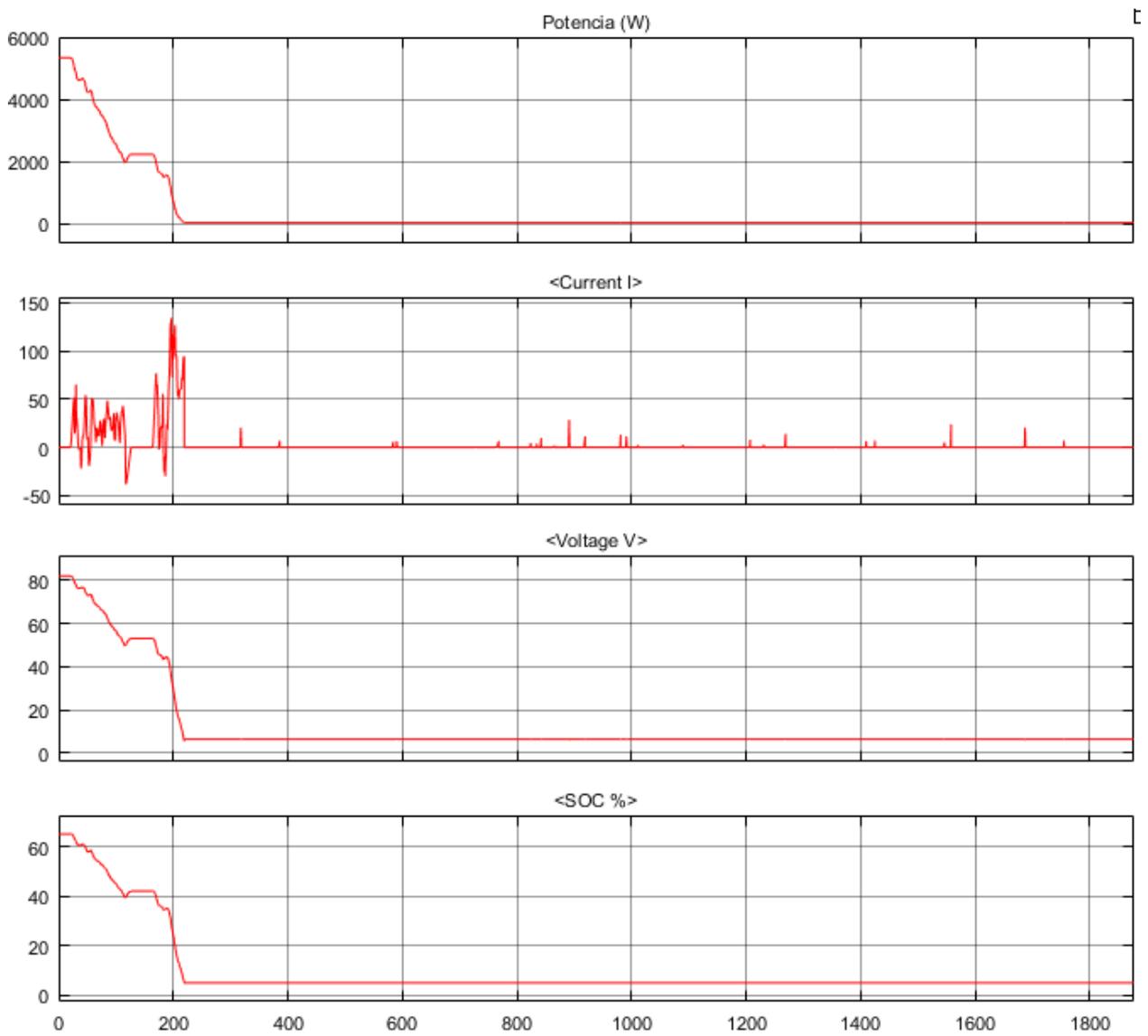


Figura 50: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en USA FTP-75

Fuente: Simulink

Como se observa en ambas figuras, el condensador se descarga casi al principio de la simulación y esto es debido a la conducción más agresiva del ciclo.

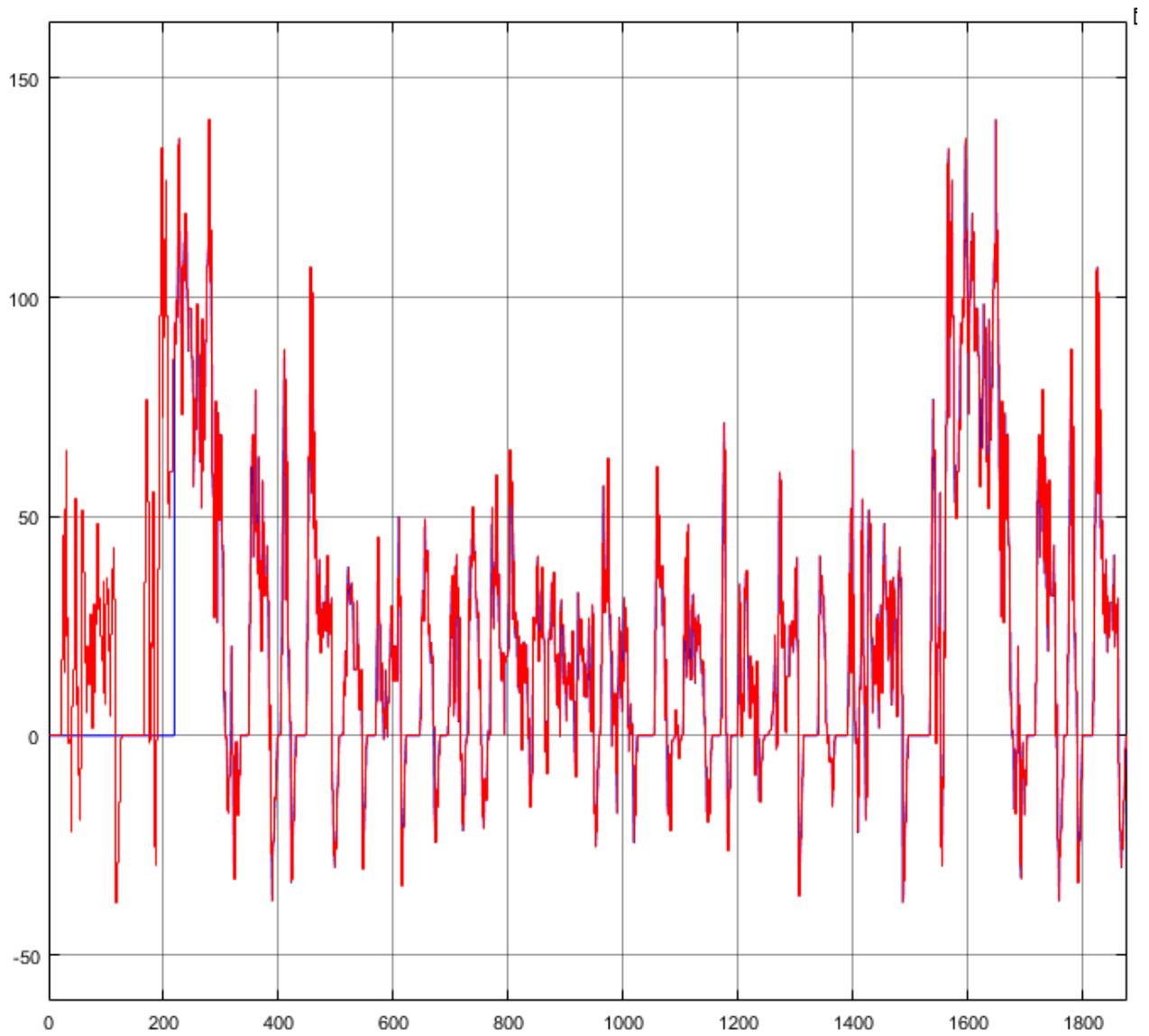


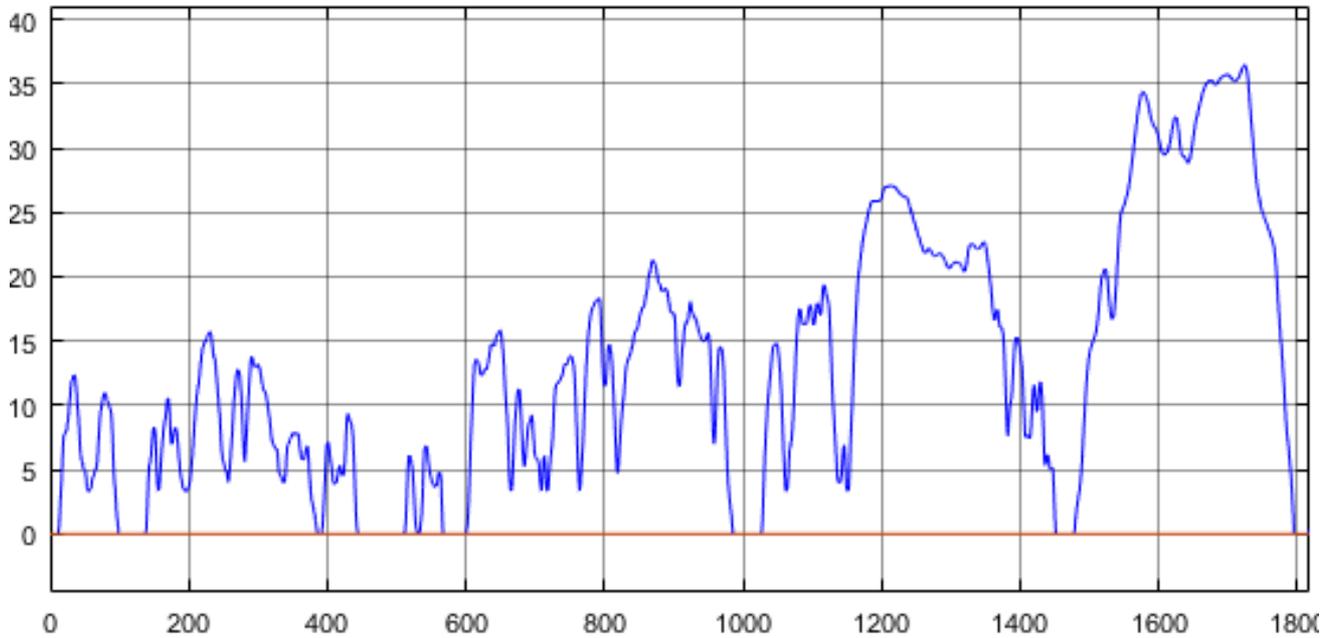
Figura 51: potencia total (rojo) vs potencia entregada por la batería (azul).

Fuente: Simulink.

Como es lógico, en este control heurístico el sistema cuando se gasta el condensador saca toda la energía de la batería.

#### 4.1.4 Ciclo WLTP:

Vamos a utilizar este último ciclo debido a que es la tendencia actual para sustituir al ciclo NEDC. Este ciclo es más preciso para el cálculo de los consumos y emisiones en los vehículos.



*Figura 52: velocidad de referencia para el experimento con control heurístico NEDC.*

*Fuente: Simulink.*

Es un ciclo que llega a velocidades más altas y con un perfil de aceleraciones bastante alto. Alcanza velocidades de 35 m/s (125 km/h).

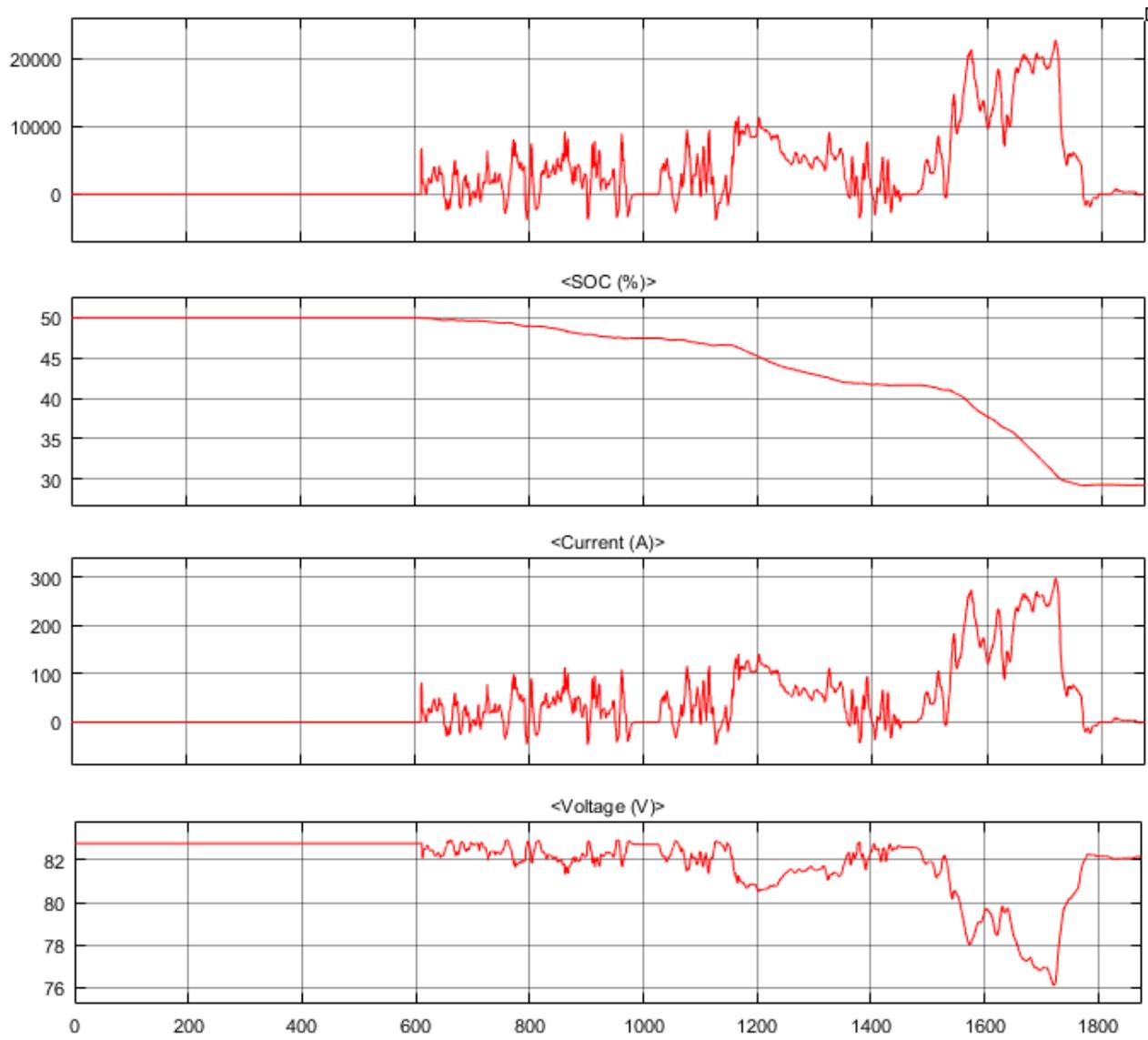


Figura 53: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en WLTP

Fuente: Simulink

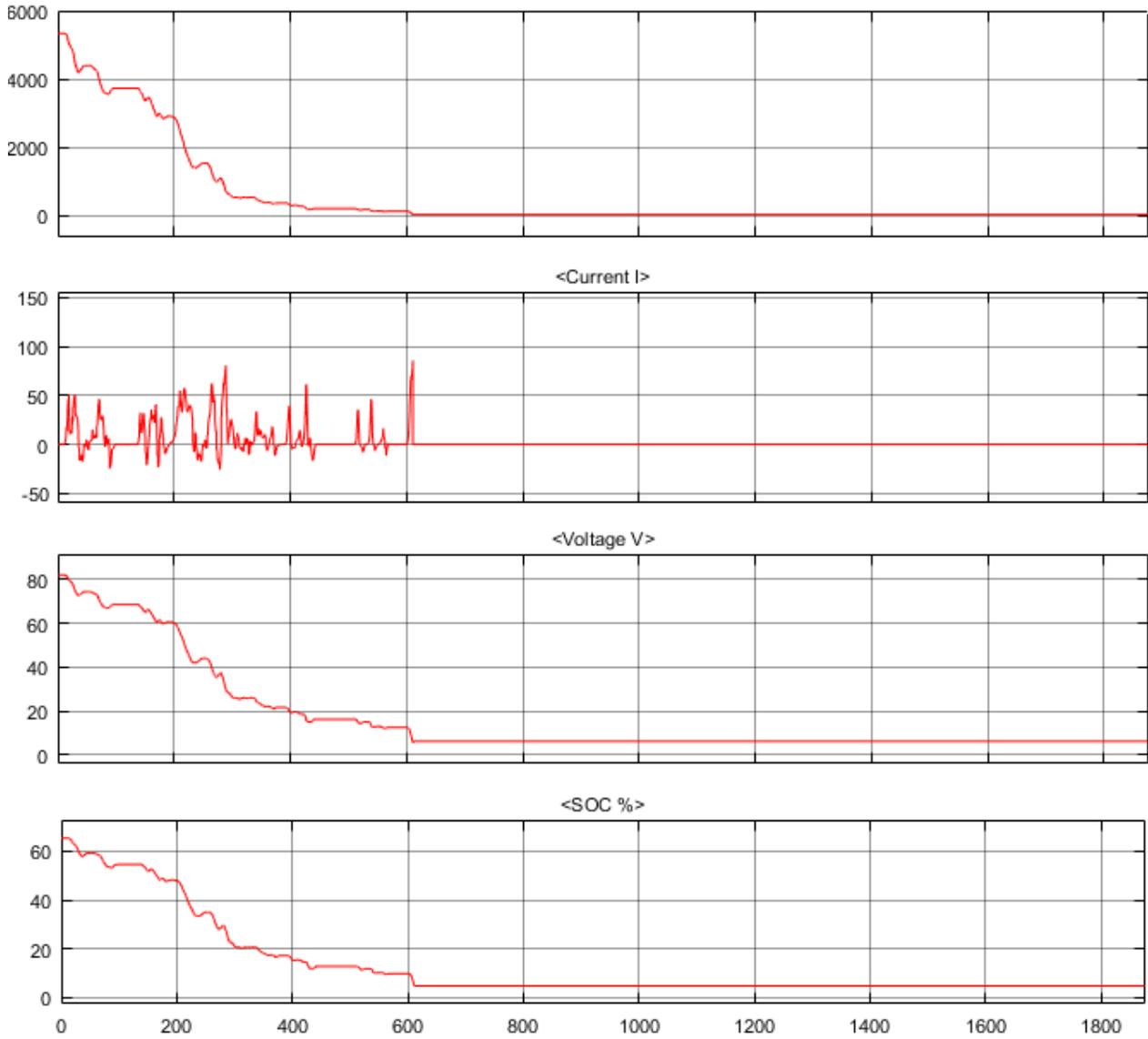
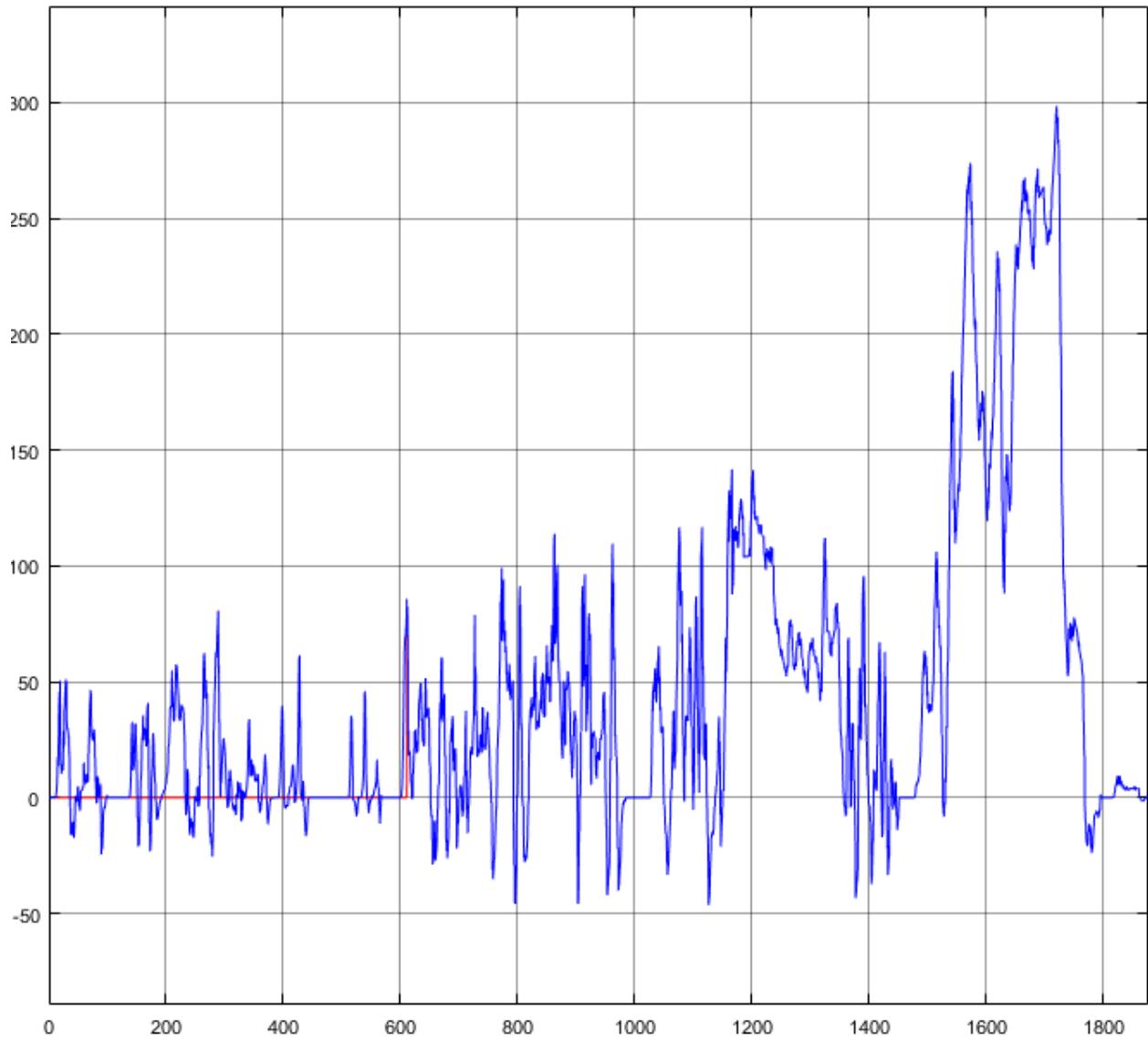


Figura 54: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en WLTP.

Fuente: Simulink



*Figura 55: potencia total (azul) vs potencia entregada por la batería (rojo).*

*Fuente: Simulink.*

## 4.2. Control para reducción RMS de la corriente en la batería.

Este control se basa en reducir la corriente suministrada por la batería para que para alcanzar la misma velocidad, la corriente entregada por la batería en las aceleraciones sea menor, y por tanto las baterías al utilizar menor potencia su durabilidad será mayor.

El controlador se basa en la velocidad del vehículo, cuando el vehículo está parado el sistema de baterías recarga el pack del supercondensador, para ello se utiliza una velocidad de carga constante que es equivalente a la corriente media suministrada por el vehículo en un ciclo de conducción cuando no se tiene supercondensador.

Una vez el vehículo comienza el movimiento, sabiendo cual es la potencia demandada se hace un reparto equitativo basándose en la corriente demandada por el vehículo.

Debido a que ambos equipos tienen capacidad suficiente de suministro de corriente para completar el ciclo, no se han utilizado restricciones sobre el amperaje utilizado.

También se implementa el frenado regenerativo, siendo toda esta energía absorbida por el supercondensador.

Se denomina valor eficaz al valor cuadrático medio de una magnitud eléctrica. El concepto de valor eficaz se utiliza especialmente para estudiar las formas de onda periódicas, a pesar de ser aplicable a todas las formas de onda, constantes o no.

En ocasiones se denomina con el extranjerismo RMS (del inglés, *root mean square*).

A continuación se expone el programa de control:

```
%%idc = u1
%%SOCC = u2
%%socB = u3
%%v = u4
%%a = u5
%%y=bateria
%%x=sc
function [y,x]= fcn(u)
    if u(4)== 0
        if u(2)== 100
            y=0;
            x=0;
        else
            y=20.48;
            x=-20.48;
        end
    else
        if u(1)>0
            if u(2)< 5
                y=u(1);
                x=0;
            else
                y=0.4*u(1);
                x=0.6*u(1);
            end
        else
            y=0;
            x=u(1);
        end
    end
end
```

#### 4.2.1 Ciclo NEDC:

A continuación voy a exponer los resultados en el ciclo NEDC:

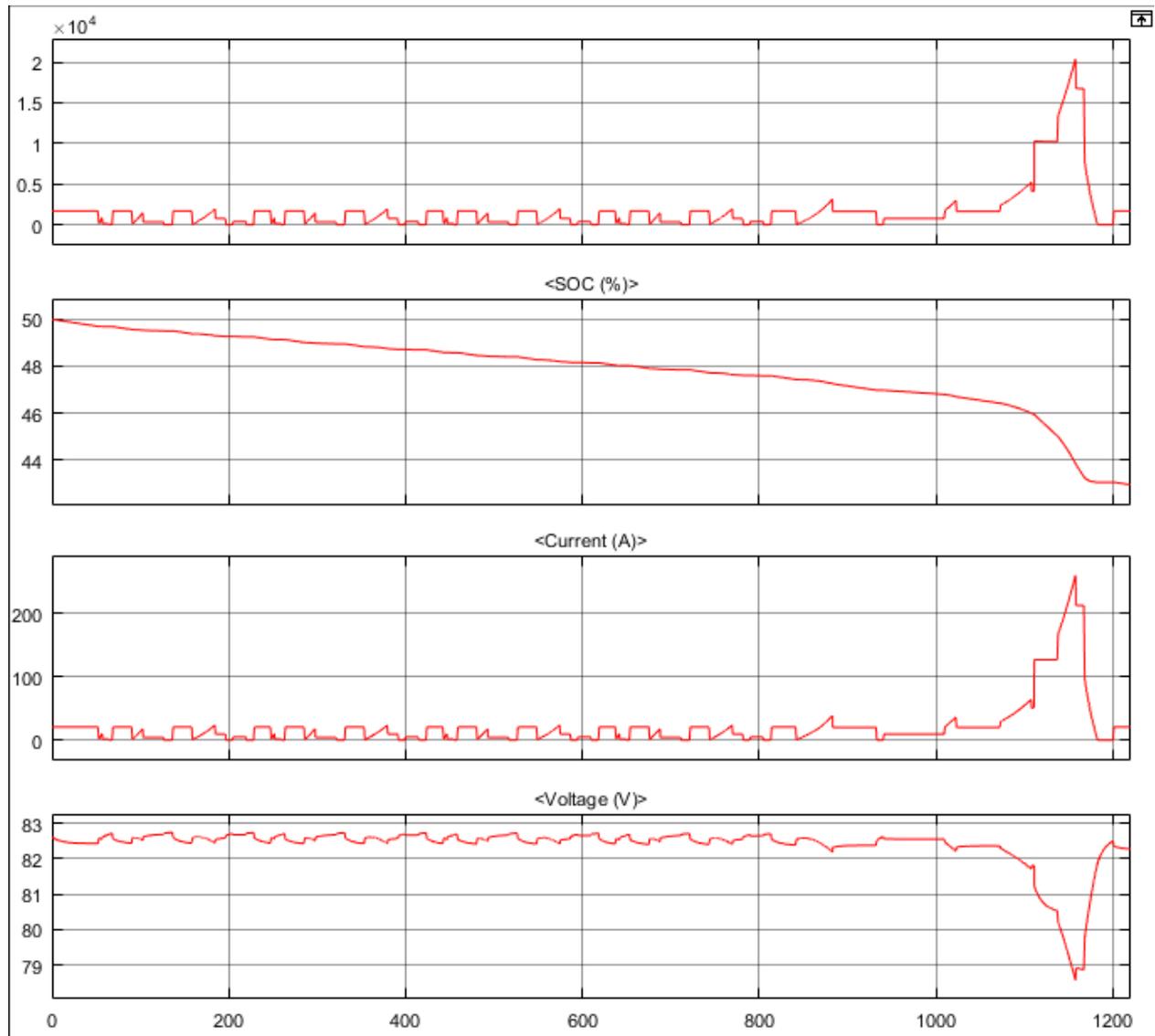


Figura 52: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en NEDC.

Fuente: Simulink.

Como se puede observar en este control se utiliza energía de la batería durante todo el experimento a diferencia del control anterior. Si observamos en el uso de energía es bajo hasta el punto en el que se adentra en el tramo de autovía. En el cual, debido a que el condensador no tiene capacidad de almacenaje suficiente, se acaba gastando.

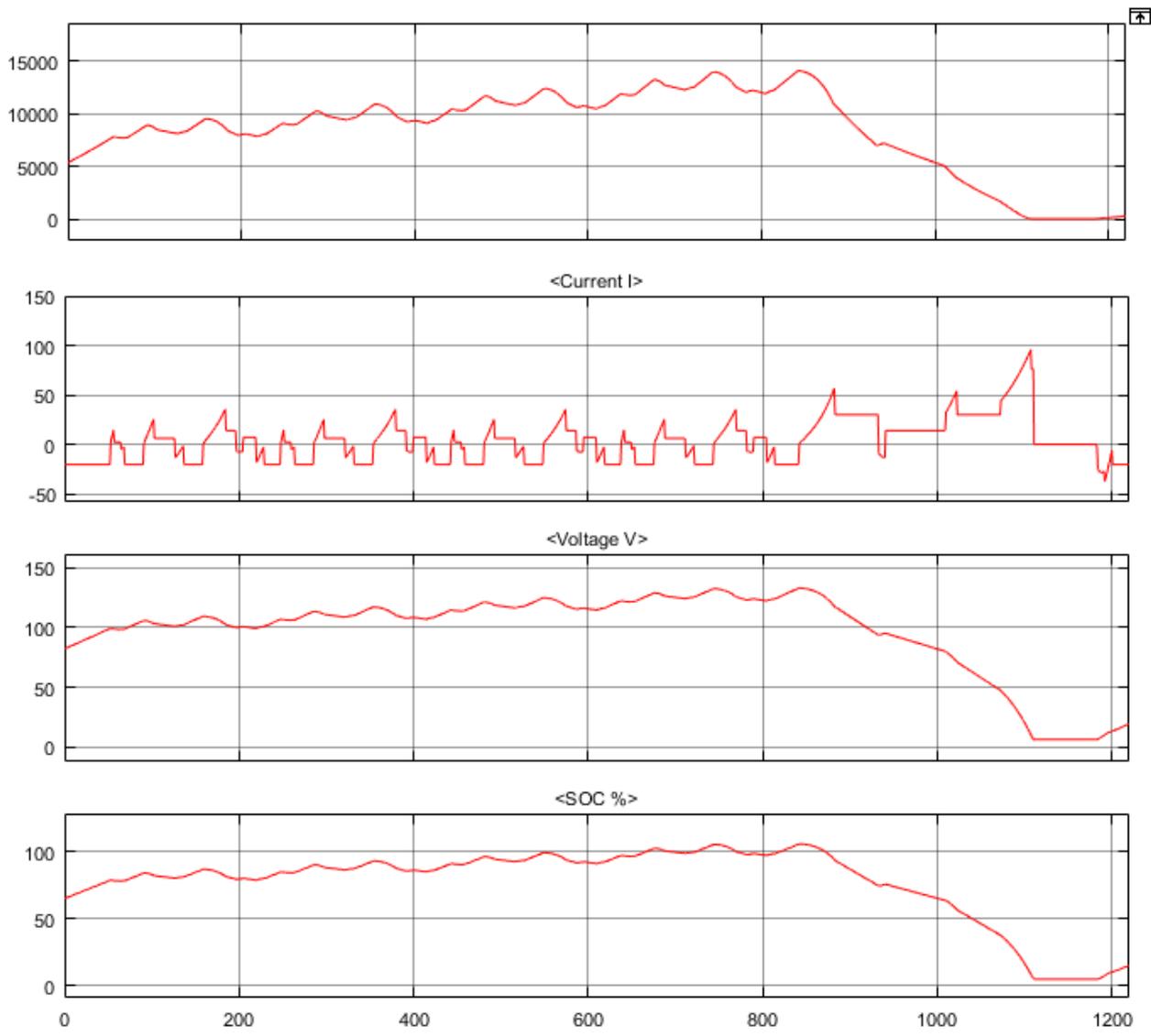


Figura 53: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en NEDC.

Fuente: Simulink.

Como se puede observar en los tramos cuando el vehículo está parado o frenando, se va cargando el supercondensador. Finalmente se observa cómo se descarga en el tramo de autovía y finalmente es la batería la que entrega toda la potencia.

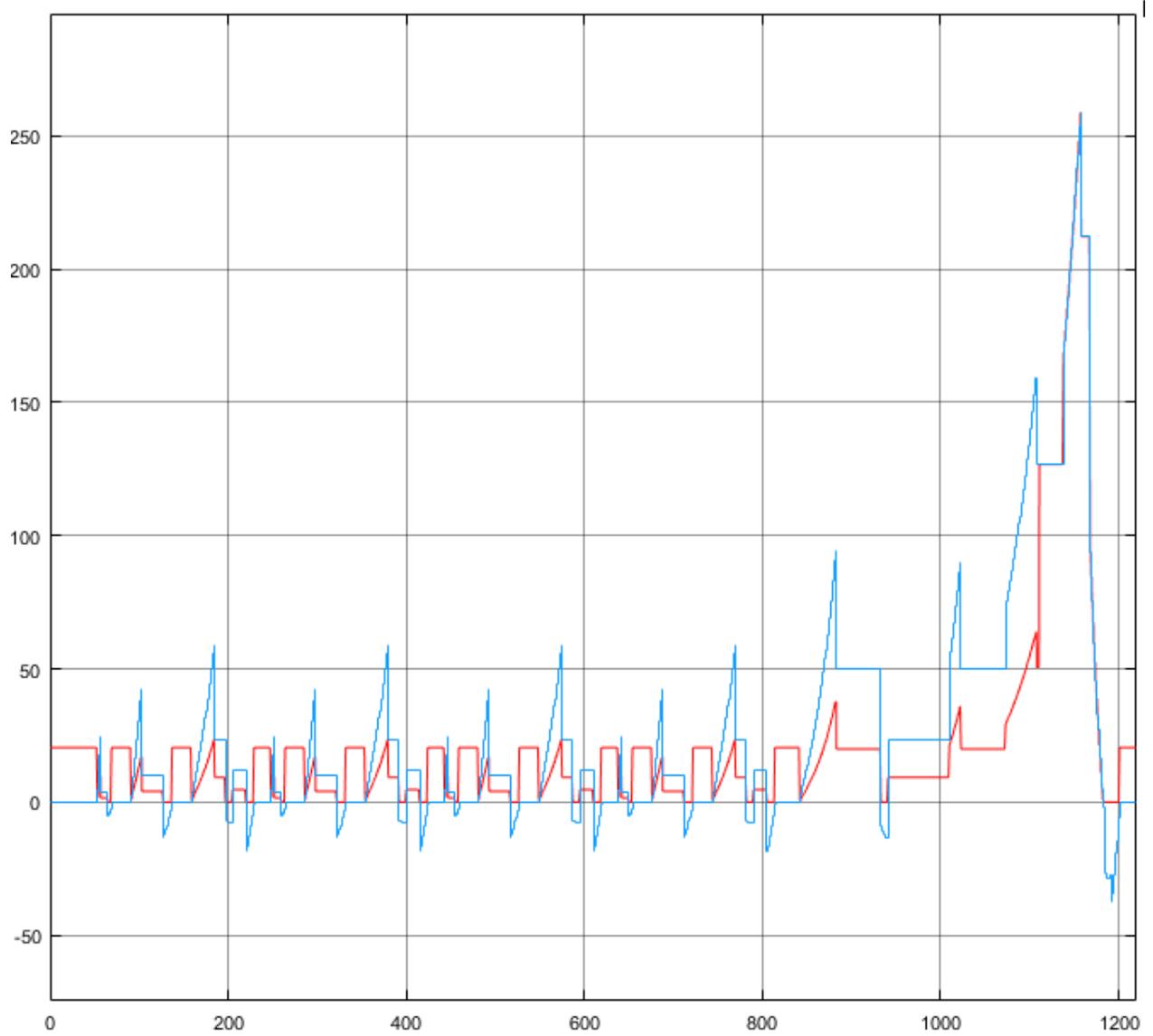


Figura 54: potencia total (azul) vs potencia entregada por la batería (rojo) en NEDC.

Fuente: Simulink.

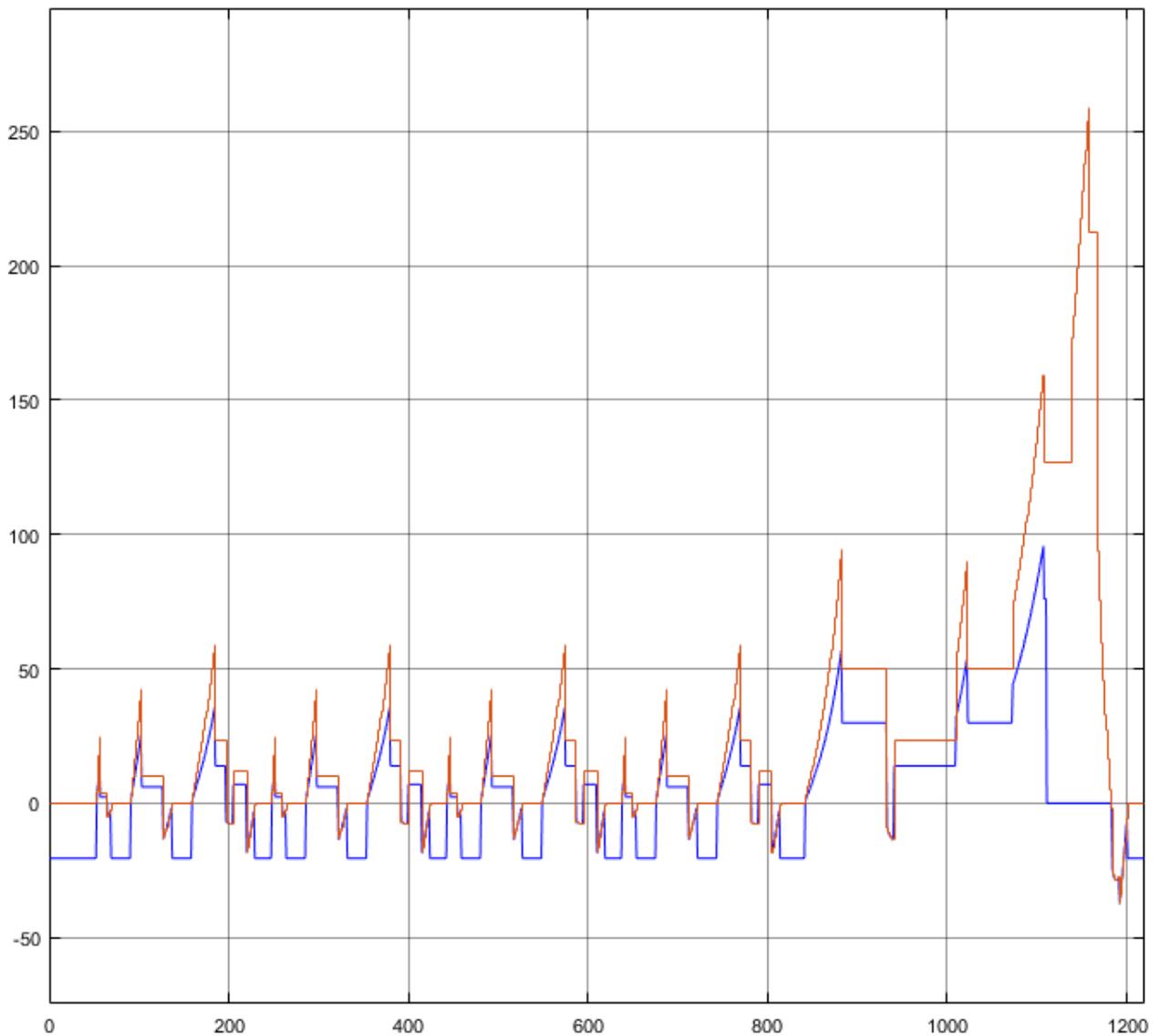


Figura 55: corriente (rojo) vs corriente entregada por el supercondensador (azul) en NEDC.

Fuente: Simulink.

Como se observa el condensador se está cargando cuando el vehículo está parado y decelerando. En el tramo de autovía no se puede seguir entregando potencia debido a que no tiene capacidad suficiente a esas velocidades. En tramos de ciudad este sistema es mucho más eficiente que en autovía.

#### 4.2.2 Ciclo USA CITY II:

A continuación voy a exponer los resultados en el ciclo USA CITY II:

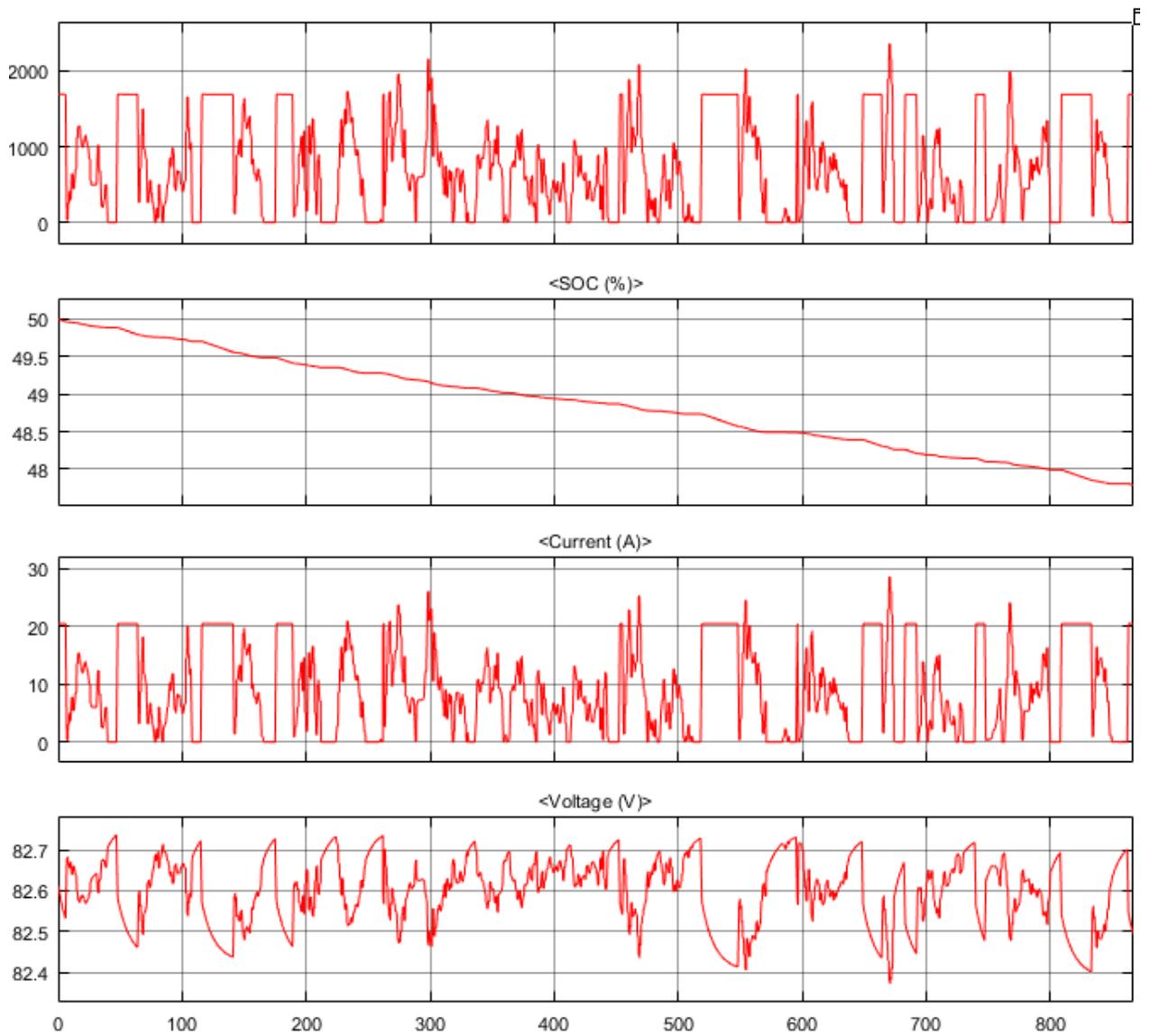


Figura 56: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

Este ciclo es más agresivo que el anterior y se nota en las variaciones más rápidas en la corriente. Pero las corrientes no superan los 30 amperios lo cual no supone ningún problema para las baterías.

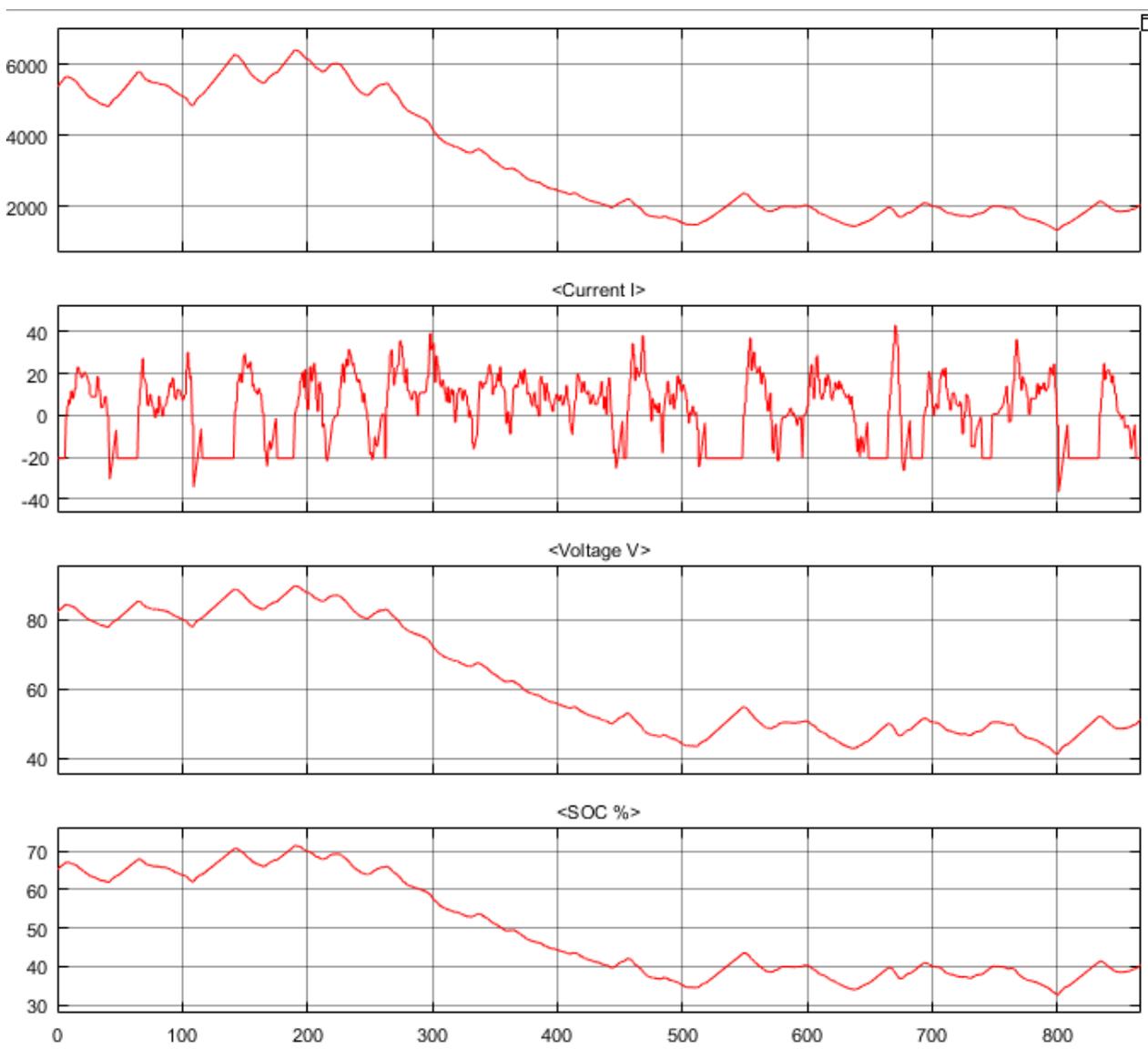
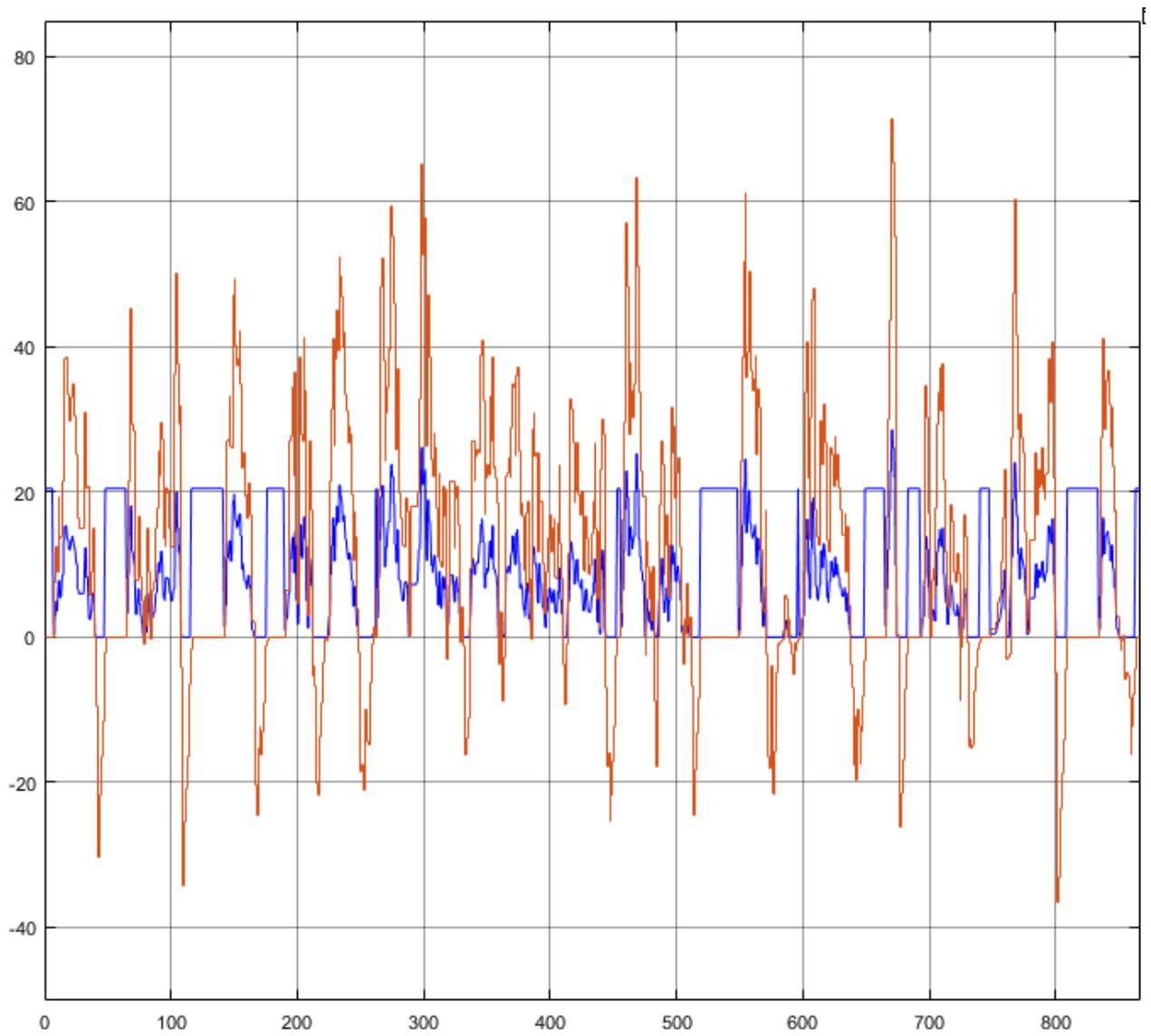


Figura 57: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en USA CITY II.

Fuente: Simulink.



*Figura 58: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en USA CITY II.*

*Fuente: Simulink.*

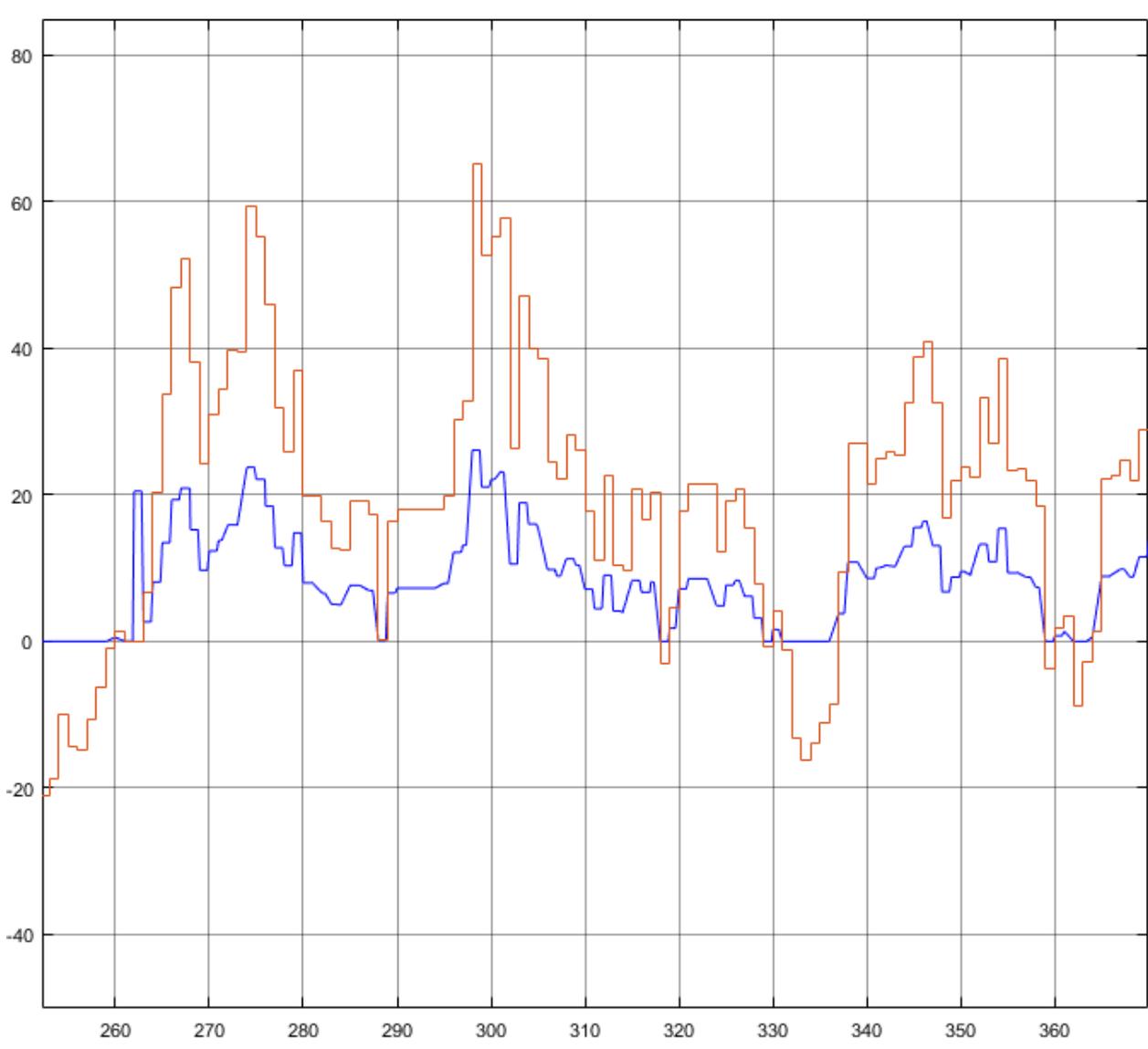


Figura 59: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

Como se puede observar en las dos últimas gráficas la batería no proporciona toda la corriente que es demandada por el vehículo, si no que esta ponderada con la de la batería para poder repartirse el gasto energético y reducir las corrientes por la batería.

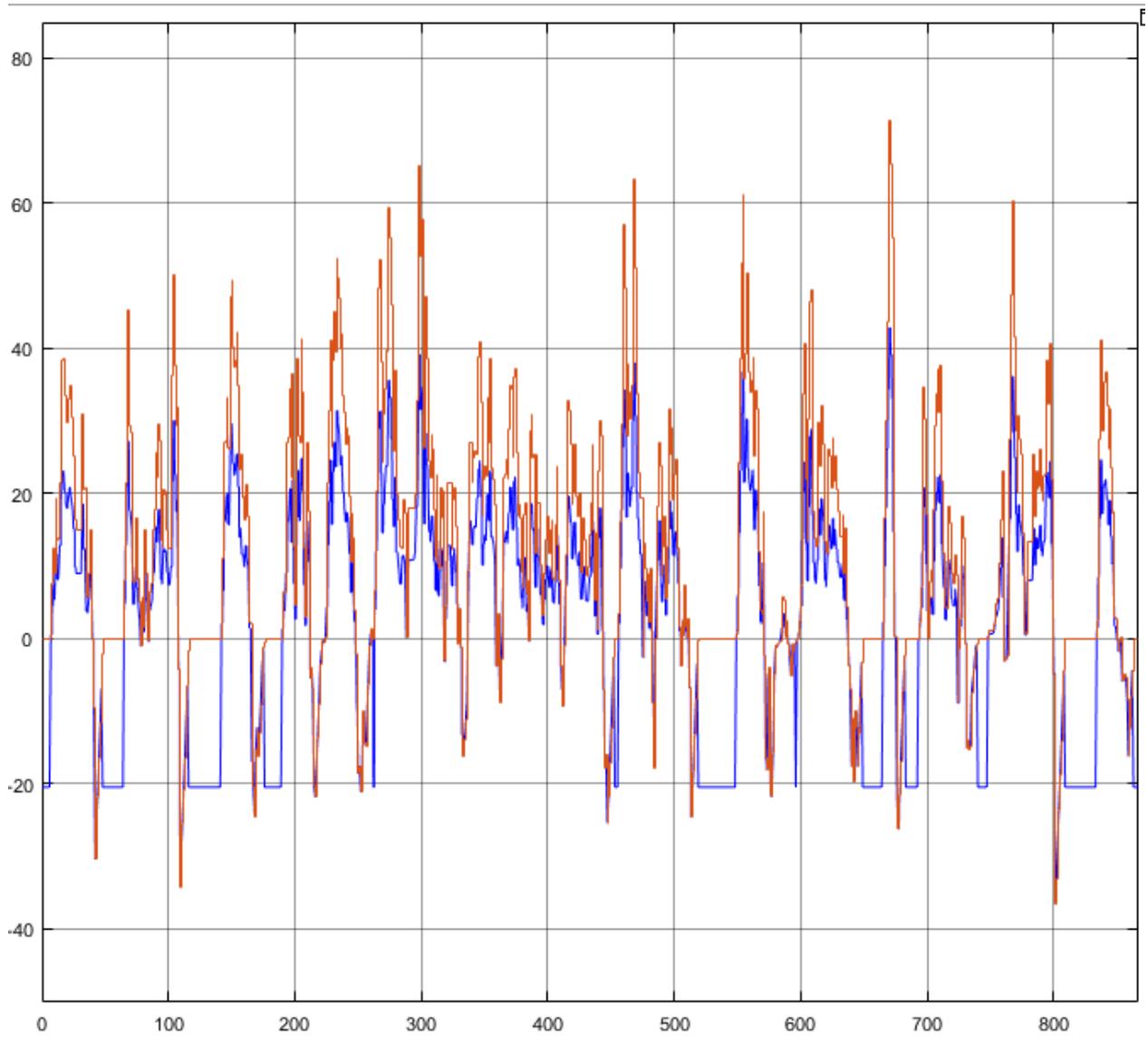


Figura 60: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por el supercondensador (azul) en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

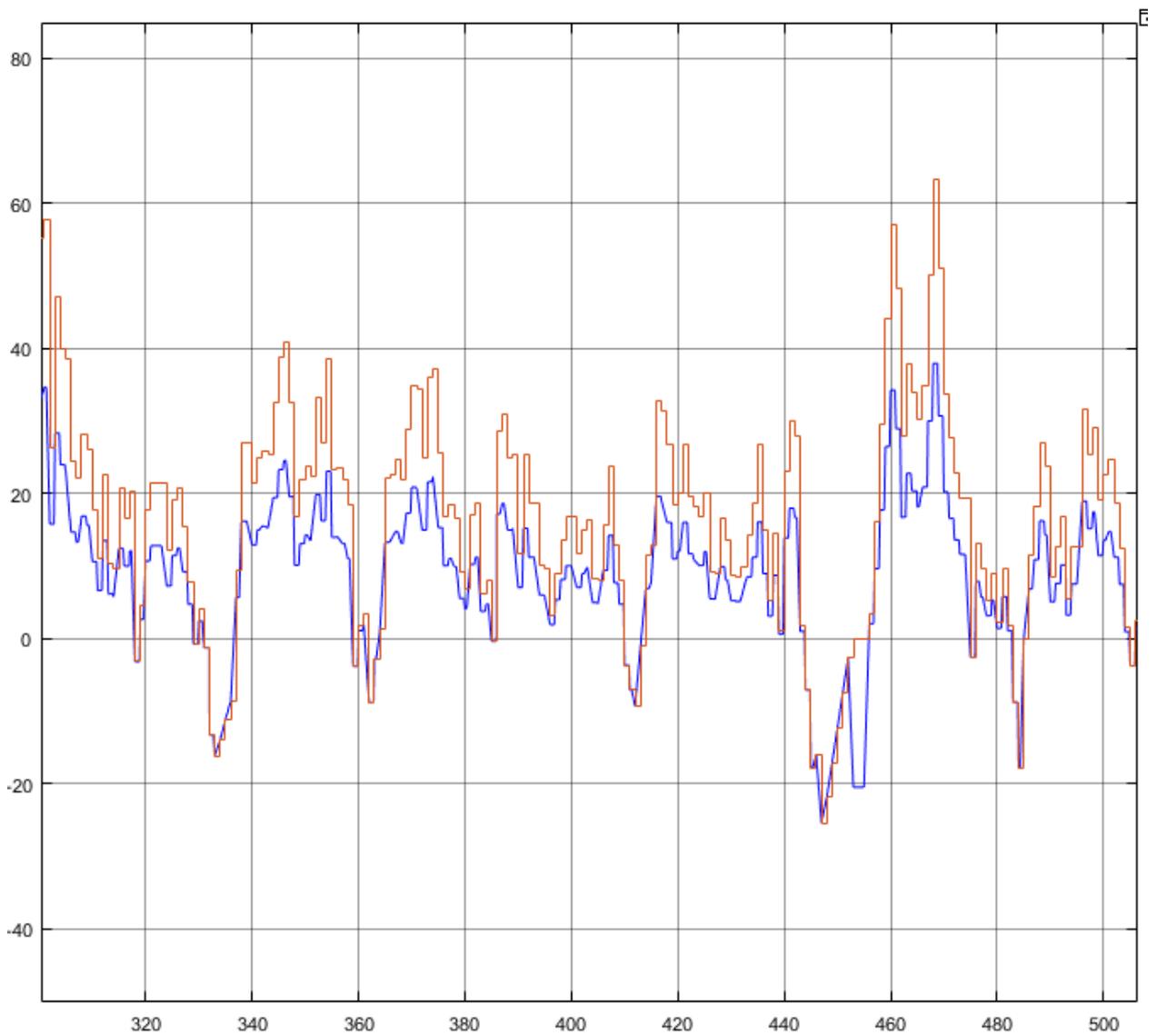


Figura 61: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por el supercondensador (azul) en USA CITY II.

Fuente: Simulink.

Como se observa el supercondensador soporta toda la carga regenerativa del sistema y aporta corriente para conseguir entregar toda la necesaria al sistema.

### 4.2.3 Ciclo USA FTP-75:

A continuación voy a exponer los resultados en el ciclo USA FTP-75:

Este es un ciclo muy agresivo como se ha comentado antes, aceleraciones muy bruscas hasta altas velocidades.

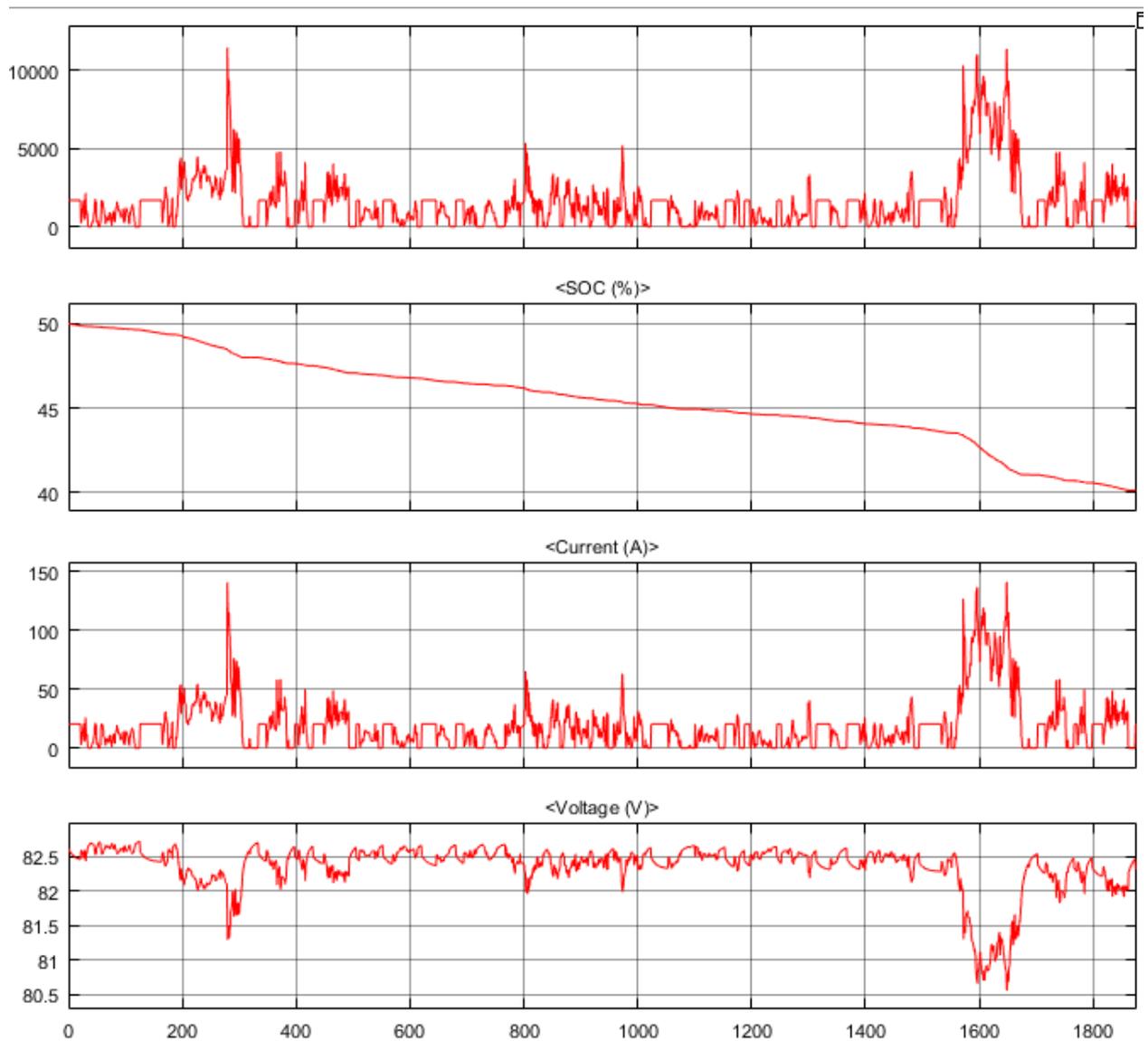


Figura 62: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en USA FTP-75.

Fuente: Simulink.

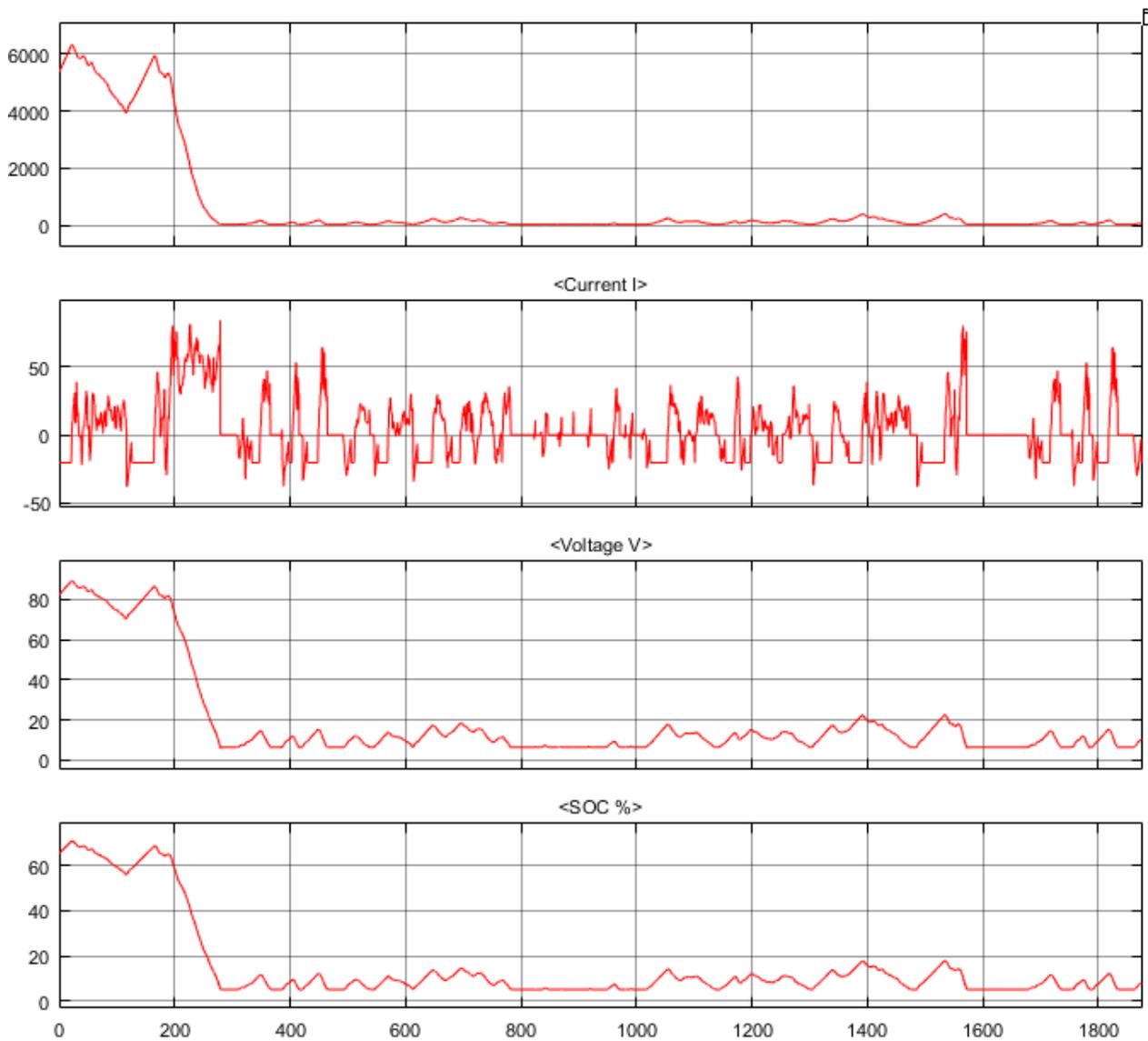


Figura 63: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en USA FTP-75.

Fuente: Simulink.

Si observamos ambas graficas se puede ver que para sistemas tan agresivos el condensador no es capaz de suministrar la energía necesaria, simplemente porque no es capaz de recargarse. En este caso lo que hace el control es penalizar más a la batería aumentando su gasto.

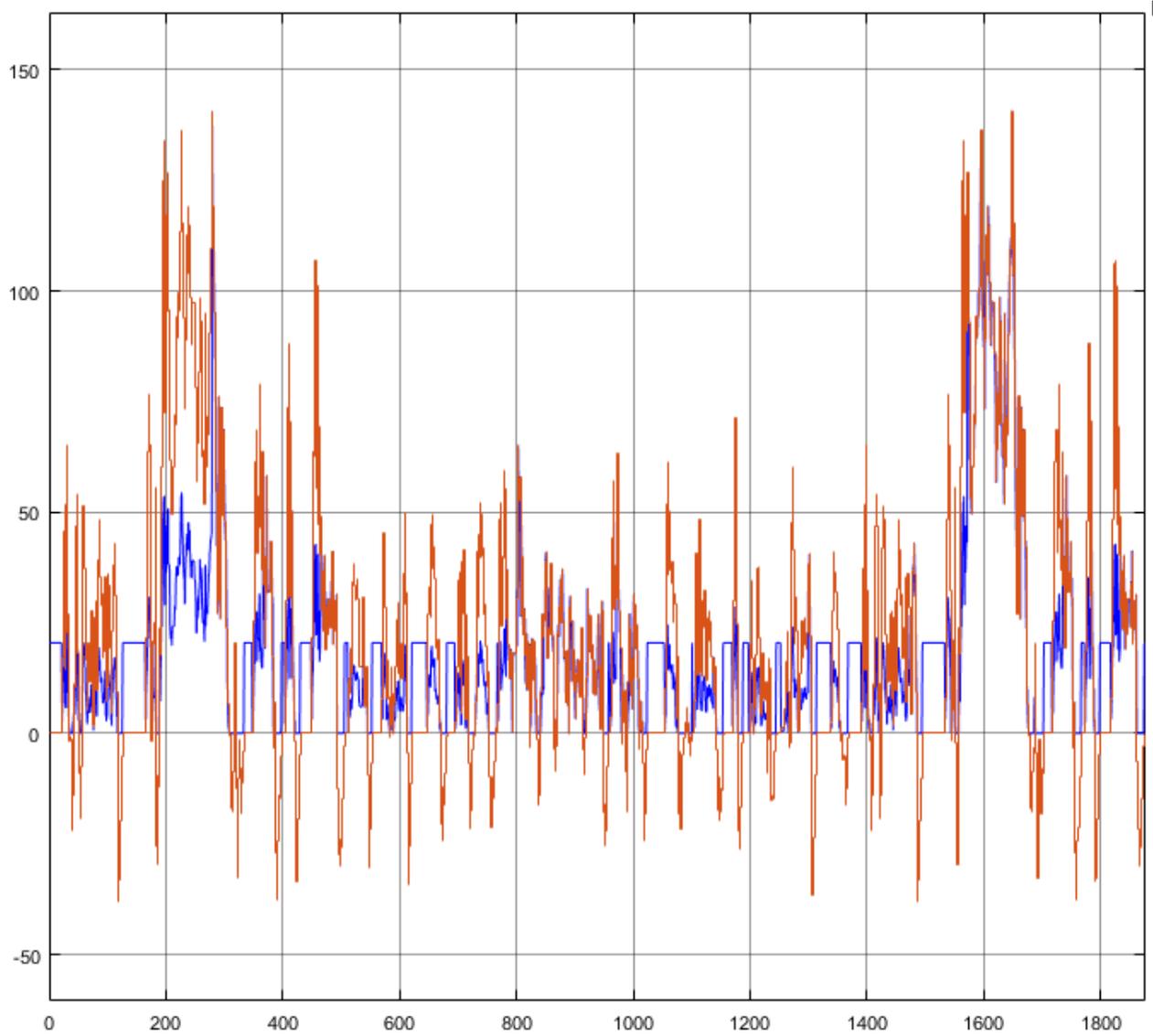


Figura 64: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en USA FTP-75I.

Fuente: Simulink.

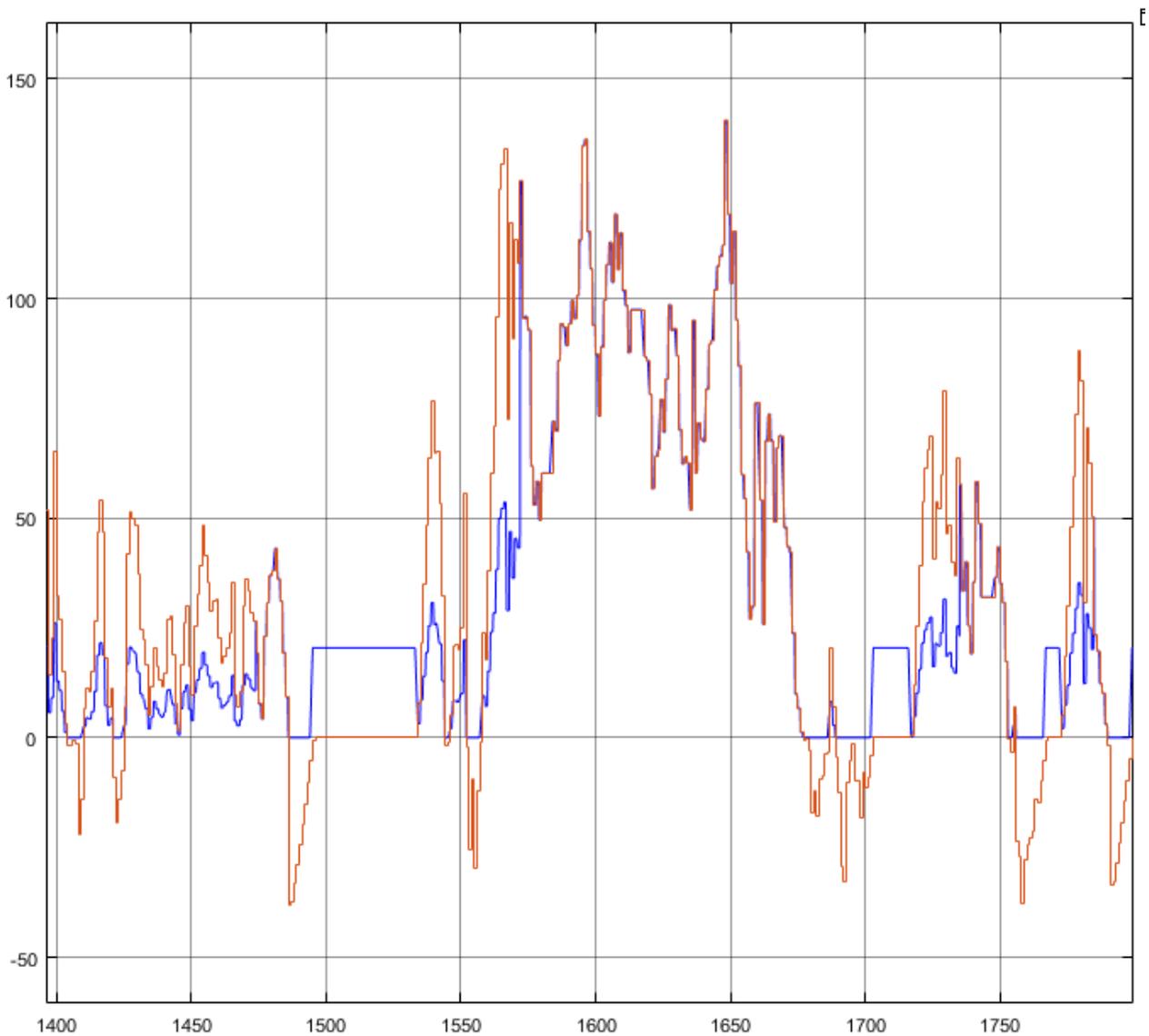


Figura 654: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en USA FTP-75I.

Fuente: Simulink.

En consecuencia con lo explicado en el párrafo anterior, el control evalúa el gasto y no es capaz de ponderarlo entre las dos fuentes, así que utiliza la batería para aportar toda la corriente y cuando la demanda no sea agresiva, va recargando el condensador junto al frenado regenerativo.

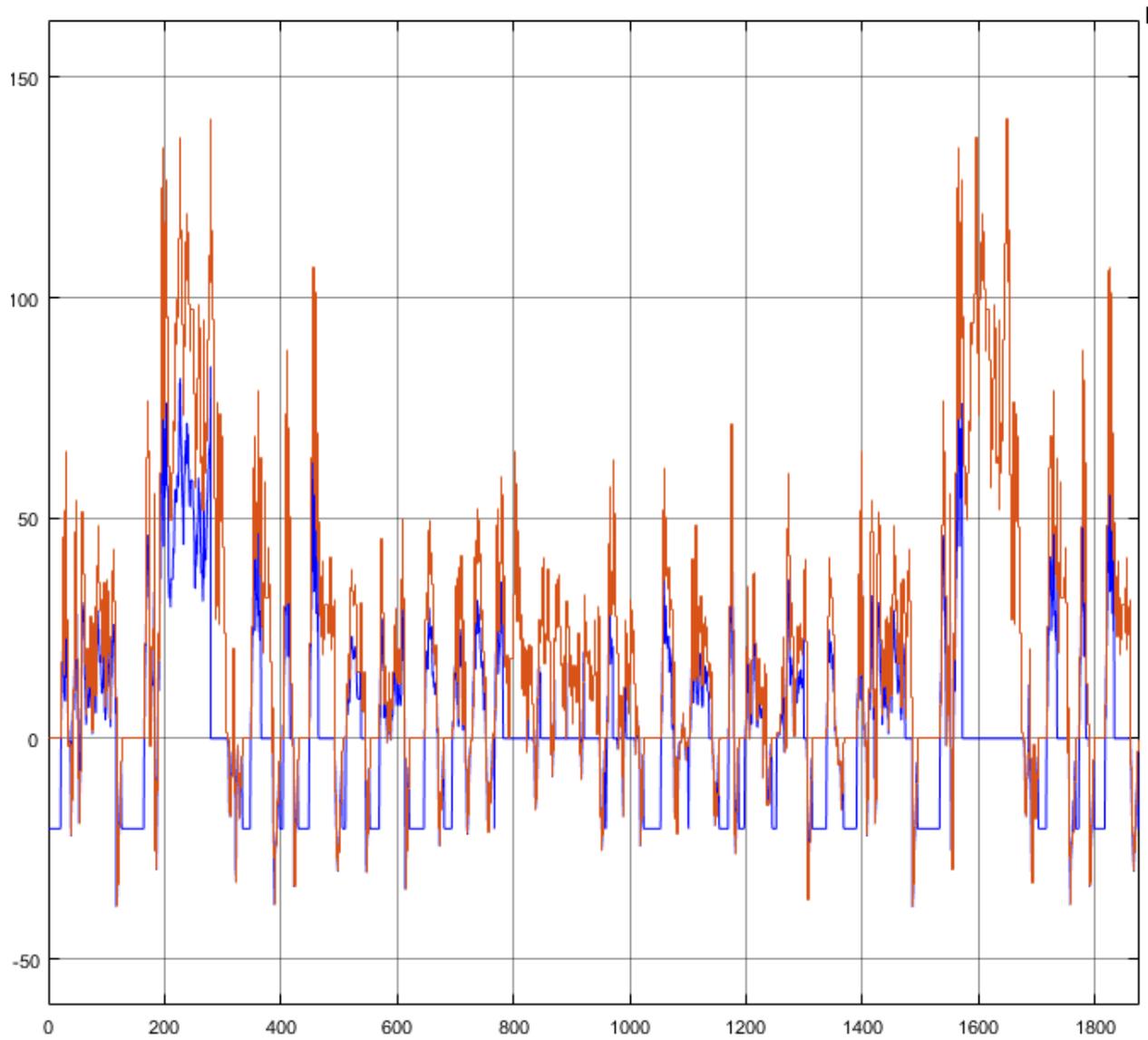


Figura 66: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por el supercondensador (azul) en USA FTP-75.

Fuente: Simulink.

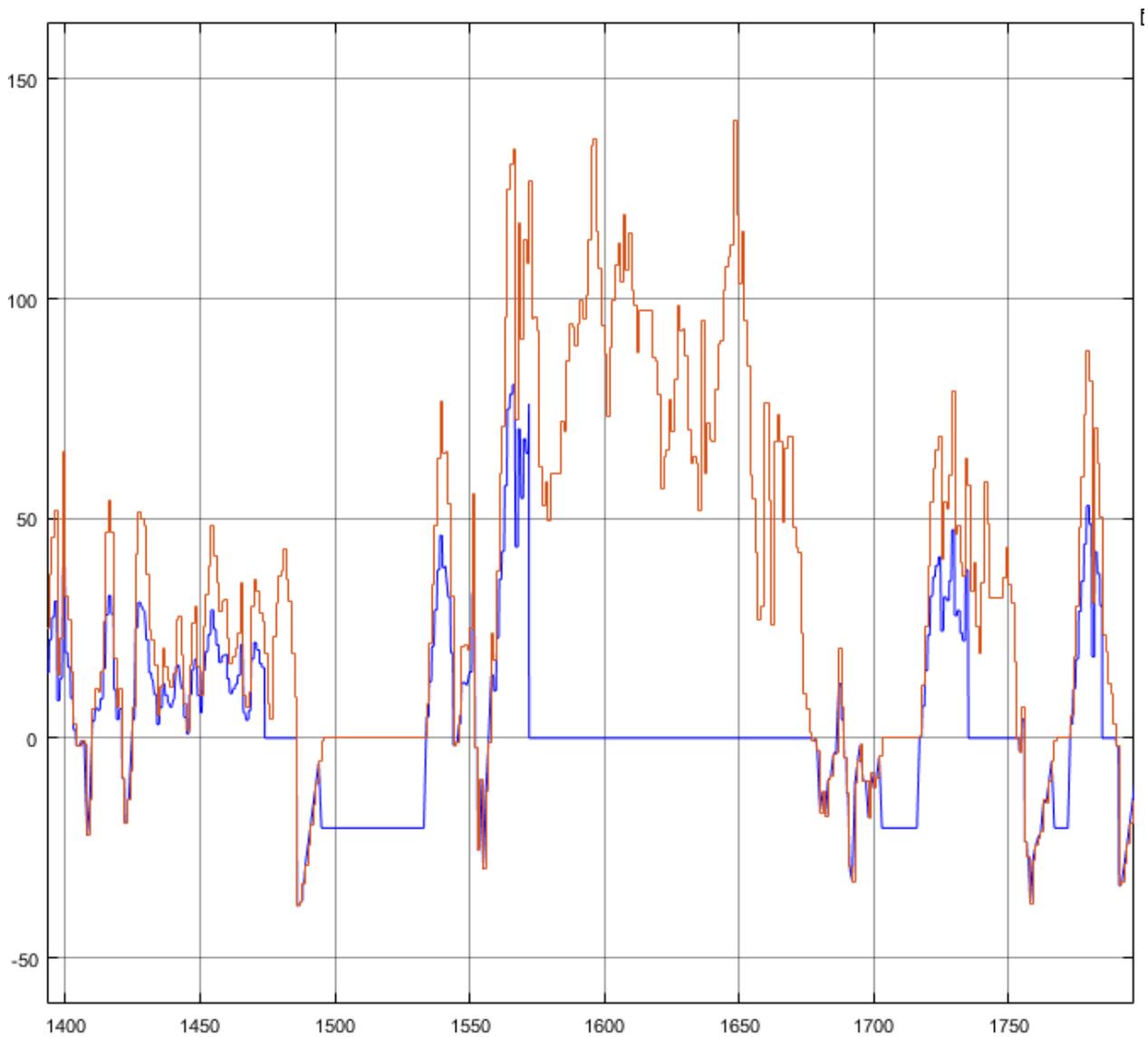


Figura 67: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en USA FTP-75.

Fuente: Simulink.

Aquí observamos como el condensador no es capaz de suministrar esa energía y se queda a 0 hasta que empieza a recargarse.

4.2.2 Ciclo WLTP:

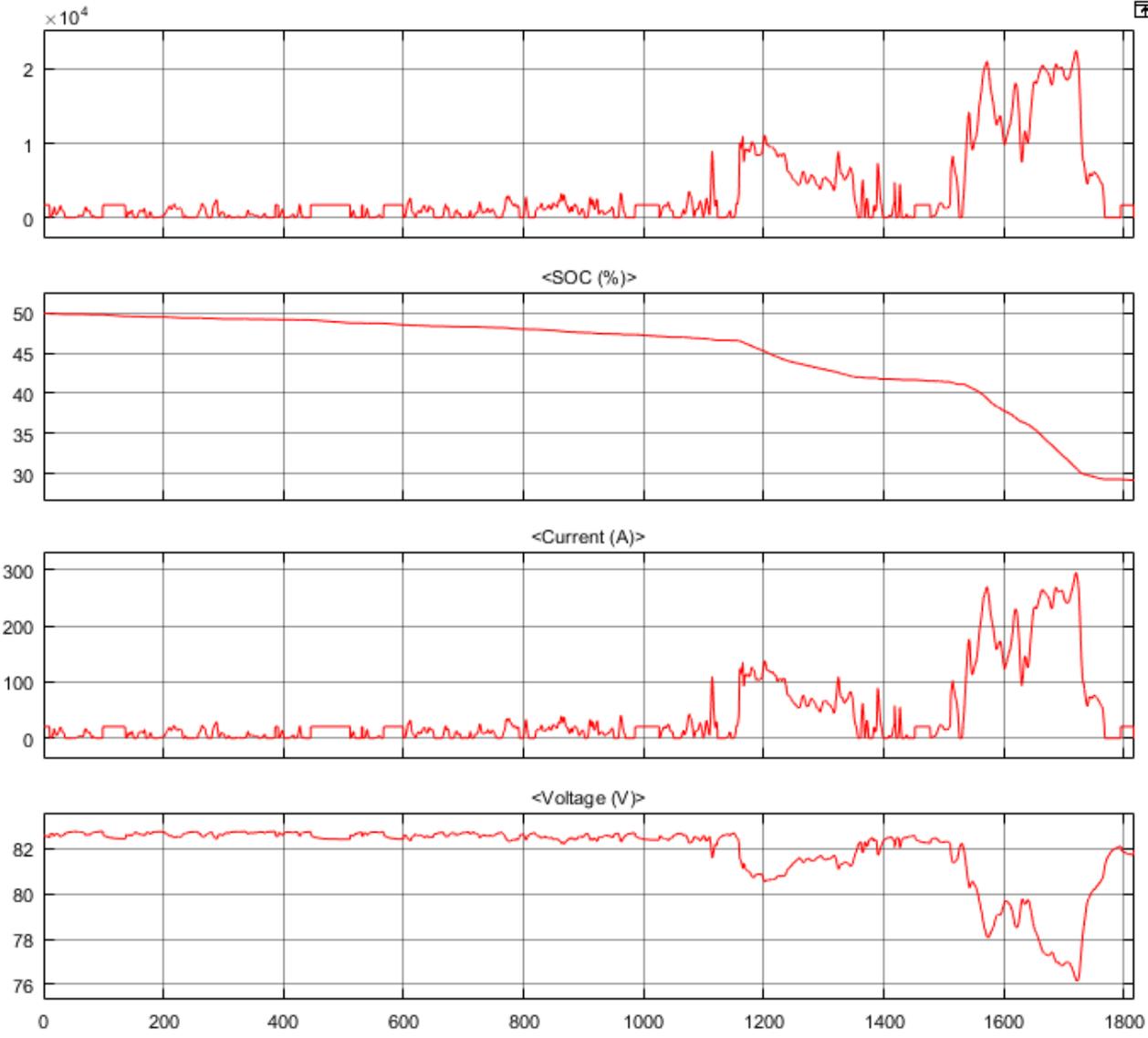


Figura 68: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje de la batería en WLTP.  
Fuente: Simulink.

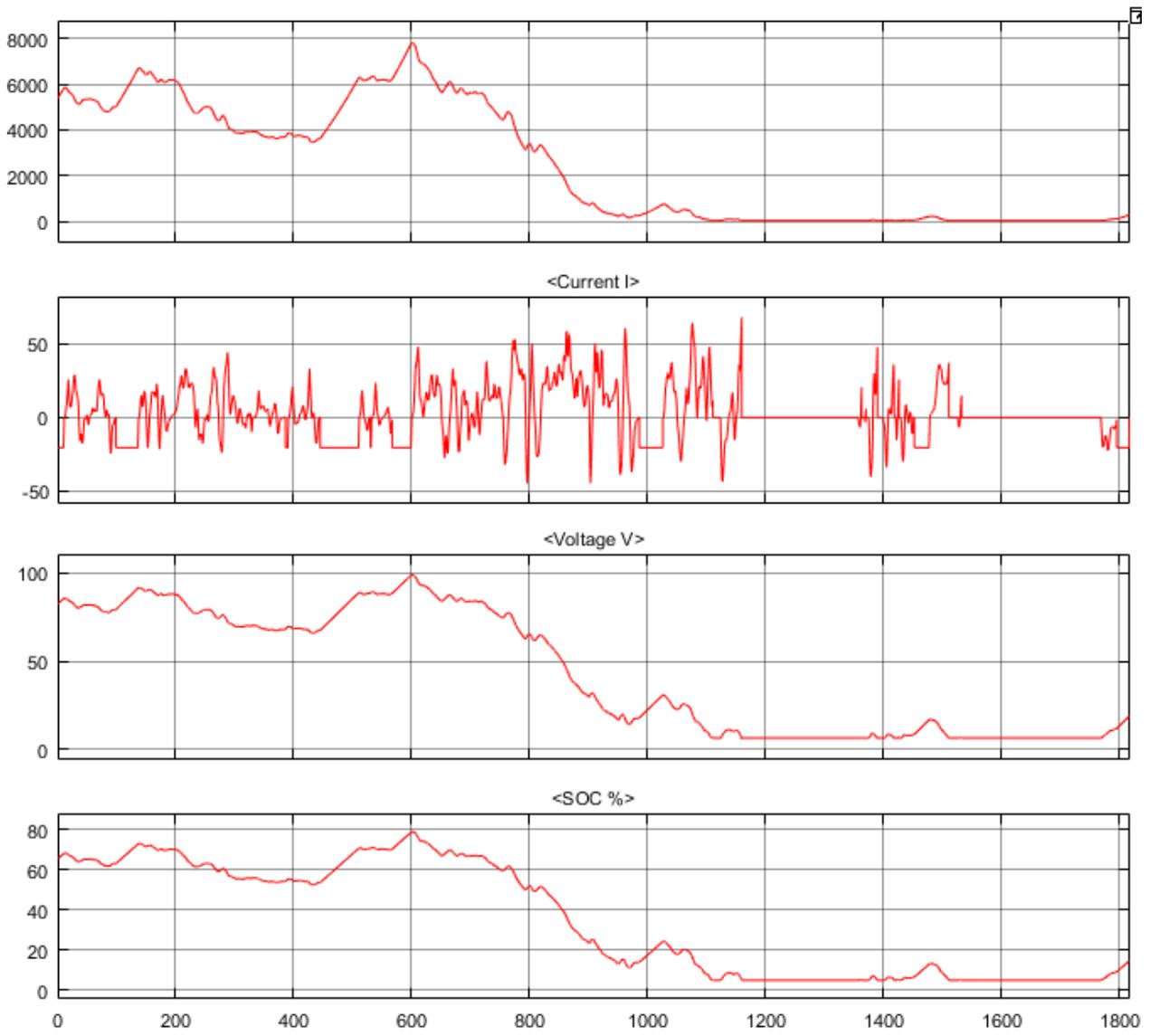


Figura 69: datos de potencia, SOC, corriente y voltaje del supercondensador en WLTP.

Fuente: Simulink.

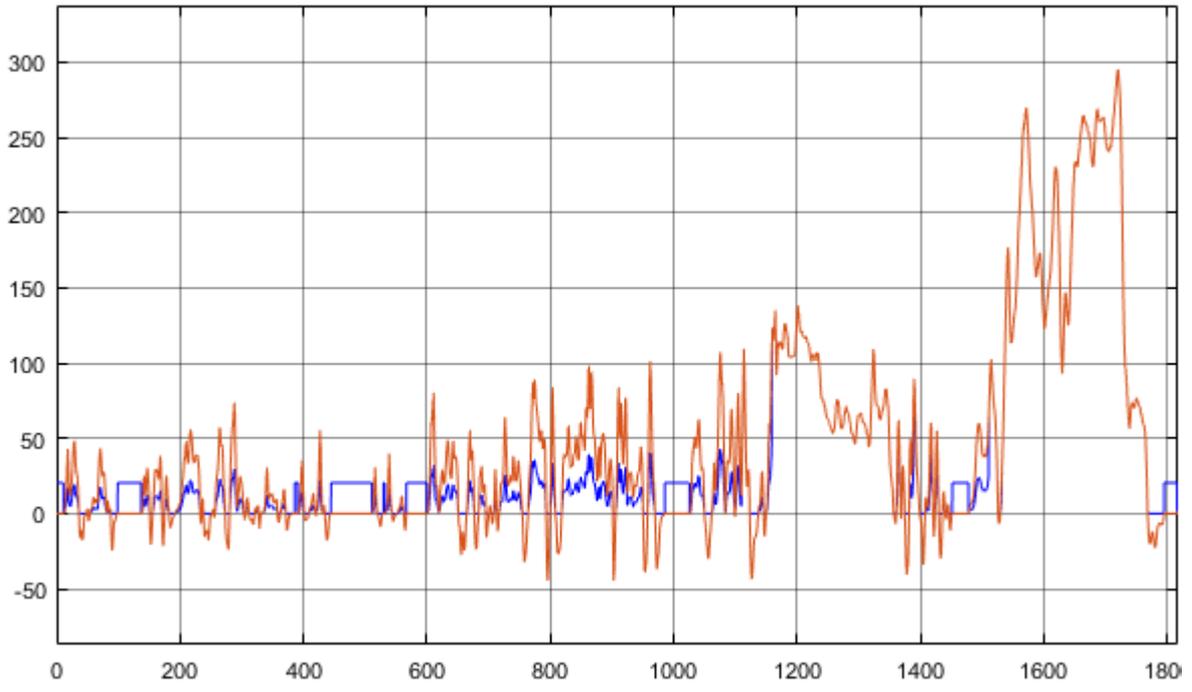


Figura 70: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en WLTP.

Fuente: Simulink.

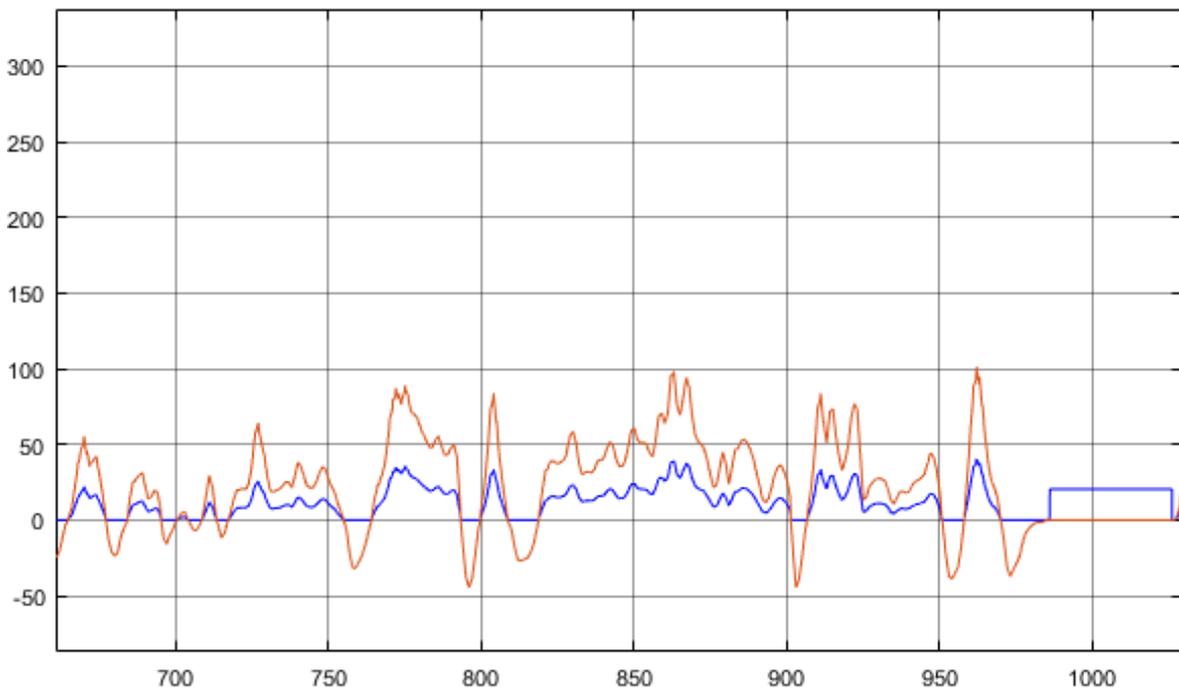


Figura 71: corriente total necesaria (rojo) frente a corriente suministrada por la batería (azul) en WLTP.

Fuente: Simulink.

Como se pueden observar el control hace un reparto equitativo de la corriente que es necesaria suministrar.

## **5. Conclusiones.**

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

Usando los modelos físicos y teóricos a partir de los datos obtenidos por los fabricantes de los componentes y por las especificaciones comprobadas en el FOX se ha conseguido realizar un modelo del vehículo con sus dos fuentes de potencia y con dos controladores capaces que utilizar el vehículo en función de lo que demande el usuario.

Se ha realizado un control basándose en el uso del condensador hasta agotarse y así utilizar menos energía de la batería, por contrapartida, cuando se agota la batería suministra toda la energía.

El otro control que se utiliza es un control semi-óptimo sobre el uso mixto entre el supercondensador y la batería para mantener el rango de corriente de la batería en un uso bajo mientras sea posible.

De todas a todas, tanto la batería como el supercondensador son capaces de suministrar más de 200 amperios sin problema, por lo que no se ha limitado en corriente ninguno de estos debido a que en el caso de estudio no se superaba esta corriente.

Se ha realizado la comparación entre 4 ciclos de conducción distintos, llegando a la conclusión que un sistema de estas características se puede utilizar en zonas urbanas con una conducción suave para optimizar la autonomía.

Por contrapartida, si lo que se busca es un control más deportivo, con aceleraciones muy bruscas y frenadas a la par, el sistema acaba finalmente suministrando toda la potencia de pico por la batería.

Cierto es que respetando los límites de velocidad actuales en España la batería no debería sufrir daños ya que no supera el amperaje máximo estipulado por el fabricante, pero la degradación será más rápida cuanto más agresivo sea la conducción.

## **Bibliografía**

*L. Guzella; A. Sciarretta, vehicle propulsion systems. Introduction to modeling and optimization. Second edition.*

*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. Guzella; A. Sciarretta, vehicle propulsion systems. Introduction to modeling and optimization. second edition.*

*Temario de la asignatura: Control de vehículos eléctricos e híbridos.*

*Temario de la asignatura: sistemas electrónicos para el sector del transporte.*