



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO ENERGÉTICO DE LAS BATERÍAS DE GRAFENO EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Alumno: Alfonso Mariscal Castilla

Tutor: D. Manuel Valverde Ibáñez
Dpto.: Ingeniería Eléctrica

Junio, 2016

INDICE

1. El Grafeno.	3
1.1 ¿Qué es el Grafeno?	3
1.2 Propiedades Electrónicas.	4
1.3 Aplicación de Grafeno en Transporte y Almacenamiento de energía.	5
2. Generalidades del Vehículo Eléctrico.	6
2.1 Introducción.	6
2.2 Sistema de Configuración.	7
2.2.1 Variaciones de almacenamiento de energía.	8
2.2.2 Variaciones en propulsión eléctrica.	9
2.2.3 Variaciones de transmisión en rueda.	10
2.3 Propulsión eléctrica.	12
2.3.1 Motores existentes en vehículos eléctricos.	12
2.3.2 Comparación de Motores.	16
2.4 Indicadores del estado de carga (SOC).	17
3. Baterías.	19
3.1 Aplicaciones del grafeno en Li-ion.	19
3.2 Aplicaciones del grafeno en nuevos conceptos de baterías.	20
3.2.1 Introducción.	20
3.2.2 Aplicación del grafeno en baterías Li-S.	21
3.2.2.1 Introducción	21
3.2.2.2 Progreso de la aplicación de grafeno en baterías Li-S	22
3.2.3 Aplicación de grafeno en baterías Li-air.	25
3.2.3.1 Introducción	25
3.2.3.2 Baterías Li-air acuosa.	26
3.2.3.3 Baterías Li-air no acuosa.	28
3.3 Modelado de una batería.	29
4. ADVISOR. ¿Qué es? ¿Para qué se utiliza?	33
5. Como funciona AVISOR.	33
5.1 Definición de un vehículo.	35
5.2 Iniciar una simulación.	37
5.3 Mirar en los resultados.	40

6. Simulación.	43
6.1 Partes Principales.	43
6.2 Modelado de batería grafeno-aire en ADVISOR.	45
7. Resultados.	50
7.1 Ciclo UDDS.	50
7.2 Ciclo Interurbano.	60
7.3 Ciclo a velocidad constante.	69
7.4 Interpretación de resultados.	77
8. Conclusiones.	80
9. Bibliografía.	81

1. EL GRAFENO.

1.1 ¿QUÉ ES EL GRAFENO?

El grafeno está definido como una mono capa de átomos de carbón que están hexagonalmente y firmemente compactados en un entramado 2-D. La estructura del grafeno también se puede considerar como la mínima cantidad de capas a la que puede llegar el grafito. Puede producirse partiendo desde el grafito a través de una completa exfoliación hasta conseguir capas monoatómicas.

El grafeno como unidad 2-D construida desde el grafito primero fue analizado por investigaciones teóricas en 1947 como punto inicial para entender las propiedades electrónicas en grafito tridimensional (3-D). Sin embargo, teóricamente se predijo casi 80 años antes que no podía existir cristales puramente 2-D porque la fluctuación térmica podría destruir el gran orden, llegando a derretir la estructura 2-D. Aun así, las investigaciones de producir materiales 2-D, especialmente grafeno, nunca han sido interrumpidas. También se prepararon capas extremadamente delgadas de grafito empezando con óxido de grafito. Se descubrió que se podrían obtener películas de carbón ultra finas por calentamiento o por reducción de óxido de grafito en suspensión alcalina. Aunque se sabe que es imposible distinguir el número de capas de grafeno mediante simple comparación de contraste, y que el óxido de grafito derivado muestra tener grandes cantidades de defectos estructurales, este reciente intento da luz a la preparación química de grafeno.

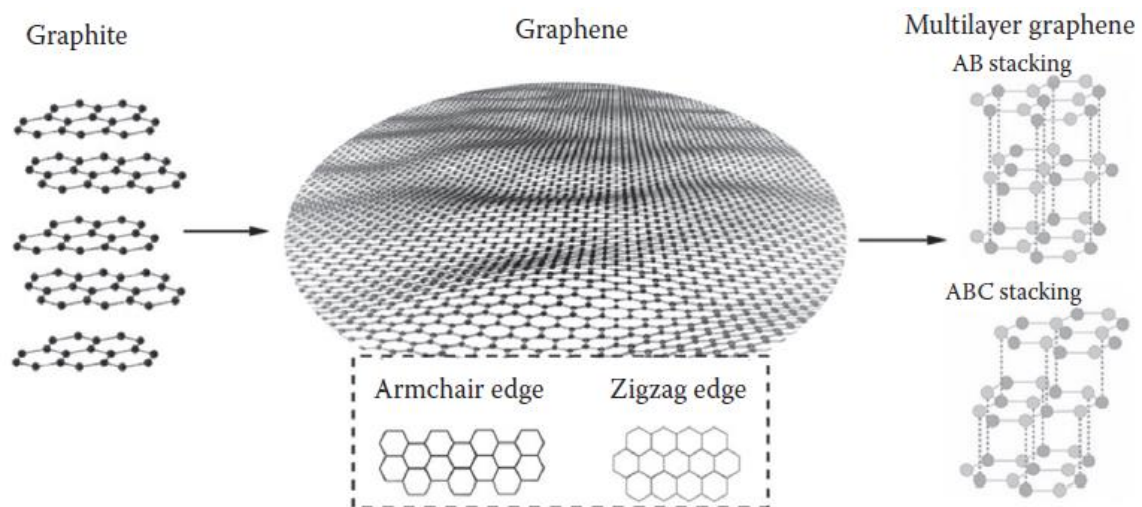


Figura 1.1 Esquema de la estructura del grafeno.

No fue hasta la publicación en 2004 del trabajo pionero de Geim, Novoselov y su equipo de investigación, quienes visionaron el amplio abanico de campos donde utilizar grafeno. Su experimento es muy simple. Su principio es la exfoliación mecánica del grafito, que es actualmente similar a escribir en un papel usando un lápiz pero en un espacio más controlado. La exfoliación se realizó repitiendo divisiones de grafito usando un rollo común de Scotch. Con gran paciencia, produjeron láminas de grafito ultra delgadas. El grafeno resultante fue perfecto en estructura sin demasiados defectos, y además, por primera vez, se pudieron medir experimentalmente las propiedades intrínsecas del grafeno. Solo las propiedades eléctricas del grafeno sorprendieron a los científicos y pronto pusieron su atención en este nuevo carbón mágico en todo el mundo. A día de hoy, se han publicado diez mil investigaciones y se han aplicado miles de patentes a materiales y técnicas relacionadas con el grafeno. Es posible que el grafeno pueda llegar a ser un nuevo material revolucionario capaz de cambiar el mundo en un futuro cercano.

1.2. PROPIEDADES ELECTRÓNICAS

La alta calidad del cristal 2-D le da al grafeno unas propiedades electrónicas extraordinarias. La valencia y banda de conducción en el grafeno se cruza en un punto singular de cero estados, el cual se denomina punto Dirac, la densidad de estados es cero y la relación lineal de dispersión da como resultado una masa efectiva igual a cero. El transporte de movilidad medido para una simple capa de alta calidad en una lámina de grafeno preparado por exfoliación mecánica y completamente suspendido sin influencia del sustrato llega a $200,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. La carga transportada en grafeno se comporta como partículas relativistas. Como resultado, su comportamiento se debería describir usando la ecuación de Dirac en lugar de la ecuación de Schrodinger, aplicada generalmente a describir propiedades electrónicas de otros materiales. Por lo tanto, la aparición del grafeno mantiene la posibilidad de investigar la teoría de la relatividad en la mesa de laboratorio en lugar de en el universo.

Las propiedades electrónicas intrínsecas del grafeno se han estudiado ampliamente y no causarán mucho entusiasmo por si solas. Sin embargo, la interferencia del grafeno con dispersión intrínseca y extrínseca, tanto como dopando átomos o sustratos, causará

nuevos fenómenos de transporte, que es una manera útil de calibrar las propiedades electrónicas del grafeno para conocer nuevos objetivos en aplicaciones diferentes.

1.3. APLICACIÓN DEL GRAFENO EN TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

En años recientes, la energía limpia y renovable ha tomado mayor importancia debido a que los combustibles fósiles están causando el calentamiento global de la tierra y teniendo efectos devastadores en el medio ambiente. El grafeno ha demostrado un potencial atractivo en la aplicación de transformación y almacenamiento de energía debido a su enorme área de superficie teórica igual a $2630 \frac{m^2}{g}$, espectacular conducción eléctrica y térmica y estabilidad química elevada.

El grafeno se está estudiado en profundidad en la aplicación de baterías ion-Litio, es una fuente de potencia renovable y limpia, en elementos portátiles, vehículos híbridos/eléctricos y diversos dispositivos de potencia. Como muchos potenciales materiales para electrodos en una batería ion-Li, los cuales sufren difusión baja, pobre transporte de electrones, e incremento de resistencia en altas cantidades de carga/descarga, se han propuesto electrodos basados en materiales de grafeno en baterías ion-Li como una de las alternativas más prometedoras debido a la alta conductividad eléctrica y típica estructura 2-D. El grafeno por si solo puede utilizarse como un ánodo de alta capacidad. Más importante aún, el grafeno actuando como un agente conductor con nano-estructura 2-D ayuda durante la fabricación de nuevas estructuras con varios materiales activos y mejora enormemente su comportamiento electroquímico. Hasta ahora, se han preparado satisfactoriamente numerosos ánodos y cátodos basados en grafeno, y su espectacular comportamiento en carga/descarga muestra su futuro prometedor en la aplicación de baterías ion-Li.

Los supercondensadores, también conocidos como condensadores electroquímicos o ultracondensadores, muestran un alto valor de potencia, largo ciclo de vida, bajo coste de mantenimiento y un enorme rango térmico de funcionamiento. Hay dos tipos principales de supercondensadores basados en mecanismos de almacenamiento de carga: el

condensador eléctrico de doble capa (EDLC) y el pseudocondensador. Los EDLC almacenan un campo electrostático mediante una gran área de superficie y una separación nanoscópica de carga en el electrodo/electrolito, mientras que los pseudocondensadores están basados en reacciones por Faraday. El grafeno es un material potencial para esta aplicación, ofreciendo buena resistencia al óxido mediante la definición de una estructura accesible, además de tener estabilidad a alta temperatura e intrínseca conductividad eléctrica. Sin embargo, su capacidad específica aún es baja, la cual se puede mejorar eligiendo un electrolito mejor o incrementando su área efectiva.

En estos últimos años, se han realizado investigaciones en la aplicación del grafeno en la transformación y almacenamiento de energía, demostrando las ventajas del mismo en términos de comportamiento y coste. Además, los materiales de carbón que se emplean en aplicaciones relacionadas con energía deben reemplazarse por el grafeno en un futuro cercano. Se espera que el grafeno logre grandes progresos en dispositivos que son parte esencial de nuestra vida diaria.

2. GENERALIDADES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Un vehículo eléctrico es aquel que está propulsado solamente por un motor eléctrico y, la energía necesaria se suministra desde una red de potencia. A continuación, se desarrollará un sistema de configuración general de dicho vehículo. También expondremos los principales motores que se utilizan en el mercado, así como algunas de las características de estos vehículos. Todo ello se describirá de manera resumida, ya que, este apartado tiene como fin dar unas nociones básicas de cómo está distribuido un vehículo eléctrico y cuáles son sus principales componentes. Solo profundizaremos en el apartado de baterías, que se explicará en el punto 3 de este documento.

2.2 SISTEMA DE CONFIGURACIÓN.

En la Figura 2.1 se muestra la configuración general de un vehículo eléctrico (VE), la cual consta de 3 grandes subsistemas: almacenamiento de energía, propulsión eléctrica y auxiliar. La propulsión eléctrica consta del controlador electrónico, el transformador de potencia, el motor eléctrico, la transmisión mecánica y las ruedas. El almacenamiento de energía engloba el dispositivo de almacenamiento de energía, la unidad de mantenimiento de energía y la unidad de carga. El sistema auxiliar está formado por la unidad de conducción, la unidad de control de temperatura y el suministro auxiliar de potencia. Los enlaces eléctricos se representan por una flecha gruesa y los enlaces de control por una flecha delgada. Basado en el control de las entradas desde el freno y el acelerador, el controlador electrónico aporta las señales de control correctas al interruptor en “on” u “off”, y los dispositivos de potencia del transformador funcionan para regular el flujo de potencia entre el motor eléctrico y la batería. La unidad de mantenimiento de energía funciona con el controlador electrónico para regular el frenado regenerativo y la energía recuperada. También trabaja con la unidad de carga para controlar la carga y monitorizar la utilización de la batería. La potencia auxiliar suministra la potencia necesaria con diferentes niveles de tensión a todos los sistemas auxiliares del VE, especialmente en el control de temperatura y la unidad de dirección. La conducción de las ruedas es otro sistema clave del control; basando en su posición angular, la unidad de potencia de conducción puede determinar rápidamente como debería girar el vehículo.

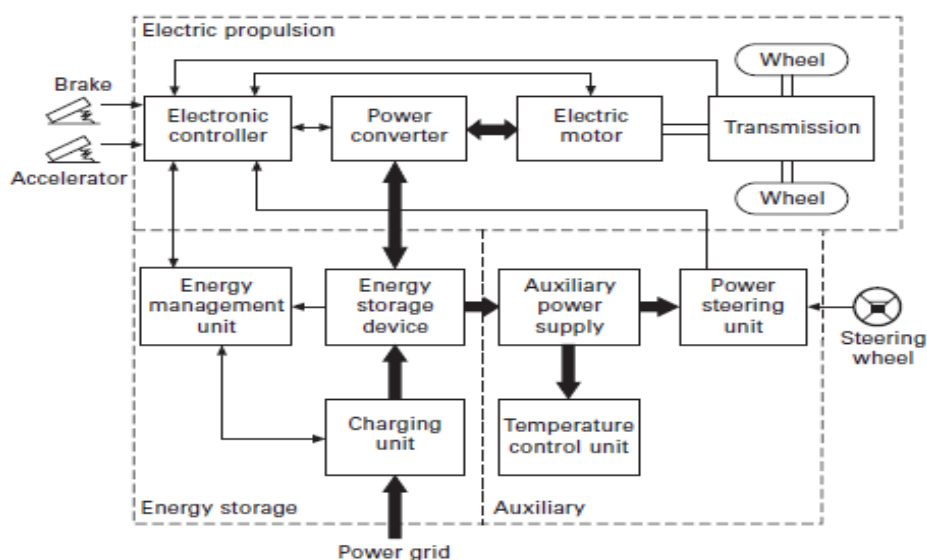
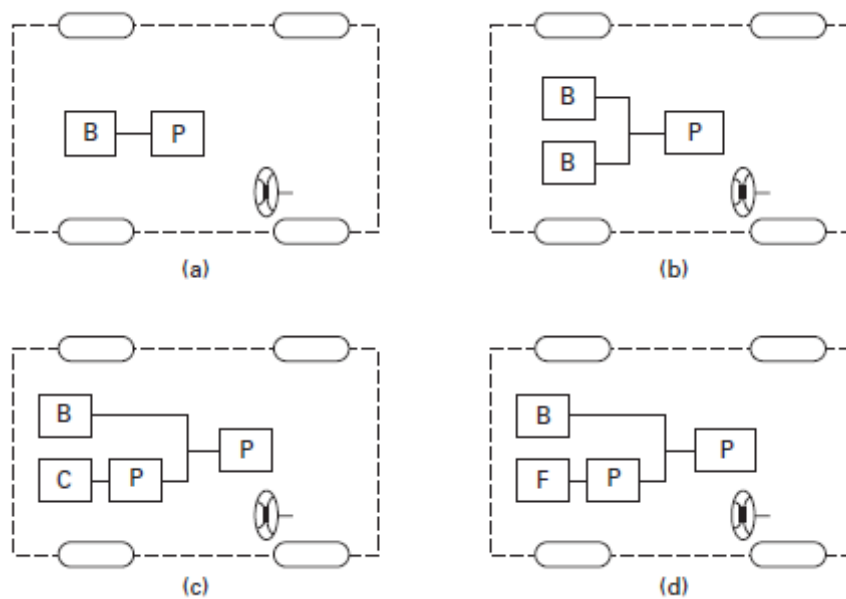


Figura 2.1: Esquema de configuración de un VE.

2.2.1 Variaciones de almacenamiento de energía.

La Figura muestra varios sistemas de configuración de VE debido a diferentes disposiciones de almacenamiento de energía, donde *B* es la batería, *C* el supercondensador, *F* el volante de inercia de velocidad ultrarrápida y *P* el convertidor de potencia. La figura (a) muestra una configuración con solo una batería, que se adopta ampliamente por los VE existentes. La batería debe distribuirse por todo el coche, junto al maletero o distribuida por el suelo del vehículo. Esta batería debería ser capaz de ofrecer una energía y potencia específicas para aceptar energía regenerativa durante el frenado.



En lugar de usar un diseño con una única batería, también se pueden emplear 2 baterías, donde una de ellas se optimiza para una alta energía específica y la otra para una alta potencia específica. Como muestra la figura (b), esta configuración no solo duplica los requisitos en energía y potencia, sino que también permite usar baterías recargables mecánicamente que no pueden aceptar energía regenerativa durante el frenado o una pendiente descendente.

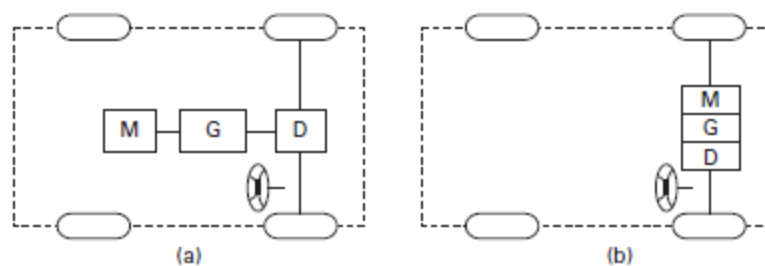
Debido a la característica de energía y potencia reducidas, el supercondensador tiene que trabajar junto con la batería en los VE. En la figura (c), la batería se emplea para tener una energía específica elevada, mientras que el supercondensador ofrece una excepcional potencia específica. Dado que el supercondensador funciona en un nivel de

tensión relativamente bajo, es necesario un convertidor de potencia DC–DC adicional para interconectar la batería y el supercondensador.

El volante de inercia de velocidad ultrarrápida es un sistema almacenamiento de energía emergente que puede ofrecer alta potencia específica y alta energía receptiva. La correspondiente configuración se muestra en la figura (d), donde se selecciona la batería para ofrecer alta energía específica. Debido a esto, el volante de inercia generalmente funciona con una máquina AC para convertir la energía electromecánica; también se necesita un convertidor AC–DC para interconectar la batería y dicho volante de inercia.

2.2.2 VARIACIONES EN PROPULSIÓN ELÉCTRICA.

La siguiente figura muestra dos sistemas de configuración de un VE, donde *D* es el engranaje diferencial, *G* el engranaje fijo, y *M* el motor eléctrico. La configuración que se muestra en (a) es similar a la de los vehículos existentes, remplazando la caja de cambios variable con engranajes fijos y eliminando el embrague. A diferencia de los vehículos actuales, el VE no necesita implementar marchas variables, así que reduce significativamente la complejidad, tamaño, peso y coste de la caja de cambios. Considerando la configuración transversal de un vehículo cotidiano, el sistema del motor que se muestra en (b) tiene las ventajas de ser más compacto y tener mayor eficiencia en comparación a la configuración longitudinal. De hecho, la configuración transversal se emplea comúnmente en los VE.

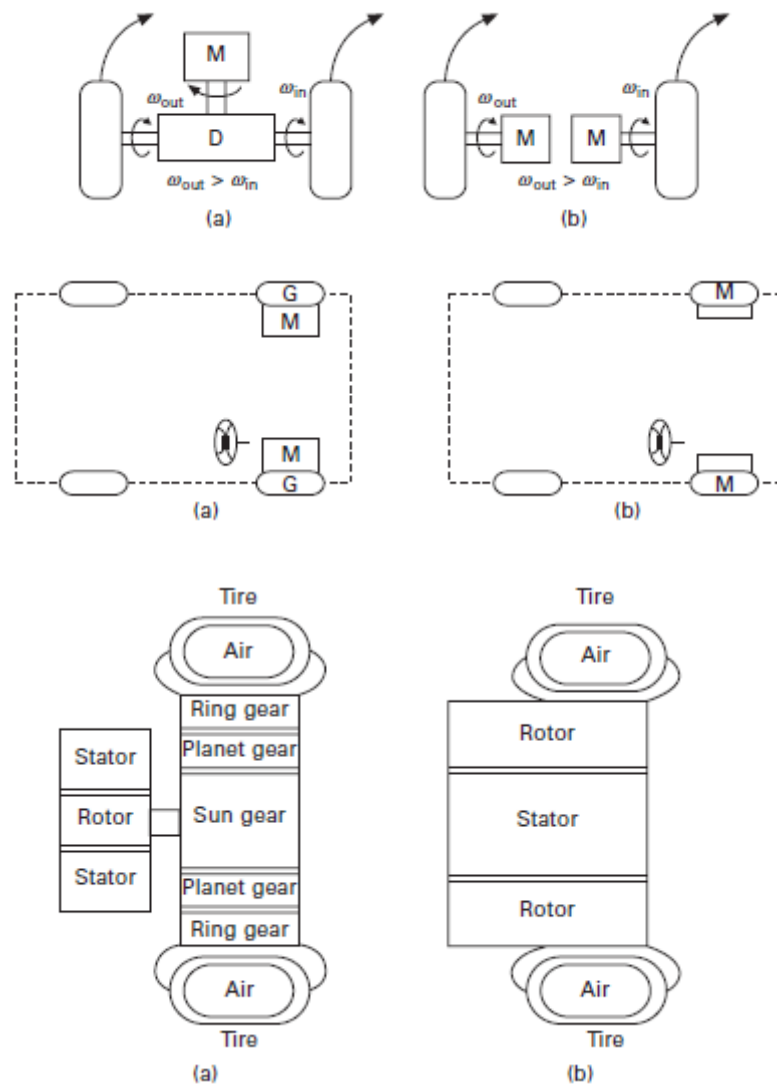


El diferencial es un componente estándar en los vehículos convencionales, por lo que esta tecnología se puede implementar también en los VE. Cuando un vehículo está girando en una curva, la rueda exterior necesita recorrer un mayor radio que la rueda interior. Por lo tanto, el diferencial ajusta la velocidad relativa de las ruedas; si no, las

ruedas patinarían causando fatiga y desgaste, dificultades de conducción y mínimo agarre en la carretera. La figura (a) muestra el diferencial mecánico principal accionado por un motor eléctrico, donde D puede permitir al eje rodar a diferentes velocidades. Este diferencial no es solo voluminoso y fuerte, sino que también es complicado. En el VE también se puede utilizar un diferencial mecánico. Si se pudiera conectar un motor eléctrico a cada rueda, la velocidad se podría controlar de forma independiente y el diferencial debería estar preparado electrónicamente cuando ambas difieran. La figura (b) muestra el principio de diferencial electrónico donde se utilizan dos motores eléctricos. Esta configuración puede eliminar totalmente el diferencial mecánico, ya que reduce en general el tamaño y el peso, además de mejorar el control individual y la eficiencia de la transmisión. El uso de un solo motor con un diferencial mecánico o dos motores con diferencial electrónico todavía es una decisión controvertida. La eliminación del diferencial mecánico puede reducir, en general, el tamaño y el peso; el diferencial electrónico puede controlar la velocidad de las ruedas, así como conseguir mejorar su funcionamiento. Por el contrario, el uso de un motor adicional y un convertidor de potencia provoca un incremento del coste inicial, mientras que la fiabilidad del controlador electrónico para dos motores despierta preocupación por su seguridad.

2.2.3 VARIACIONES DE TRANSMISIÓN EN RUEDA.

Para poder acortar la transmisión mecánica desde el motor eléctrico a las ruedas, el motor eléctrico se puede implementar dentro de una rueda. Esta configuración se denomina motor integrado en rueda. La figura (a) muestra la configuración de dos motores integrados en rueda donde el engranaje fijo se emplea para reducir la velocidad del motor según necesite velocidad la rueda. Para abandonar completamente el engranaje mecánico, la integración del motor puede realizarse instalando un motor eléctrico con rotor externo integrado en la rueda. La figura (b) muestra los dos motores instalados en las ruedas donde el rotor saliente se monta directamente en la llanta de la rueda. De esta forma, el control de velocidad del motor eléctrico es equivalente al control de velocidad de la rueda y, por lo tanto, a la velocidad del vehículo.



Si consideramos la configuración integrada, la máxima velocidad del motor se iguala a la velocidad de reducción máxima del engranaje epicicloidal, el cual se monta entre el motor y la rueda como se muestra en la figura (a). Normalmente, este motor se diseña para funcionar con velocidades superiores a 10000 rpm para aportar una densidad de potencia elevada. Así que, la relación correspondiente del engranaje epicicloidal es 10:1 para proveer a la rueda un rango de velocidad desde cero a 1000 rpm. Inevitablemente, el uso de engranajes mecánicos para reducir la velocidad provoca pérdidas por transmisión, problemas de temperatura y lubricación regular.

La figura (b) representa el motor con rotor saliente en la configuración integrada. Este motor tiene como ventajas su simplicidad y el hecho de que no necesita reductor, ya que ofrece una gran eficiencia de transmisión y no necesita mantenimiento. Sin embargo, a

causa de su inherente requerimiento de baja velocidad de rotación, normalmente inferior a 1000 rpm, el motor eléctrico adaptado a bajas velocidades sufre la desventaja de incrementar su tamaño, peso y coste.

2.3 PROPULSIÓN ELÉCTRICA.

Los motores eléctricos que han sido desarrollados para aplicaciones industriales son diferentes de los utilizados para la propulsión eléctrica. En esencia, un motor de un VE necesita ofrecer alta densidad de potencia y par, alta eficiencia por encima de rangos de potencia elevados y velocidad, buena controlabilidad, alta fiabilidad y no tener coste de mantenimiento.

2.3.1 MOTORES EXISTENTES EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.

Existen gran cantidad de motores eléctricos que se utilizan en la propulsión, adaptándose cuatro de ellos a la conducción del VE: corriente continua (DC), inducción, reluctancia conmutado (SR), y brushles de imanes permanentes (PM). Cada uno de ellos tiene una topología distinta, como podemos ver en las siguientes figuras.

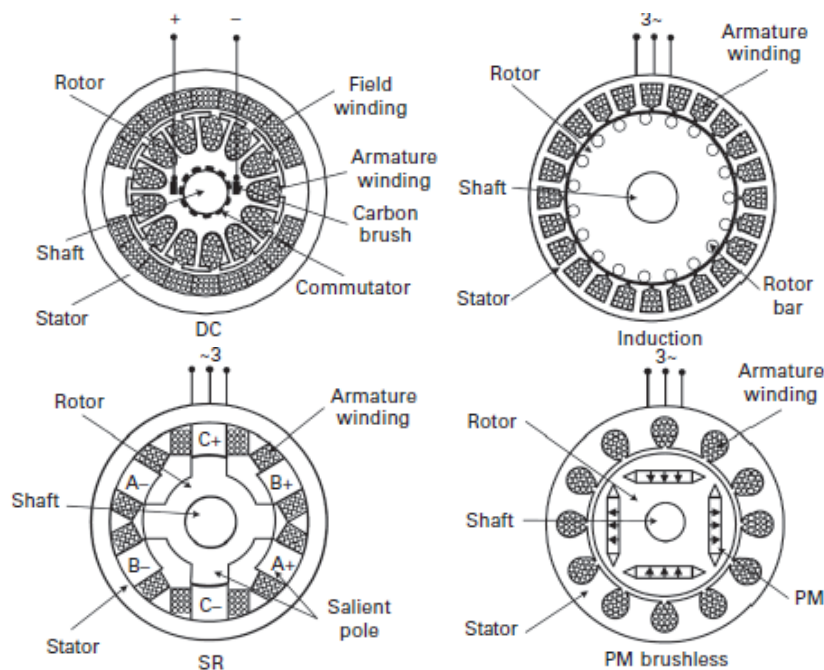


Figura 2.2: Sección de los motores DC, Inducción, SR y brushles PM

MOTOR DC.

Los motores DC se usan ampliamente en los VE. Existen varios tipos de motores DC: shunt, serie, imanes permanentes, excitación independiente y compound.

Todos los motores DC sufren un problema debido al uso de conmutadores y escobillas. Los conmutadores causan un par de rizado y limita la velocidad del motor, mientras que las escobillas son responsables de la fricción y interferencias de radio frecuencia. Además, se requiere un mantenimiento periódico de los conmutadores y las escobillas, lo que hace de ello su mayor desventaja. La mayor ventaja es su simplicidad y control de velocidad. Sin embargo, a causa de su baja eficiencia y necesidad de mantenimiento, los motores DC no son de gran atractivo para los VE modernos.

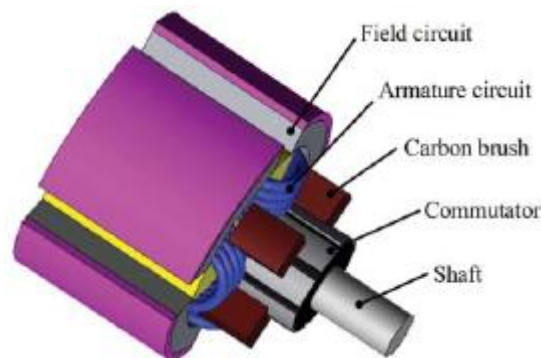


Figura 2.3: Construcción de un motor DC

MOTOR DE INDUCCIÓN.

En la actualidad, los motores de inducción son los más desarrollados en cuanto a tecnología se refiere. Hay dos tipos de motor de inducción: rotor bobinado y rotor en jaula. Debido al alto coste, necesidad de mantenimiento y falta de solidez, el motor de rotor bobinado es menos atractivo que el de rotor en jaula equivalente. Actualmente, el motor de inducción de rotor en jaula se denomina motor de inducción teniendo las ventajas de bajo coste y robustez.

El control de velocidad de un motor de inducción es considerablemente más complicado que el de un motor DC, debido a que su modelo dinámico no es lineal con el acoplamiento entre los ejes directo y en cuadratura. Se necesitan sistemas de control

basados en la variabilidad de tensión y de frecuencia y la orientación del campo (control vectorial). El control mediante tensión–frecuencia no es conveniente en el VE. El control por vectores posibilita que un motor de inducción pueda ser controlado como un motor DC con excitación independiente. El par se puede controlar de forma efectiva para ofrecer una respuesta transitoria rápida. Con la ayuda de microcontroladores de bajo coste, se ha adoptado el control basado en vectores en el VE moderno.

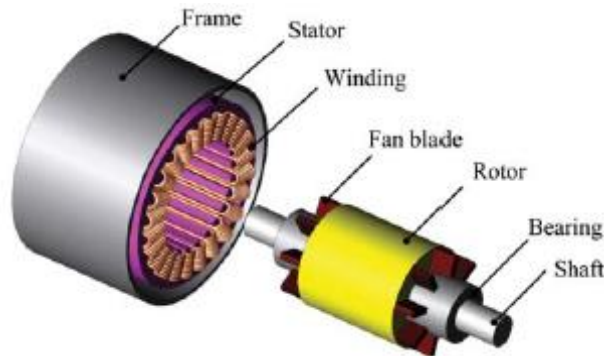


Figura 2.4 : Construcción de un motor de inducción.

MOTOR RELUCTANCIA CONMUTADA (SR).

Los motores SR tienen gran potencial en el VE. Ofrecen las ventajas de una construcción simple, bajo coste de fabricación y una característica pendiente par–velocidad. La principal operación de los motores SR se basa en la regla de “mínima reluctancia”. La dirección del par es independiente de la polaridad de la corriente de fase. Sin embargo, el par se puede generar solo en la mitad de un polo del rotor, creando ondas de gran par. También, debido a su fuerte saturación de polo y al efecto ondulatorio de polos y huecos, normalmente presenta problemas de ruido acústico.

Los motores SR tienen dos modos de funcionamiento. Cuando la velocidad está por debajo de la velocidad base, la corriente se puede limitar mediante “chopping” (control de corriente). En este tipo de control, el par y la constante de par característica se pueden controlar cambiando los límites de corriente. En velocidades altas, el pico de corriente está limitado por la fuerza electromotriz de la fase. La correspondiente característica se controla por conmutación instantánea de fases en la posición del rotor (control de posición angular).

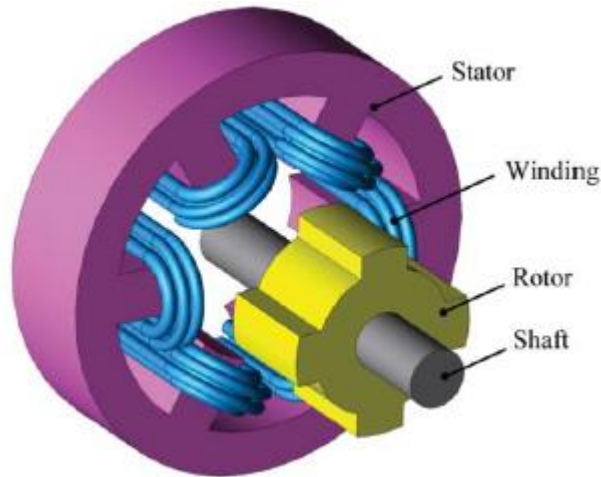


Figura 2.5: Construcción de un motor SR.

MOTOR BRUSHLESS DE IMANES PERMANENTES (PM).

Los motores PM son atractivos para el VE. El campo magnético se excita por alta energía, el peso y volumen pueden reducirse significativamente, destacando su alto par y densidad de potencia. Debido a la ausencia de pérdidas en el cobre del rotor, su eficiencia es intrínsecamente alta. Ya que las pérdidas por calor principalmente se presentan en el estator, puede disiparse fácilmente en el entorno. Sin embargo, el motor PM tiene como inconveniente el alto coste del material y el flujo incontrolable de los imanes permanentes.

Basándonos en la forma de onda de alimentación hasta los terminales del motor, los motores PM se puede dividir en: PM AC (BLAC) y PM DC (BLDC). El motor BLAC se alimenta mediante una corriente sinusoidal alterna, mientras que el BLDC se alimenta mediante corriente alterna rectangular. Actualmente, el motor BLAC normalmente se denomina motor síncrono PM. Ya que la interacción entre el campo trapezoidal y la corriente rectangular produce un mayor par que el producido por una alimentación y corriente sinusoidal, el BLDC posee mayor par y densidad de potencia que el PM síncrono. Mientras tanto, el BLDC tiene una pulsación de par significativa, mientras que el PM síncrono produce un par instantáneo constante.

El control del motor PM síncrono, que funciona con corriente sinusoidal y flujo sinusoidal, es similar al de un motor de inducción. En el motor BLDC, la forma de la onda

no es sinusoidal y se transforma en unos ejes. En ausencia de estos ejes de transformación, la operación de control se basa en la conducción del ángulo.

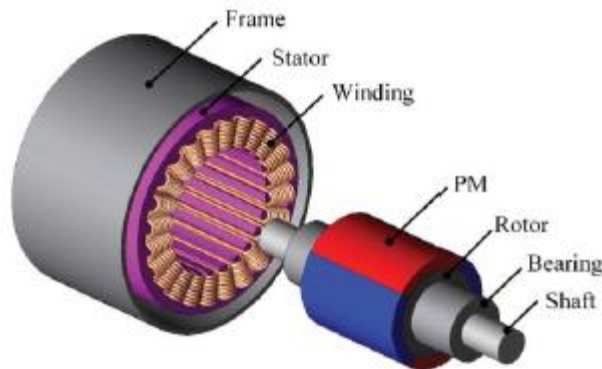


Figura 2.6: Construcción de un motor brushless.

2.3.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS MOTORES DESCRITOS.

Para evaluar los motores mencionados anteriormente del VE, se ha realizado una comparación en términos de su densidad de potencia, eficiencia, control, fiabilidad, madurez, coste, ruido, y mantenimiento requerido. Tal y como vemos en la Tabla 2.1, el problema del motor DC es la necesidad de un mantenimiento periódico, mientras que la desventaja del SR es el ruido acústico; por otra parte en cuanto a ventajas, el motor de inducción tiene un menor coste y el motor PM tiene una alta densidad de potencia y eficiencia. Esta evaluación indica que el motor DC es el menos conveniente, mientras que el motor de inducción y el brushless son los más atractivos.

Tabla 2.1: Evaluación de motores existentes en VE.

	DC	Inducción	SR	PM Síncrono	PM BLDC
Densidad de Potencia	2	3	3.5	4.5	5
Eficiencia	2	3	3.5	4.5	5
Capacidad de control	5	4	3	4	5
Fiabilidad	3	5	5	4	4
Desarrollo	5	5	4	5	4
Nivel de coste	4	5	4	3	3

Nivel de ruido	3	5	2	5	5
Mantenimiento	1	5	5	5	5
Total	25	35	30	35	35
Nota: Sistema gradual de puntos, donde 1 es el peor resultado y 5 el mejor.					

La Tabla 2.2 sintetiza la aplicación de estos motores en VE existentes. Para el motor DC, la aplicación está obsoleta o limitada para versiones que aspiran a la simplicidad. Es raro encontrarse motores SR. Normalmente, la aplicación de motores de inducción y motores PM síncronos está igualada y compartida en el mercado de VE. Con el incremento de la preocupación por la protección del medioambiente y de ahí la demanda de alta eficiencia energética, se anticipa que los motores de inducción serán desbancados por los motores BLDC. Por último, para saber en qué rango de potencias trabajan estos motores, los extremos de utilización son desde 13 kW a 225 kW, dependiendo del peso del vehículo y su uso, mientras que lo normal es 47–80 kW.

Tabla 2.2: Aplicación de motores.

Tipos de Motor	Modelos de coche
DC	Fiat Panda Elettra, Citroën Berlingo Eléctrico, Reva G-Wiz DC
SR	Chloride Lucas
Inducción	GM EV1, BMW Mini E, Tesla Roadster, Reva G-Wiz i
PM Síncrono	Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus Electric, Citroën C-Zero
PM BLDC	Smart Fortwo ED

2.4 INDICADORES DEL ESTADO DE CARGA (SOC)

Al igual que el nivel de combustible de gasolina en los vehículos convencionales, el SOC funciona para proveer al conductor del VE de la información exacta de cuanta energía dispone. De esta forma, el conductor puede planificar el futuro alcance de su viaje antes de recargar. Entre los tres sistemas de almacenamiento de energía en el VE, los indicadores SOC para los supercondensadores y los volantes de inercia de velocidad ultrarrápida son simples. Concretamente, la medida de la tensión de un condensador puede deducirse

directamente a partir de $E = \frac{1}{2}CV^2$ donde C es su capacidad, mientras que la medida del volante de inercia se puede deducir directamente usando $E = \frac{1}{2}Jw^2$ donde J es su momento de inercia. Sin embargo, la determinación del SOC de la batería es mucho más complicada.

Teóricamente, el SOC de las baterías se determina mediante la relación $(C_t/C_r) \cdot 100\%$ donde C_r y C_t son la capacidad residual y total, respectivamente. En general, C_t no está solo significativamente afectada por la descarga de batería, sino que también influye la temperatura y el envejecimiento. A veces, C_t se determina mediante la ecuación de Peukert $C_{ti} = KI(1-n)$ donde I es la corriente de descarga, K y n son constantes empíricas. Aunque se han desarrollado muchos métodos para medir C_r , la única aplicación práctica en el VE radica en los Wh que se han gastado o recuperado en la batería. Este método aporta una precisión razonable para estimaciones a corto plazo de la batería; sin embargo, sufre por la acumulación de errores en un periodo de tiempo de estimación largo. Por otro lado, las medidas de circuitos abiertos pueden reflejar directamente el SOC de algunos tipos de baterías como las Pb-ácido y Li-ion. La principal desventaja de este método es el hecho de que los circuitos abiertos necesitan un extenso período de estabilización después de cargar y descargar. El método de capacidad Wh tiene el mérito de tener suficiente precisión en cortos periodos de tiempo, mientras que el circuito abierto tiene el mérito de alta precisión después de la estabilización; es preferible una combinación de ambos.

Recientemente, se han desarrollado algunos métodos de estimación para determinar directamente la capacidad de batería disponible, más que el SOC, para el VE. Este tipo de método puede estimar la capacidad disponible de diferentes tipos de baterías, incluyendo Pb-ácido, Ni-MH y Li-ion, usando redes neuronales y funciones lógicas donde se tienen en cuenta la descarga de intensidad variable, la temperatura y las influencias del envejecimiento.

3. BATERÍAS.

3.1. APLICACIONES DEL GRAFENO EN LI-ION.

La batería Li-ion, que fue comercializada por primera vez por Sony en 1991, se utiliza ampliamente en muchos aspectos de nuestra vida. Debido a su relativa alta densidad de energía, largos ciclo de vida, y buena seguridad, el área de aplicación de las baterías Li-ion se ha expandido rápidamente en pocos años, oscilando desde pequeños equipos electrónicos portátiles a vehículos eléctricos y grandes equipos de almacenamiento. Para satisfacer la creciente demanda, distintas técnicas avanzadas aumentan continuamente el rendimiento de las baterías Li-ion. Sin embargo, con los valores actuales de rendimiento práctico, energía de densidad, densidad de potencia, y ciclos de vida, será difícil satisfacer la demanda de aplicaciones de baterías Li-ion en grandes sistemas de almacenamiento, especialmente en coches eléctricos. Por lo tanto, se está realizando un gran esfuerzo para mejorar el rendimiento de las baterías Li-ion.

El material de los electrodos son los mayores componentes que dominan, en gran medida, el rendimiento de las baterías Li-ion. Todos los grandes saltos en el desarrollo de las baterías Li-ion están acompañados por una revolución en el material de los electrodos. Consecuentemente, se ha puesto mucha atención en investigar y desarrollar para mejorar los materiales de los electrodos y con ello aumentar el rendimiento de las baterías. Los materiales de electrodos con alta capacidad, mejor índice potencial, mejor ciclo de estabilidad, y mayor seguridad son las metas que están persiguiendo.

De acuerdo a los principales trabajos de las baterías Li-ion, durante el proceso de descarga, dentro de Li-ion el material de los ánodos se extrae hasta el electrolito, y los iones de Li en el electrolito se insertan simultáneamente hasta el material del cátodo, que se acompaña por el traslado de electrones dentro del material del electrodo, generando energía eléctrica en el circuito externo. Por lo tanto, la actuación de las baterías Li-ion están afectadas por los índices de iones de Li y los electrones en el electrodo. Sin embargo, el material del electrodo tiene su propio coeficiente de difusión Li-ion y conductividad eléctrica; estos dos parámetros son relativamente bajos para los materiales más activos. Como resultado, normalmente es necesario modificar los materiales de los electrodos o ajustar su morfología o micro estructura, o hibridar con una segunda fase, para conseguir

rápidamente y combinar la difusión del Litio y el índice de transporte de electrones. Por lo tanto, la modificación de los materiales de los electrodos para cumplir una actuación electroquímica mejor, es también un tema de investigación en el área de las baterías Li-ion.

El desarrollo de los nuevos materiales de electrodos o modificación de los existentes están relacionados con la innovación del material. La aparición del grafeno ha atraído la atención de los científicos que han experimentado con baterías Li-ion. En los últimos años, las investigaciones han demostrado atraer aplicaciones potenciales del grafeno en Li-ion baterías, principalmente debido a su alta conductividad eléctrica, enorme área de superficie, y estructura 2-D única. Desde 2008, los ánodos y electrodos de grafeno han sido declarados como materiales con excelentes actuaciones electroquímicas.

3.2. APLICACIONES DE GRAFENO EN NUEVOS CONCEPTOS DE BATERÍA.

3.2.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, se han alcanzado progresos geniales considerando la aplicación de baterías Li-ion en varias áreas. Estas dominan los sistemas de almacenamiento de energía electroquímicos usados en los dispositivos electrónicos portátiles y han mostrado su potencial en la aplicación en vehículos eléctricos y almacenamiento estacionario de energía. Sin embargo, el desarrollo de baterías Li-ion para grandes escalas de almacenamiento, especialmente en coches eléctricos, ha encontrado un gran obstáculo, que es su relativa baja densidad de energía. Aunque el desarrollo de mejores materiales en electrodos y la mejoría de procesos de fabricación han mejorado continuamente la densidad de energía de Li-ion, su corriente es inferior a $200 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, y una limitación teórica de $300 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, la cual es inferior a la densidad de energía de combustibles fósiles tradicionales. Esto significa que las baterías Li-ion pueden solo abastecer coches eléctricos por una pequeña cantidad de kilómetros después de una carga completa. Por lo tanto, es urgente desarrollar nuevos almacenamientos de energía con densidades de energía mucho más altos que las baterías Li-ion.

Entre varias técnicas nuevas de almacenamiento de energía, las baterías litio-azufre y litio-aire son las más atractivas. Debido al diferente mecanismo electroquímico de

almacenar energía, las baterías Li-S y Li-aire han mejorado significativamente la densidad de energía en comparación a baterías Li-ion. La densidad de energía teórica de las baterías Li-S basada en la masa total del ánodo y el cátodo se estima que sea iguala a $2.600 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, y el valor correspondiente para baterías Li-aire supera los $10.000 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$. Como resultado, estas dos nuevas baterías de Li están tomando protagonismo como substitutas de las baterías Li-ion en futuras aplicaciones limpias y sostenibles de almacenamiento de energía.

En comparación con las baterías comerciales de Li-ion, las baterías Li-S y Li-aire todavía no están listas para aplicaciones prácticas. Se han llevado a cabo muchas investigaciones en estos años para mejorar su actuación electroquímica, su capacidad y sus ciclos de estabilidad. Los materiales de los electrodos, especialmente los cátodos de azufre y aire, han llegado a ser el principal objeto de estudio. Recientemente, ha atraído mucha atención la aplicación del grafeno en el diseño y síntesis de electrodos para baterías Li-S y Li-aire. De esta forma, se han conseguido mejoras efectivas en la carga y descarga de las baterías Li-S y Li-aire después de la llegada del grafeno.

3.2.2 APLICACIÓN DEL GRAFENO EN BATERIAS LI-S.

3.2.2.1 INTRODUCCIÓN.

La batería Li-S, que posee una densidad de energía mucho más alta que una batería Li-ion, ha llamado la atención en el mundo entero en estos años. En una configuración típica de batería Li-S, S y Li se aplican en el cátodo y el ánodo, respectivamente, y la batería funciona con electrolitos orgánicos. La pareja Li-S puede producir una capacidad teórica específica de $1675 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ y una energía específica teórica de $2600 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ basado en la completa reacción del Li con S para formar Li_2S . Adicionalmente, S es abundante en varios minerales, es barato, y es ecológico. Sin embargo, la batería Li-S no ha llegado a comercializarse en masa porque todavía existen algunos problemas químicos en la pila. En primer lugar, S y sus productos reducidos están protegidos, causando una pobre actividad electroquímica. En segundo lugar, los polisulfatos intermedios generados durante los ciclos de carga/descarga son solubles en el electrolito, causando una rápida pérdida de capacidad. En tercer lugar, la interrelación Li/electrolito no se controla

correctamente, dando como resultado insuficientes ciclos de estabilidad. Por consiguiente, es necesaria la modificación de un cátodo de S para vencer sus intrínsecas deficiencias. En primer lugar, se necesita añadir un conductor eléctrico para mejorar la conductividad del S. Mientras tanto, el tamaño del S debería minimizarse para cortar la difusión de iones de Li y el electrolito, y también reducir el volumen de expansión del S. Además, la superficie de protección del S está recomendada para inhabilitar la disolución de polisulfatos. Para la modificación del S se emplean derivados del carbón, que tienen alta conductividad, y variables estructuras y morfologías. Recientemente, el grafeno, como nuevo miembro de derivados del carbón, está empezando a jugar un importante papel en la aplicación de almacenamiento de energía debido a su elevada conductividad eléctrica, gran superficie de área, y nano estructura flexible en 2-D. Estas características también dotan al grafeno con gran potencial en la modificación del cátodo S para las baterías Li-S.

3.2.2.2 PROGRESOS DE LA APLICACIÓN DE GRAFENO EN BATERIAS LI-S.

El primer estudio con materiales grafeno/S para baterías Li-S fue publicado en 2011 por Wang y su equipo. Su experimento fue bastante simple. Primero se mezcló una nanocapa de grafeno con azufre en una relación de peso 1/1.5. Luego, se calentó la mezcla a 200 °C para permitir la infiltración de S en las capas de grafeno. Finalmente, calentaron la mezcla a 300°C dando una capa de S en láminas de grafeno. El resultado fue una distribución homogénea de S y C en el compuesto; de manera que el azufre se cubrió irregularmente en láminas de grafeno. Además, el porcentaje de peso del azufre fue bastante bajo (22%) en el compuesto grafeno/S. La capacidad de descarga inicial del compuesto basado en la masa de azufre en una densidad de corriente de $50 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ fue medida para ser $1611 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$, que es un 96% del valor teórico y fue más alto que en azufre puro ($1100 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$), sugiriendo una alta utilización de S por modificación con grafeno. Sin embargo, el ciclo de estabilidad en el compuesto no se mejoró mucho. La capacidad de descarga disminuyó rápidamente a menos de $600 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ después de 40 ciclos, probablemente debido al hecho de que el S no se ancló firmemente en las láminas de grafeno y se expuso directamente en los electrolitos.

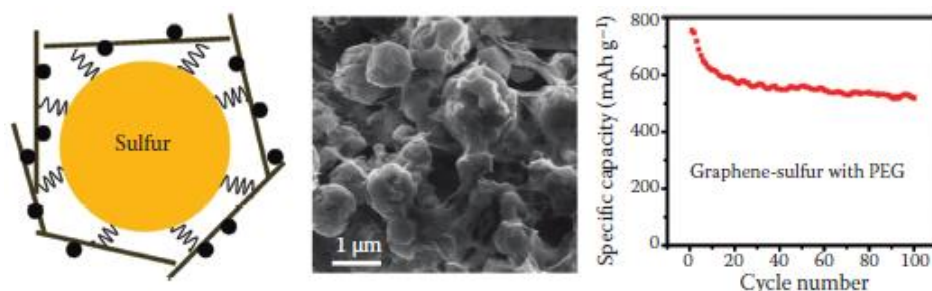


Figura 3.1: Modelo de estructura, imagen SEM, y ciclo de actuación de un cátodo con S envuelto en grafeno.

Más tarde, el compuesto grafeno/S con una nueva estructura y mejorado el comportamiento electroquímico fue publicado por el equipo de investigación de Cui y Dai. La idea principal de su investigación fue envolver partículas de S en láminas de grafeno para ocupar el volumen de expansión de S durante los ciclos de carga/descarga, atrapar polisulfatos intermedios solubles, además de mejorar la conductividad eléctrica del S. Como ilustra la figura 3.2, partículas de S fueron sintetizadas por la reacción de trisulfato de sodio con HCl en la solución acuosa en presencia de un surfactante (Triton X-100). El surfactante podría controlar el crecimiento de las partículas de azufre para limitar su tamaño. Luego, las partículas de S preparadas se mezclaron con óxido de grafeno (GO) ligeramente oxidado cargado con nano partículas de carbón negro para producir el décimo ciclo al cien. Por comparación, también se midió la actuación de las partículas de S cubiertas de surfactante sin lámina de grafeno. Su capacidad descendió drásticamente desde $700 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ hasta $330 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ en 20 ciclos. En otro experimento de control, partículas de S mezcladas con láminas de grafeno pero sin recubrimiento de surfactante también mostraron pobres ciclos de estabilidad. Estos resultados claramente indicaron que grafeno y surfactante PEG jugaba un importante papel en mejorar los ciclos de vida del S. El surfactante podría servir como amortiguador para acomodar el cambio de volumen del S durante el ciclado. Mientras tanto, cadenas de PEG estaban también disponibles para capturar polisulfatos. La capa de grafeno podría más a fondo inmovilizar el S, y las láminas cubiertas de carbono negro permiten conductividad eléctrica a las partículas de S. Consecuentemente, el material compuesto S/grafeno mostró excelente comportamiento electroquímico.

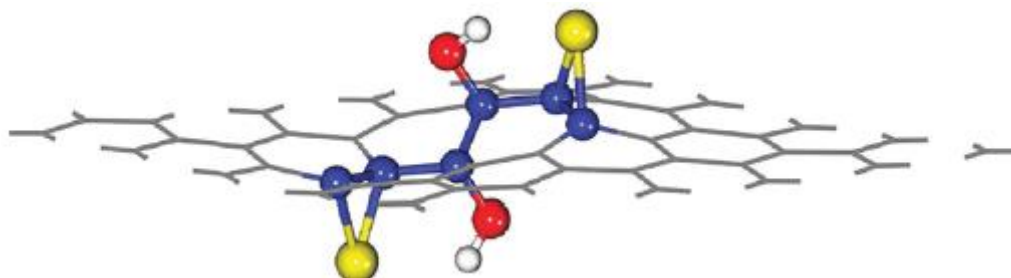


Figura 3.2: Muestra representativa de GO inmovilizando S. Los grupos hidroxyl mejoran el amarre de S en los átomos de C. Las esferas amarillas, rojas y blancas, representan átomos de S, O, y H, respectivamente, mientras que los otros son átomos de C.

Unos pocos meses más tarde, Ji et al. propuso otra gran mejora del compuesto S/grafeno con diferente micro estructura. En su trabajo, formaron fuertes enlaces entre S y GO, que ayudaron a inmovilizar firmemente el S en capas de grafeno, subiendo de forma espectacular los ciclos de estabilidad. Como muestra la figura 3.2, el epoxy junto a grupos de hydroxyl podrían mejorar el amarre de S al enlace C-C debido a las ondas inducidas por estos grupos funcionales. Medidas electroquímicas del nano compuesto S/GO mostraron que en un índice de 0.02 C podría entregar una descarga inicial alta de $1320 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ (basado en la masa de S). Una capacidad reversible de $1247 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ (correspondiente a un índice de retención de 94.5%) podría también retenerse en el segundo ciclo. Después, la pila fue ciclada en 0.1C. La capacidad reversible permaneció en $1000 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ en el primer ciclo y disminuyó a $950 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ en el segundo ciclo. En los siguientes 50 ciclos no decayó la capacidad, mostrando un espectacular ciclo de estabilidad del compuesto S/GO. La buena reversibilidad y estabilidad del nano compuesto podría atribuirse a la primera interacción fuerte entre S y GO. Los grupos funcionales en GO podrían formar fuertes enlaces químicos con S, que inmovilizan de forma efectiva el S y previenen la disolución de polisulfitos. Mientras tanto, el íntimo contacto entre los dos componentes fue favorable para una buena accesibilidad de electrones y Li-ion.

Aunque el grafeno se emplea sobre todo en la modificación del cátodo de S para mejorar el comportamiento electroquímico, varios grupos de investigadores han intentado explorar otras funciones del grafeno en baterías Li-S. Wang y sus compañeros publicaron la aplicación de láminas de grafeno como una inter-capa inhibidora y transportadora. En contraste a otras investigaciones en que el grafeno fue incorporado con S para formar un cátodo compuesto, en esta prueba, una capa independiente de grafeno que fue puesta entre el cátodo de S y el separador se usó para inhibir la difusión de polisulfatos disueltos en el

ánodo. La lámina de grafeno podría prepararse fácilmente por filtración en vacío de GO suspendido y posteriormente una reducción caliente. Sin embargo, las láminas de grafeno se amontonaban firmemente en la película, lo que dificultó el paso y difusión de electrolito. Luego, los autores añadieron nanopartículas de carbón negro en las películas de grafeno para agrandar los huecos entre láminas de grafeno y generar más canales para la imprecación de electrolitos y poli sulfatos. Con un índice de peso de grafeno/carbón negro igual a 2/1, la pila que usaba esta inter capa mostró un excelente ciclo de estabilidad. Mostró una capacidad inicial de $1260 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ y se mantuvo en $894 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ después de 100 ciclos, correspondiente a una retención de capacidad de 70%. Un mapeado elemental mostró una distribución homogénea de S en la película, implicando la captura de polisulfatos de la película durante el ciclado. El FTIR reveló que los enlaces C-O y C=O desaparecían mientras los enlaces S-S y CO_3^{2-} emergían durante el ciclado. Los anteriores resultados demostraron que la película de grafeno fue efectiva para capturar e inmovilizar polisulfatos por sus grupos funcionales de oxígeno, que podría utilizarse como un transportador-inhibidor para mejorar el ciclo de estabilidad de las baterías Li-S.

3.2.3 APLICACIÓN DEL GRAFENO EN BATERÍAS LI-AIR.

3.2.3.1 INTRODUCCIÓN.

La batería Li-aire es otro tipo de sistema de almacenamiento de alta densidad de energía. El metal Li se utiliza como ánodo en las baterías Li-aire. En la descarga, el Li se oxida para generar Li^+ hasta el electrolito, y en la carga ocurre el proceso reversible. El cátodo de la batería Li-aire normalmente adopta materiales porosos y conductores, y el aire, o más específicamente, oxígeno, se emplea como combustible para generar energía eléctrica en los materiales porosos. Esta reacción de reducción catalítica depende fuertemente de las propiedades del electrolito. Cuando se emplea un electrolito apropiado no acuoso, el O_2 se reduce para formar O_2^{2-} , que posteriormente combina con Li^+ en el electrolito desde el ánodo de Li para formar Li_2O_2 como producto de la descarga. El Li_2O_2 se descompone en la carga. Si se usa un electrolito acuoso, se forma OH^- en lugar de O_2^{2-} , dando como resultado LiOH como producto de la descarga. Luego, el LiOH se oxida en la carga. Debido a la diferencia significativa de la reacción electroquímica y la descarga

producida entre electrolitos no acuosos y acuosos, las baterías Li-aire normalmente se dividen en las categorías de baterías Li-aire no acuosas y acuosas. Como el oxígeno es inagotable en el aire, la capacidad de una pila Li-aire teóricamente solo depende de la masa de Li que se usa en el ánodo. Por lo tanto, las baterías Li tienen una densidad de energía ultra alta de más de $10.000 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$. La actuación práctica, incluyendo capacidad y reversibilidad de una pila Li-aire, está afectada por la actividad catalítica de la reducción de oxígeno y regeneración en el cátodo no material independientemente del tipo de electrolito que se utilice. Por lo tanto, el diseño y preparación de una alta actuación del cátodo ha llegado a ser el mayor tema de investigación de las baterías Li-aire. Los materiales de carbón poroso se han empleado extensamente como el catalizador en el cátodo. Como un nuevo tipo de material de carbón, el grafeno ha mostrado excelentes ventajas en comparación con los tradicionales materiales de carbón en mejorar la actividad catalítica en el cátodo.

3.2.3.2 BATERIAS LI-AIRE ACUOSAS.

Como su nombre implica, las baterías acuosas Li-aire usan electrolitos acuosos en lugar de disolventes orgánicos, aplicados en baterías Li-aire no acuosas. A causa de esta diferencia, el mecanismo de la reacción de reducción de oxígeno es diferente entre baterías Li-aire acuosas y no acuosas. La descarga producida en una batería Li-aire acuosa es normalmente LiOH, más que Li_2O_2 en una no acuosa. Como el Li es sensible al agua, es necesario un separador que obstruye la difusión de agua mientras mantiene la alta conductividad del Li-ion. Una película de cristal Li conductor es aplica normalmente como separador. Haoshen Zhou, desde el Instituto nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada en Japón, ha hecho importantes contribuciones a las baterías Li-aire. Recientemente, Wang y Zhou propusieron un sistema híbrido combinando electrolito no acuoso en el ánodo de Li y electrolito acuoso en el electrodo de aire. Más adelante, aplicaron grafeno en el electrodo de aire de esta batería híbrida Li-aire para obtener mejor comportamiento.

En 2011, Zhou y su grupo de investigación propusieron usar grafeno como un electrocatalizador puro de carbón por primera vez en baterías no acuosas Li-aire. La

estructura de las baterías se muestra en Figura 3.3. se preparó el grafeno por reducción química de GO, y tuvo una superficie específica de área de $342.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. La base de grafeno catalizadora mostró una descarga inicial de tensión de 3.0 V en una densidad de corriente de $0.5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, que fue solo ligeramente más baja que el valor de un electrocatalizador convencional basado en Pt (3.05 V), mostrando excelente actividad electrocatalítica. También se midió la actuación de ciclado de la pila. La diferencia de tensión entre las curvas de carga y descarga en el primer ciclo del electrodo de aire basado en grafeno fue 0.56 V, que fue relativamente bajo para las baterías Li-aire. Sin embargo, la diferencia se incrementó gradualmente a 1.2 V después de 50 ciclos. Probablemente, la creciente diferencia de tensión se debió a la corrosión del grafeno promovido por vacantes y defectos en las láminas de grafeno reducido químicamente. También, se notó que la diferencia de tensión entre el primer y el 50 ciclo fue 2 veces más alta que el correspondiente al valor de descarga de tensión, indicando que la corrosión fue más severa en el proceso de carga, probablemente, como resultado de la oxidación del grafeno por átomos de oxígeno realizados en el proceso de carga. La estabilidad del ciclado de la pila podría mejorarse de forma efectiva con un tratamiento de calentamiento de las láminas de grafeno.

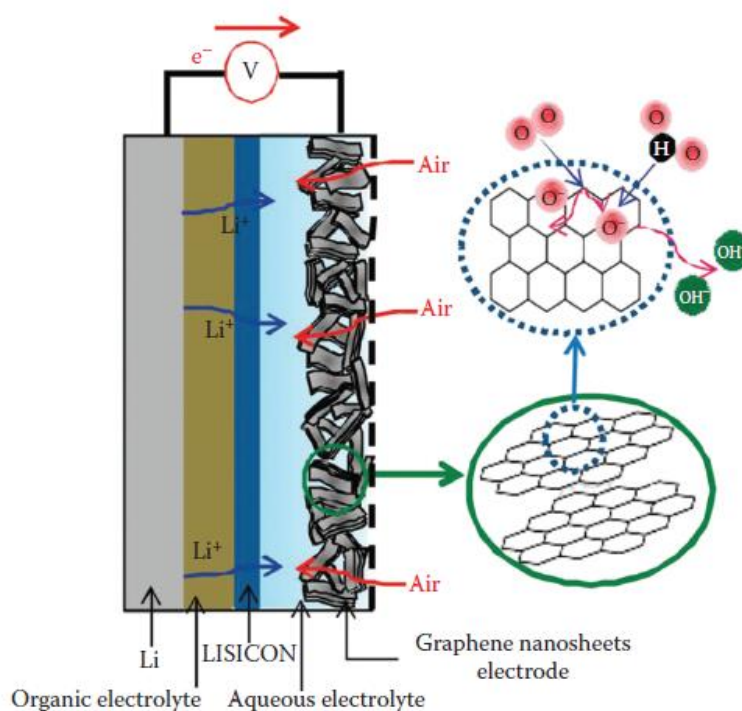


Figura 3.3: Estructura de una batería Li-air acuosa.

Zhou y compañeros de trabajo propusieron un nuevo electrodo mediante un simple lápiz en el electrolito denominado LISICON. En comparación con las baterías tradicionales acuosas Li-aire, el electrodo de aire fue un sólido completo sin electrolito líquido. Debido al abundante grafito en el lápiz, las trazas en la película de LISICON se formaron con nano láminas de grafito mecánicamente exfoliado. En una densidad de corriente de $0.1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$, la pila tuvo una descarga estancada en un rango de tensión entre 2.5 y 2.8 V y una capacidad de descarga de $950 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ para una tensión final de 2.0 V. La pila también mostró una capacidad constante relativamente durante 15 ciclos. La actuación electroquímica de la pila está todavía por debajo de la demanda para aplicaciones prácticas.

3.2.3.3 BATERIAS LI-AIR NO ACUOSAS.

La reacción de reducción de oxígeno (ORR) tiene lugar en el cátodo de las baterías no acuosas Li-aire. Para mejorar la energía cinética y la densidad de la batería, la estructura porosa del cátodo debería optimizarse para realizar una rápida difusión de oxígeno, acelerar la reacción catalítica y prevenir el excesivo crecimiento de descarga. La aparición del grafeno aporta otra opción en el diseño y síntesis de cátodos de carbón a causa de las propiedades físico-químicas excelentes del grafeno.

La primera publicación de un electrodo de aire basado en grafeno para baterías Li-aire no acuosas fue publicado por Li y sus compañeros en 2011. La pila, usando el electrodo de grafeno, podría alcanzar una capacidad de $8705.9 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$, que fue 4-8 veces más alta que en las pilas que utilizan carbón comercial para el electrodo de aire y fue la más alta capacidad publicada para un electrodo basado en carbón. Podría atribuirse principalmente a la diferente estructura porosa del electrodo de grafeno.

Brevemente después, científicos del Laboratorio Nacional del Noroeste Pacífico mejoraron la actuación de un electrodo de aire basado en grafeno diseñando una estructura porosa jerárquica usando láminas de grafeno, como muestra la figura 3.4. La estructura porosa jerárquica se consideró una estructura ideal para el electrodo de aire. La gran cantidad de túneles podrían ayudar de forma efectiva a la rápida difusión de oxígeno mientras los pequeños poros de la cáscara aportan regiones trifásicas (sólido-líquido-gas) para el ORR. Cuando la pila Li-aire, que usa el grafeno poroso como electrodo de aire, se testeó en O_2

puro con una presión inicial de 2 atm, la capacidad de descarga podría llegar como mucho a $15000 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ con una tensión constante de 2.7 V, correspondiente a una alta densidad de energía de $39714 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$. Para evaluar la actuación práctica, la pila también se testeó en un ambiente con un O_2 parcial, presión de 0.21 atm y 20% de humedad relativa. La pila podría todavía alcanzar una capacidad de descarga de $5000 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ en una densidad de corriente de $0. \text{mA} \cdot \text{g}^{-1}$.

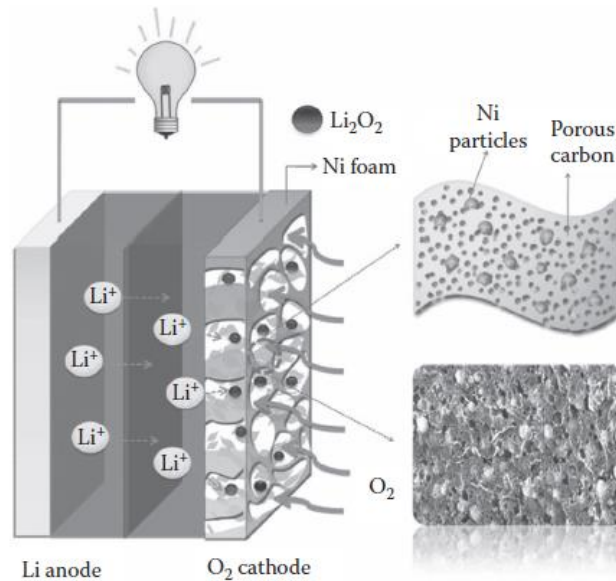


Figura 3.4: Estructura de batería Li-air no acuosa.

3.3 MODELADO DE UNA BATERÍA.

Un modelo común de una simple batería se muestra en la figura. Está compuesta de una fuente de tensión DC ideal con tensión en circuito abierto V_{oc} y una resistencia interna equivalente constante R_{int} . La tensión en los terminales de la batería es V_t . El valor de V_{oc} se puede medir a circuito abierto y R_{int} se puede medir mediante conexión de una carga y medición de la tensión e intensidad en los terminales. La tensión en los terminales V_t se puede obtener como $V_t = V_{oc} - I_b R_{int}$.

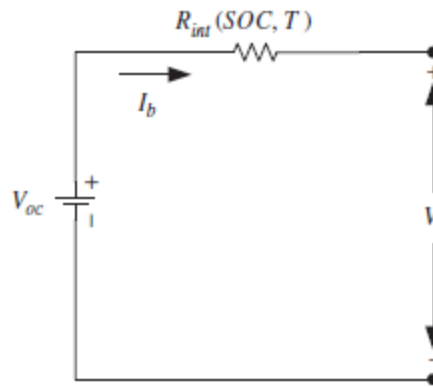


Figura 3.5: Circuito batería RC

El equilibrio potencial de la batería, V_{oc} , es una función no lineal del SOC y la temperatura T dados por Larminie y Lowry:

$$V_{oc} = E_o + (RT/F) \cdot \ln(\text{SOC}/(1-\text{SOC}))$$

donde E_o es el potencial inicial de la batería, R es la constante ideal, T es la temperatura absoluta, y F es la constante de Faraday.

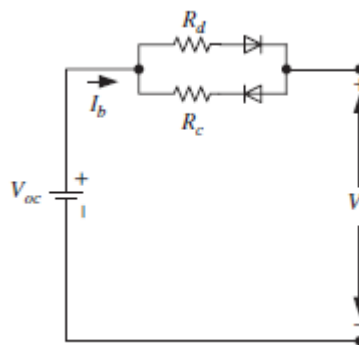


Figura 3.6: Circuito con R paralelas.

Esta es una buena manera de predecir la tensión de la batería. Sin embargo, la tensión de circuito abierto no permanece constante. La tensión se ve afectada por el SOC/DOD de la batería y por la temperatura. La variación de tensión en circuito abierto debido a DOD, para una pila de batería de plomo ácida, mediante Larminie y Lowry es:

$$V_{oc} = (2.15 - \text{DOD} \cdot (2.15 - 2.0))$$

La principal desventaja de este modelo es que no puede capturar la respuesta de forma dinámica en una batería. Por ejemplo, si se conecta una carga a la batería, la tensión en los terminales cambiará inmediatamente a una nueva, un valor más bajo de acuerdo a este modelo simplificado. De hecho esto no es verdadero; más bien llevará algún tiempo para fijar un nuevo valor.

La resistencia interna de la batería tiene valores diferentes en carga y descarga. Para representar los diferentes valores de resistencia bajo condiciones de carga y descarga, el modelo de circuito se puede modificar como se muestra en la figura. Se puede obtener un modelo mejorado incorporando resistencia de autodescarga R_p en paralelo con la fuente de tensión V_{oc} .

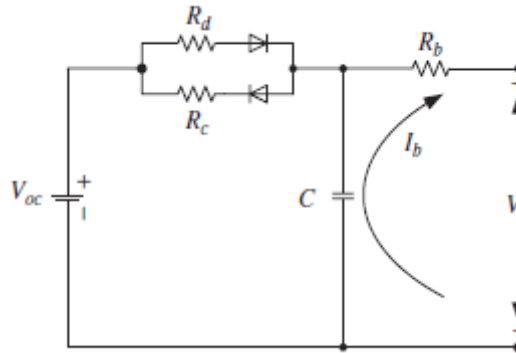


Figura 3.7: Circuito con condensador.

En este modelo, la resistencia interna toma diferentes valores durante la carga y descarga: R_c para carga y R_d para descarga. La resistencia interna se usa para modelar todas las pérdidas de energía dentro de la batería durante la carga y descarga, incluyendo pérdidas eléctricas y no eléctricas. Los diodos ideales están presentes solo para modelar, seleccionando R_d o R_c como resistencia interna basado en la dirección de la corriente. Para una potencia dada, la corriente de la batería I_b se expresa como:

$$I_b = \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4 \cdot R \cdot P_{req}}}{2R}$$

donde:

$$R = \begin{cases} R_{discharge}(SOC, T) & \text{for } I_b \geq 0, P_{req} \geq 0 \\ R_{charge}(SOC, T) & \text{for } I_b < 0, P_{req} \leq 0 \end{cases}$$

La corriente I_b es positiva en el periodo de descarga y negativa en el periodo de carga.

Estos modelos tienen la ventaja de no ser sensibles a sucesos dinámicos en la batería. Para modelar tanto los efectos dinámicos o transitorios en una batería, se añade un condensador en una rama conectada en paralelo, como muestra la figura 6.

El modelo en ADVISOR, dado en la figura 7, se denomina modelo “RC”; toma potencia como entrada y mantiene la tensión de salida dentro del alto y bajo límite de tensión. Este modelo puede predecir la temperatura interna de la batería con una función de tiempo durante la conducción y periodos en reposo. En este modelo, el condensador C_b es suficientemente grande para mantener la capacidad de la batería y el condensador más pequeño C_c se utiliza para reflejar los cambios dinámicos en la batería.

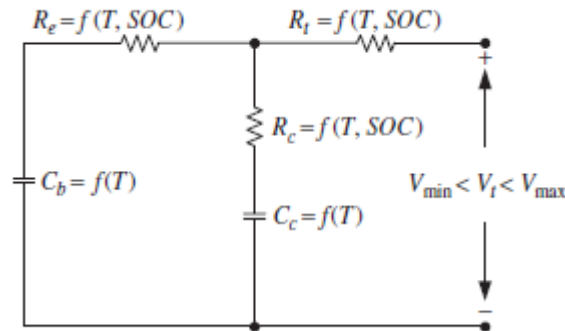


Figura 3.8: Esquema eléctrico batería RC

4. ADVISOR. ¿QUÉ ES? ¿PARA QUÉ SE UTILIZA?

ADVISOR, NREL's ADvanced VehIcle SimulatOR, es un conjunto de modelos, información, y archivos script que se ejecutan y emplean en Matlab y Simulink. Está diseñado para análisis rápidos de comportamiento y eficiencia de vehículos convencionales, híbridos y eléctricos. También aporta una estructura de simulación y análisis detallado de componentes definidos por el usuario, un punto de inicio de información verificada y algoritmos desde los cuales se pueden obtener todas las ventajas de la flexibilidad de modelado de Simulink y el poder analítico de Matlab.

A continuación, vamos a describir algunas de las características principales de ADVISOR:

- Estimar la eficiencia de combustible en vehículos que aún no se han construido.
- Aprender como los vehículos convencionales, híbridos o eléctricos usan la energía a través de su transmisión.
- Comparar las emisiones relativas de gases producidas en un número de ciclos.
- Evaluar una estrategia de mantenimiento de energía para un vehículo híbrido.
- Optimizar los índices de marcha en sus transmisiones para minimizar el consumo de combustible o maximizar su comportamiento, etc.

5. COMO FUNCIONA ADVISOR.

Tenemos dos opciones a la hora de trabajar con ADVISOR, a través de la GUI que nos ofrece o, mediante llamadas desde la "Command Window" de Matlab. En nuestro caso utilizaremos la GUI, ya que será más ilustrativa y conveniente para el trabajo que vamos a desarrollar.

Una vez ejecutamos la GUI de ADVISOR la figura inicial que nos muestra es la siguiente:



Figura 5.1: Pantalla principal ADVISOR.

En primer lugar, podemos seleccionar unidades US o Métricas. Pulsando Start comenzamos a utilizar ADVISOR, el botón “Help” nos conduce a una página web local de ADVISOR, “Exit” nos sacaría de la GUI.

Podemos seleccionar un perfil desplegando el menú que está justo encima del botón “Star”. Esta lista de perfiles contiene archivos *.mat*, que definen los componentes que aparecerán en la figura de entrada. También determinará qué ciclos son ejecutables en la figura de configuración. Se suele editar este perfil para conseguir una configuración de simulación más personalizada y adaptada al caso que nos ocupe través de ADVISOR, además de eliminar o añadir los componentes pertinentes clicando el botón próximo a los componentes. Se debe añadir, eliminar o crear nuevos perfiles seleccionando “edit list” desde el menú desplegable en la pantalla de inicio.

5.1 DEFINICIÓN DE UN VEHÍCULO.

Pulsamos Start en la pantalla inicio. Entramos en la Figura y nos muestra valores estándar para un vehículo específico.

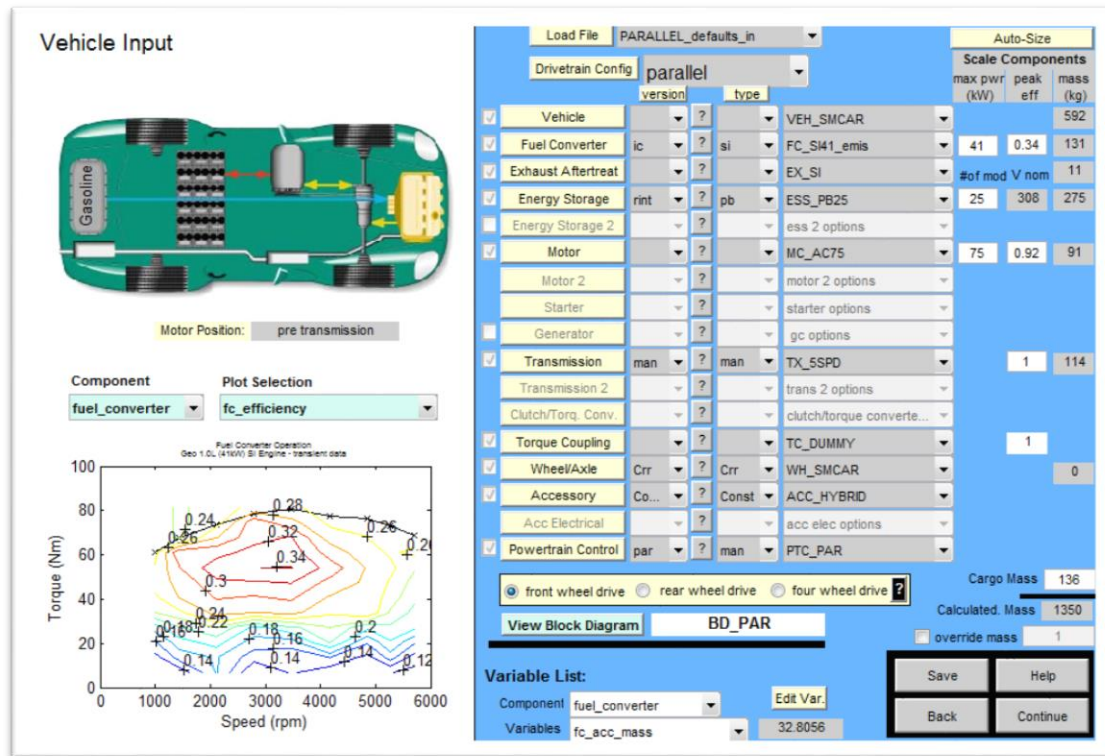


Figura 5.2: Pantalla inicial.

DRIVETRAIN SELECTION

Desde el menú de tren de rodaje será posible seleccionar la configuración de este (serie, paralelo, etc.) que cambiará el esquema del vehículo, situado en el lado izquierdo, de acuerdo a lo seleccionado. Esto también modificará que componentes están disponibles para el tipo de tren de rodaje elegido.

SELECCIÓN DE COMPONENTES

Después de seleccionar la configuración del tren de rodaje, todos los componentes del vehículo pueden ser seleccionados utilizando los menús emergentes, o clicando en los componentes del esquema. A la izquierda de los menús de los componentes hay un botón que permitirá añadir o eliminar componentes seleccionando sus correspondientes archivos

.m. El archivo .m de un componente específico puede ser abierto para ser modificado, otra posibilidad es clicar en el componente del esquema del VE.

EDITAR VARIABLES

Tras seleccionar todos los componentes deseados para el vehículo, las entradas variables escalares pueden ser modificadas. Para ello pulsaremos en el botón “Edit Var” de la lista de variables de la figura. Primero se selecciona las variables a cambiar y después haciendo click al botón editar para cambiar su valor. El valor estándar se muestra para poder tener una referencia. El botón “View All” permite ver todas las variables que se han alterado. Puedes clicar en el botón ayuda para ver una descripción junto con las unidades utilizadas para la entrada de variables. Una segunda forma para editar variables es introduciendo el valor deseado en el recuadro, próximo a la componente.

CARGAR Y GUARDAR CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO

Para cargar o guardar una configuración clicamos en “Load Vehicle” encima de la figura o clicamos en guardar en el botón de la figura. El archivo será guardado en formato “filename_in.m”. Una vez guardado el vehículo podemos acceder a él de nuevo pulsando “Load”.

AUTO-SIZE

El botón auto-size coge el vehículo seleccionado y ajusta los parámetros del vehículo hasta encontrar una aceleración y degradación final. Los parámetros ajustados son la escala de par convertido en combustible, la escala de par controlado por el motor, el número de módulos del sistema de almacenamiento de energía, y la masa del vehículo. La escala mínima de par es fija hasta que su potencia pico de salida es 45 kW. El número de módulos de batería está limitado para ceder una tensión máxima nominal de 480V. El comportamiento estándar objetivo es mantener en menos de un 6% a 55 mph, y obtener menos de 12 segundos 0-60 mph, 23.4 segundos 0-85 mph, y 5.3 segundos 40-60 mph.

5.2 INICIAR UNA SIMULACIÓN

La figura de simulación nos da varias opciones para testear el vehículo que ya hemos definido.

SELECCIÓN TIPO DE CONDUCCIÓN

Si el botón “drive cycle radio” es seleccionado, podemos usar el menú desplegable para seleccionar de una lista varios ciclos de conducción disponibles. Podemos luego seleccionar cuantas veces queremos que el ciclo se repita como también si queremos una corrección SOC. Las condiciones iniciales también pueden ser puestas desde aquí.

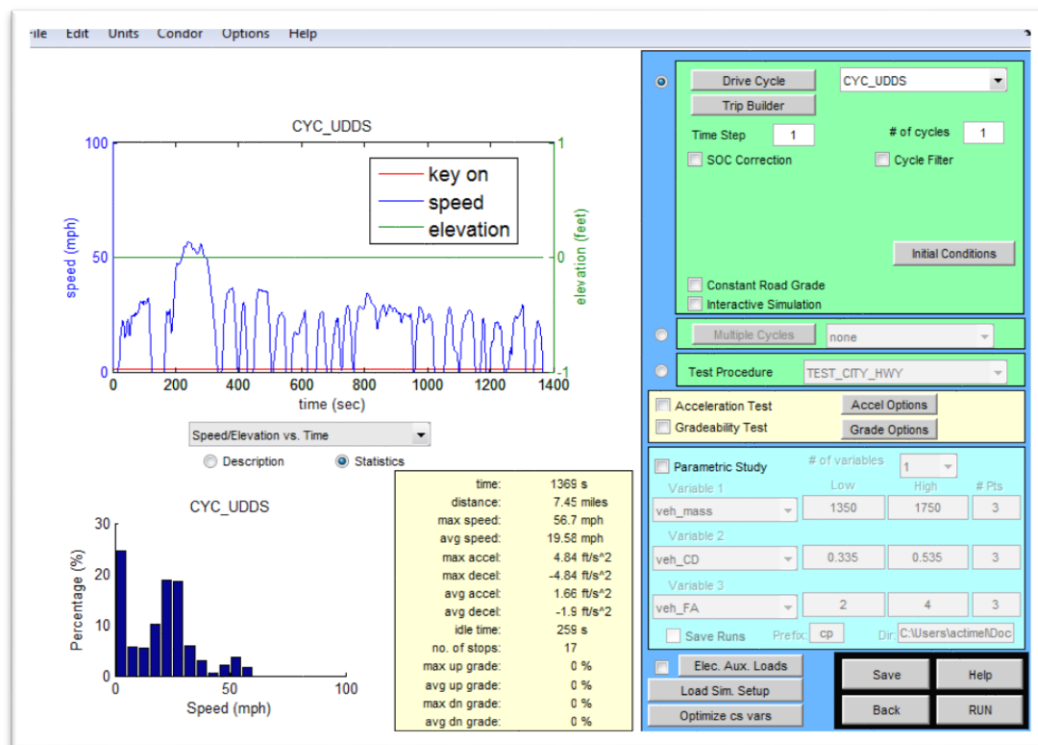


Figura 5.3: Pantalla de simulación.

TRIP BUILDER

Usando esta función un ciclo puede ser creado combinando diferentes tipos de ciclos. Este nuevo ciclo luego puede guardarse en el formato normal y puede ser utilizado cuando se desee.

AUXILIARY LOADS

Seleccionando este botón emerge una interfaz gráfica para seleccionar diferentes cargas auxiliares y sus tiempos on/off relacionados con el ciclo de conducción.

SOC CORRECT

Hay dos opciones de corrección SOC: lineal o delta cero. El SOC lineal ejecuta dos simulaciones- una que da un cambio positivo en el estado de carga y una que da un cambio positivo en SOC. El valor corregido de la variable de interés es luego interpolado desde el cambio cero en SOC de una entrada lineal a los dos puntos. La corrección Zero-Delta ajusta el inicial SOC hasta que la simulación se ejecuta produciendo un cambio cero en SOC +/- con un 0.5% de tolerancia.

CONSTANT ROAD GRADE

Para seleccionar esta casilla se puede simular el ciclo de conducción usando una constante de grado de carretera.

INTERACTIVE SIMULATION

Seleccionando esta casilla causa una simulación interactiva a tiempo real, mientras activa la simulación que se está ejecutando.

MULTIPLE CYCLES

Podemos simular el proceso con diferentes ciclos con las mismas condiciones iniciales usando esta función. Se guarda la información incluyendo condiciones iniciales y luego simulando cada uno de los ciclos seleccionados para guardar los resultados. Desde la figura de resultados podemos acceder a todos los resultados distintos con la ayuda de una lista de resultados.

TEST PROCEDURE

Si este botón es seleccionado podemos usar el menú para seleccionar que tipo de test simular.

ACCELERATION TEST

Mediante selección de esta casilla, un test de aceleración será simulado, además del ciclo elegido. Tiempos de aceleración, máxima aceleración, y distancia recorrida en 5 segundos serán mostrados en la figura de resultados. Para ver segundo por segundo los resultados de un test de aceleración, seleccionamos CYC_ACCEL desde el menú de ciclo.

GRADEABILITY TEST

Si seleccionamos esta opción, un test de degradación será simulado, además del ciclo elegido. El grado mostrado en los resultados será el máximo valor sostenible en la entrada mph.

PARAMETRIC STUDY

Para ver el efecto que tienen tres variables en el vehículo, seleccionamos un estudio paramétrico. Los valores límites deben ser fijos, como también el número de puntos deseados para esa variable. Un estudio paramétrico simula un set de simulaciones para

meter la matriz de puntos, tanto que si 3 variables son seleccionadas con 3 puntos cada una, 27 simulaciones se realizarán.

LOAD SIM SETUP

Una simulación guardada anteriormente puede ser cargada de nuevo usando el botón “Load Sim Setup”.

SAVE

Guarda la configuración de simulación.

RUN

Realiza la simulación clicando en “Run” y espera a que aparezca la figura de resultados.

5.3 MIRAR EN LOS RESULTADOS.

FIGURA DE RESULTADOS

La figura de resultados representa algunos resúmenes de resultados (combustible gastado, emisiones, distancia total, etc.) y permite al usuario dibujar 4 series de dibujos seleccionando una variable desde el menú. Si la aceleración y la degradación fueron seleccionadas en la configuración de simulación, los resultados correspondientes también serán mostrados.

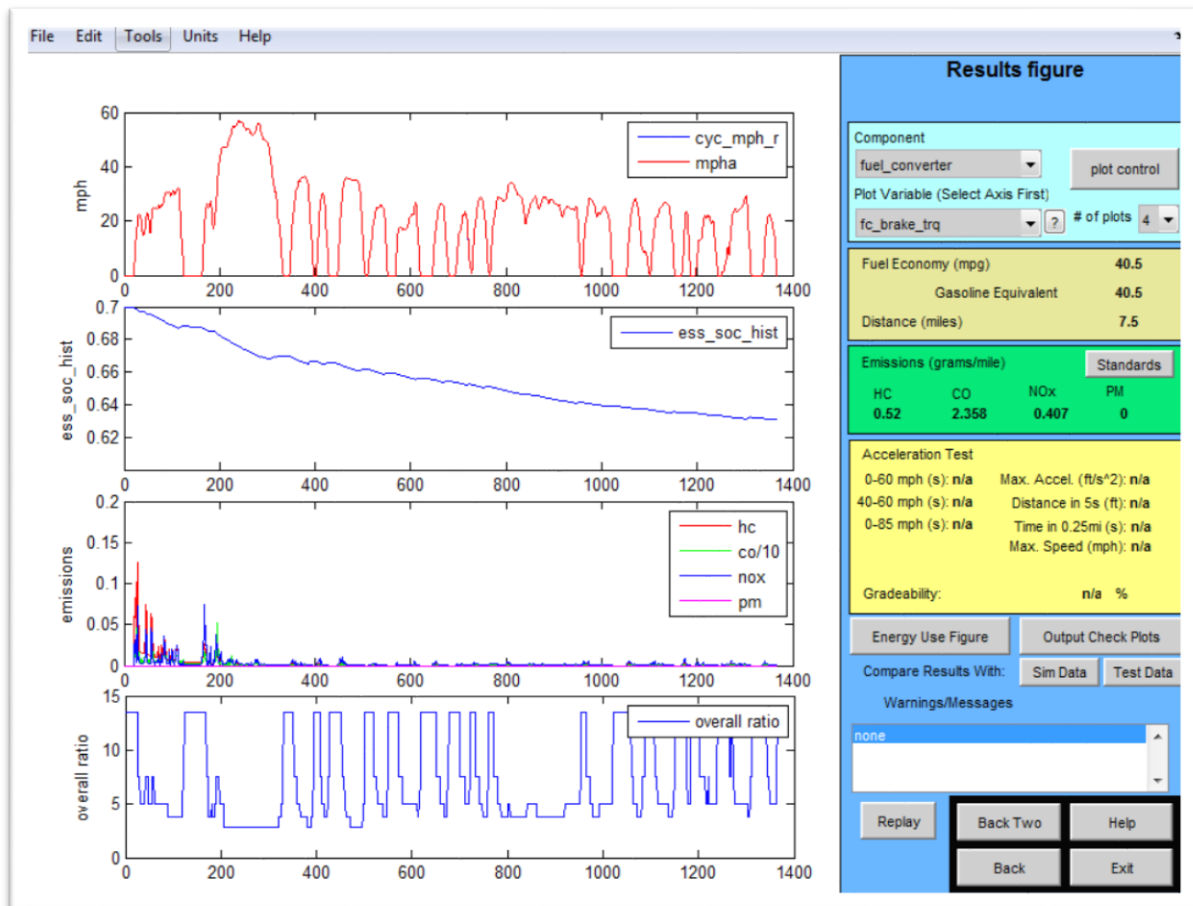


Figura 5.4: Pantalla de resultados.

Clicando en el botón de “Energy Use Figure”, una nueva figura se abre mostrando como la energía fue transferida durante la simulación. El botón “Output Check Plots” nos genera todas las gráficas que muestran el comportamiento del vehículo. El botón “Replay” vuelve a realizar la simulación, esta opción está disponible para múltiples ciclos o test por métodos.

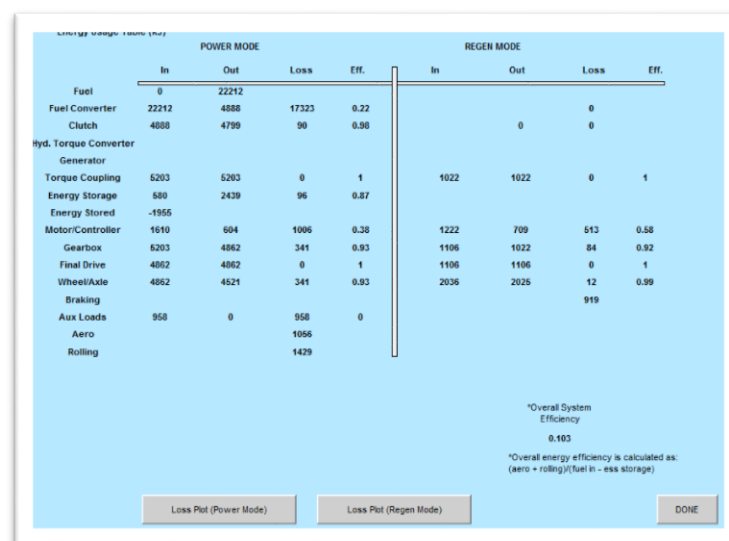


Figura 5.5: Pantalla cálculo de eficiencia.

El combustible usado en la simulación y los puntos de operación de el convertidor de combustible pueden ser vistos como una función de velocidad y par, clicando en el menú “tools” y seleccionando “FC operation”.

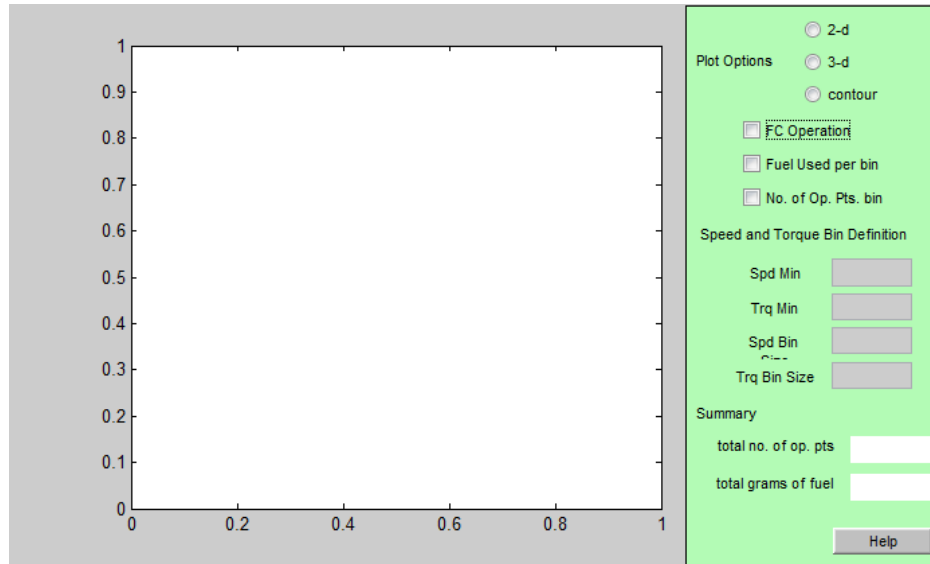


Figura 5.6: Pantalla FC Operation.

PARAMETRIC RESULTS FIGURE

La figura de resultados paramétricos se dibuja como una función de las variables elegidas. Para 2 o 3 variables estudiadas, el botón “Rotate” permite ver la gráfica desde varios puntos de vista. Para estudios de 3 variables, puedes dibujar algún corte de los resultados.

TRACE MISS ANALYSIS

Cuando un vehículo simulado se desvía del ciclo de conducción seleccionado, el trace_miss_analysis es llamado automáticamente para actuar. Información incluida:

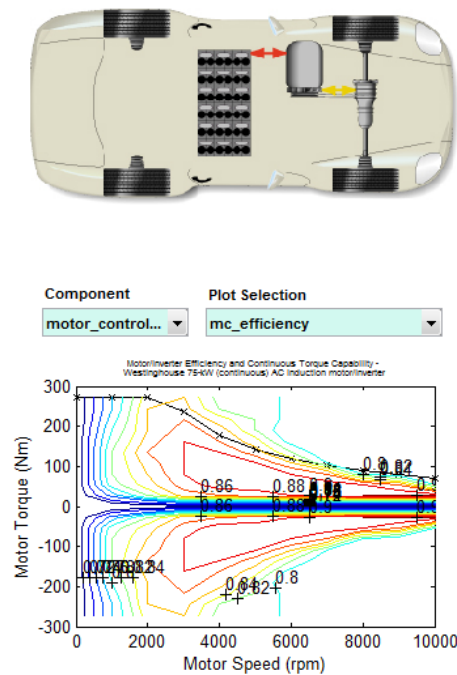
- El promedio de diferencia absoluta entre la velocidad requerida y la velocidad conseguida.
- El porcentaje de tiempo simulado con trazo erróneo mayor que 2 mph.
- El mayor porcentaje de diferencia basado en la máxima velocidad de ciclo.
- La mayor diferencia de porcentaje basado sobre la velocidad local de ciclo.
- La mayor diferencia absoluta.

6 SIMULACIÓN

6.1 PARTES PRINCIPALES.

Después de haber descrito, en general, el funcionamiento de la herramienta ADVISOR toca centrarse en el caso que nos interesa a nosotros.

Vehicle Input



The figure shows the 'Drivetrain Config' interface. It includes a 'Load File' dropdown set to 'EV_defaults_in' and an 'Auto-Size' button. The 'Scale Components' table shows the following data:

Component	max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
Vehicle	656		
Fuel Converter			
Exhaust Aftertreat			
Energy Storage	25	308	275
Energy Storage 2			
Motor	75	0.92	91
Motor 2			
Starter			
Generator			
Transmission	1	50	
Transmission 2			
Clutch/Torq. Conv.			
Torque Coupling			
Wheel/Axle			0
Accessory			
Acc Electrical			
Powertrain Control			

The 'Drivetrain Config' table shows the following configuration:

Component	version	type
Vehicle	?	VEH_EV1
Fuel Converter	?	fc options
Exhaust Aftertreat	?	EX_CI
Energy Storage	rint	pb
Energy Storage 2	?	ess 2 options
Motor	?	MC_AC75
Motor 2	?	motor 2 options
Starter	?	starter options
Generator	?	gc options
Transmission	man	TX_1SPD
Transmission 2	?	trans 2 options
Clutch/Torq. Conv.	?	clutch/torque converte...
Torque Coupling	?	TC_DUMMY
Wheel/Axle	Crr	WH_SMCAR
Accessory	Co...	ACC_HYBRID
Acc Electrical	?	acc elec options
Powertrain Control	ev	PTC_EV

The 'View Block Diagram' button is set to 'BD_EV'. The 'Variable List' shows the following variables:

Component	Variables
motor_controller	mc_area_scale

The 'Cargos Mass' is 136, and the 'Calculated Mass' is 1208. The 'override mass' is 1. The 'Save', 'Help', 'Back', and 'Continue' buttons are visible.

Figura 6.1: Pantalla inicio con VE seleccionado.

Tal y como podemos ver en la Figura, la primera elección que se ha llevado a cabo ha sido en “Drivetrain Config” seleccionar vehículo eléctrico (ev). La configuración del vehículo en este caso es la siguiente:

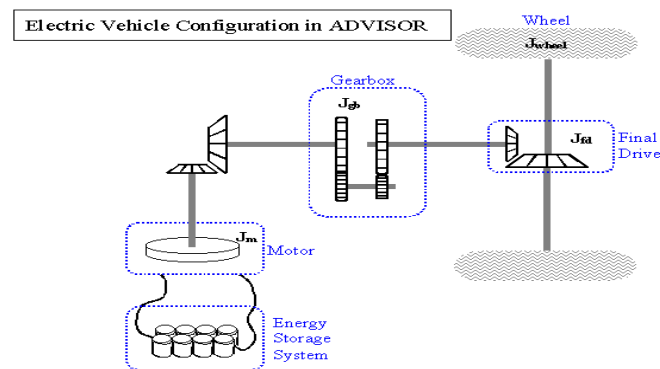


Figura 6.2: Configuración VE.

Los componentes del vehículo eléctrico incluyen baterías y un motor. Utiliza solo potencia eléctrica, y puede usar el motor como un generador para recuperar energía de frenado y cargarla en la batería. Las baterías empiezan con carga total, o con un estado de carga (SOC) de 1.0. La caja de cambios tiene una velocidad. Los accesorios son una carga constante eléctrica de potencia.

Centrándonos en el componente “Energy Storage System”, Sistema de almacenamiento de energía, ASVISOR nos permite seleccionar entre cuatro modelos de batería:

- Modelo RC (resistivo-capacitivo) incluye efectos transitorios en la batería.
- Modelo Rint (resistencia interna) se caracteriza por tener una fuente de tensión y una resistencia interna.
- Modelo de batería ácida de plomo.
- Modelo de batería mediante redes neuronales.

El modelo RC será el que a nosotros nos interesa. Como ya vimos en el modelado de una batería, la configuración de este modelo es la siguiente:

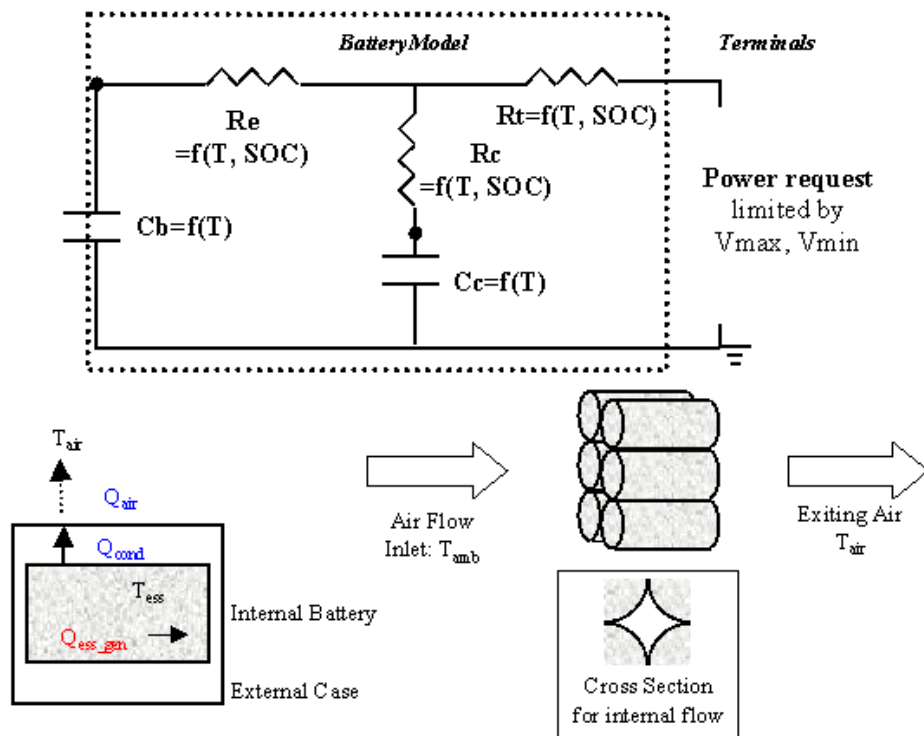


Figura 6.3: Circuito RC batería.

Dentro del apartado “Energy Storage System” seleccionaremos el tipo de batería que vamos a utilizar, el compuesto del que está construida dicha batería y por último la clase de batería en función de lo seleccionado anteriormente. En nuestro caso seleccionaremos el modelo rint, (aunque nuestro modelo de batería creado ha sido RC hemos encontrado problemas a la hora de introducirlo en la tipología que le corresponde) el compuesto li y la clase de batería Grafeno_air. Esta clase de batería no estaba creada en el programa, así pues, ha sido necesario crearla en función de las características que nos proporciona una batería de Grafeno-aire. En el siguiente apartado 3.2 se describe el proceso.

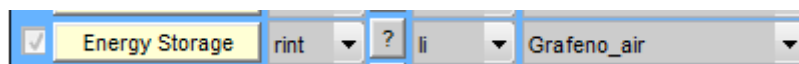


Figura 6.4: Selección ESS

6.2 MODELADO DE BATERÍA GRAFENO-AIRE EN ADVISOR.

Tal y como hemos citado en el apartado anterior, una vez estudiadas las características de las baterías existentes en ADVISOR sacamos en conclusión que ninguna de ellas satisface las características energéticas que necesitamos, así pues era necesario crear una batería partiendo de las características que ofrece una batería Grafeno-aire.

Para que ADVISOR reconozca nuestra batería, hay que crear un fichero .m con una distribución y unos elementos concretos. El programa nos proporciona una herramienta llamada **Batmodel**. Utilizando esta herramienta podremos crear un fichero .m en función de unos parámetros de entrada que definirán el comportamiento de la batería.

A continuación vamos a describir en breves pasos como funciona esta herramienta y comentar cada una de las funciones que nos proporciona:

En primer lugar, abrimos esta aplicación escribiendo batmodel en la Command Window de Matlab. Previamente debemos abrir la carpeta batmodel en Current Folder. Una vez hecho esto nos aparecerá el menú de la figura 6.4.

Como podemos ver, el menú se divide en dos partes principalmente, una primera en la que trabajaremos los modelos de batería RC, y una segunda dedicada a las baterías de resistencia interna también llamadas rint.

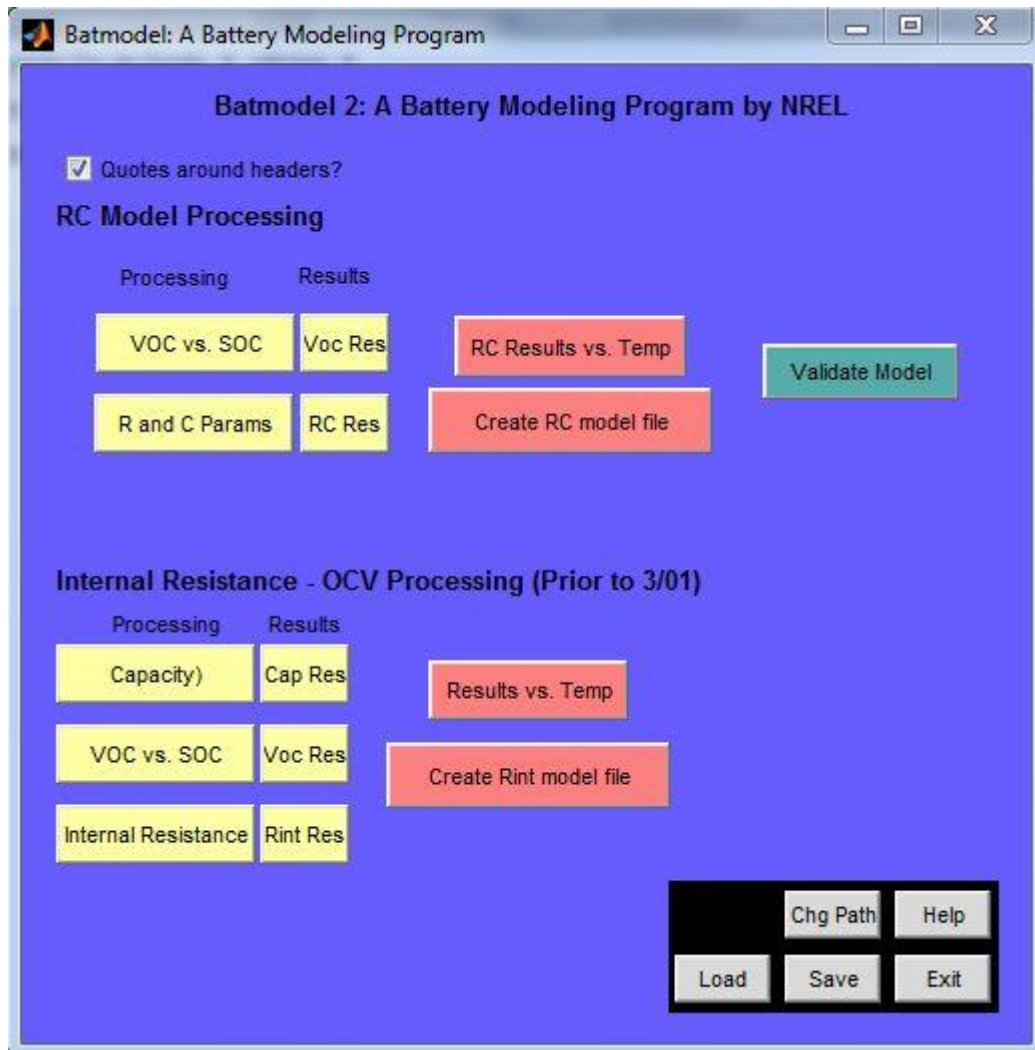


Figura 6.4: Menú Principal Batmodel

Dentro de cada apartado tenemos diferentes opciones de uso. En la columna “Processing” nos aparecen distintos ensayos que podemos aplicarle a una batería cualquiera, que tendrá que ser cargada mediante el botón “Load”. La siguiente columna “Results”, nos arrojará los resultados del ensayo que haya sido ejecutado. En otra columna disponemos de un primer botón para realizar comparaciones y un segundo botón con el que crear la batería. Hacemos clic en “Create RC model file” y obtenemos la ventana que muestra la figura 6.5.

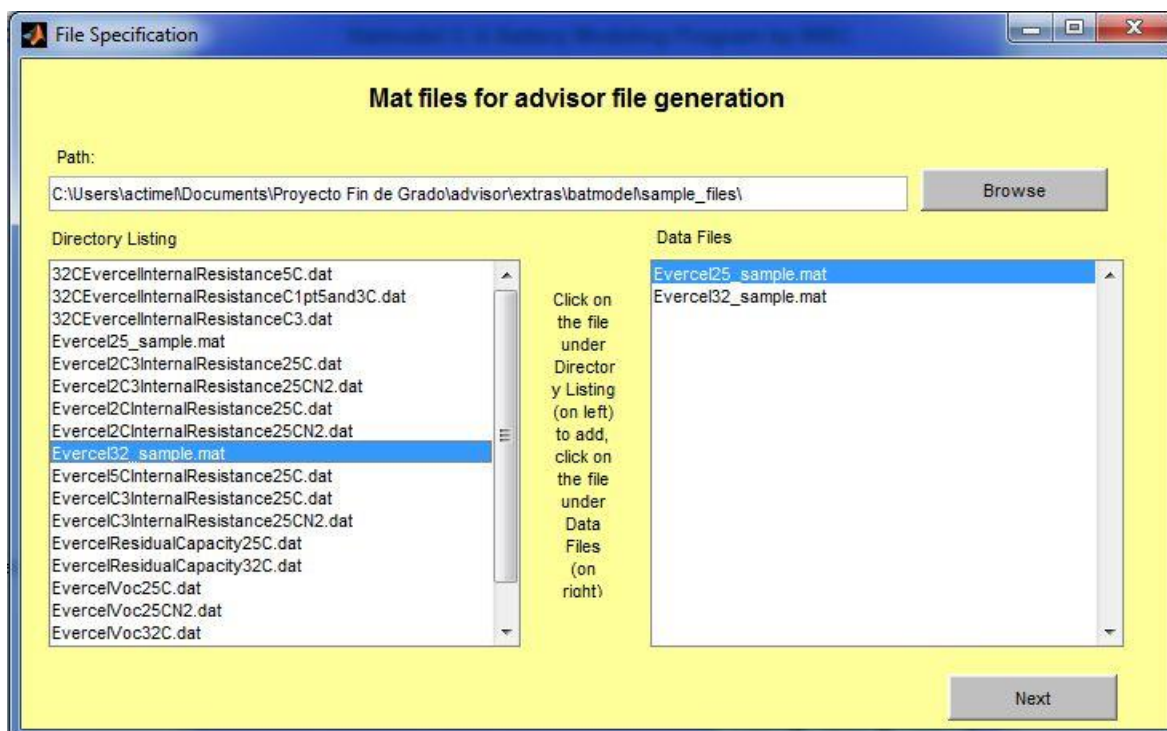


Figura 6.5: Ficheros mat de advisor

En esta ventana seleccionaremos los dos ficheros .mat de los que dispone la herramienta batmodel, estos son los encargados de generar el modelo de batería en función de una serie de cálculos y ensayos que realizará el programa. Para continuar pulsamos “Next” y nos dirige a la última ventana, correspondiente a la figura 6.6.

Esta ventana nos permite introducir los datos correspondientes a la batería que deseamos crear. En la parte superior podemos introducir: el nombre con el que se guardará el fichero .m, una descripción de la batería a crear, nombre del creador y un correo de contacto, número de celdas por módulo, y además, existen tres casillas que corresponden a características internas de AVISOR. La parte inferior está dedicada a las características propias de la batería. Aquí podremos introducir tanto los valores eléctricos como los valores térmicos, algunos de ellos son los siguientes:

- | | | |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| -Masa (kg) | -Tensión Máxima | -Tensión Mínima |
| -Número de módulos | -Capacidad | -Superficie |
| -Masa de flujo de aire | -Área expuesta a flujo de aire | -Conductividad térmica |

ADVISOR battery file information

Name of file to create: ESS_PB23.m

General File Info

File created by batmodel using mat files:

- Evercel25_sample
- Evercel32_sample

File notes for Evercel25_sample
peukert.batname: Evercel 22AH prismatic NiZn

Created by: your name, email

ess_description: X Ah Lead Acid battery

ess_version: 3.0

ess_validation: (0=no valid,1=data agrees w/

ess_proprietary: (0=nonprop,1=prop)

num_cells_per_mod: 6

Load Default Lead Acid?

ess_module_mass (kg): 1

ess_max_volts: 16.5

ess_mod_cp (J/kgK): 660

ess_mod_sarea (m²): 0.2

ess_mod_flow_area (m²): .004

ess_mod_case_th_cond (W/mK): .20

ess_coulombic_eff 33C: .9

ess_min_volts: 9.5

ess_module_num: 25

ess_set_tmp (C): 35

ess_mod_airflow (kg/s): .07/12

ess_mod_case_thk (m): .002

ess_coulombic_eff 26C: .9

Help (thermal) Make ADVISOR File

Figura 6.6: Introducción de datos.

Cuando hayamos introducido todos los valores que caracterizan nuestra batería, pulsamos el botón de la esquina inferior derecha “Make ADVISOR file” para finalizar la creación de la batería y nos emitirá la siguiente ventana:

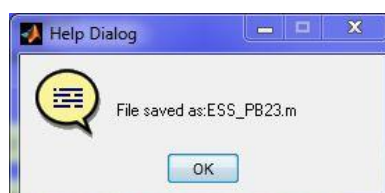


Figura 6.7: Creación batería.

Esto indica que nuestra batería modelada en un archivo *.m* tendrá el nombre que aparece en pantalla y ha sido creado y guardado satisfactoriamente. Llegados a este punto, el siguiente paso será abrir ADVISOR y pinchar sobre la batería del vehículo de la pantalla de inicio.

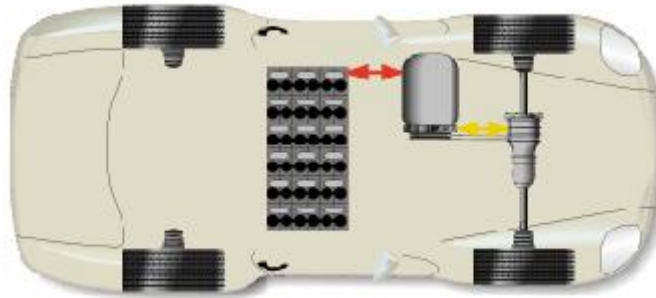


Figura 6.8: Vehículo pantalla de inicio.

Al hacer clic con el botón izquierdo sobre el bloque de la batería que representa la imagen, nos saldrá el siguiente menú:

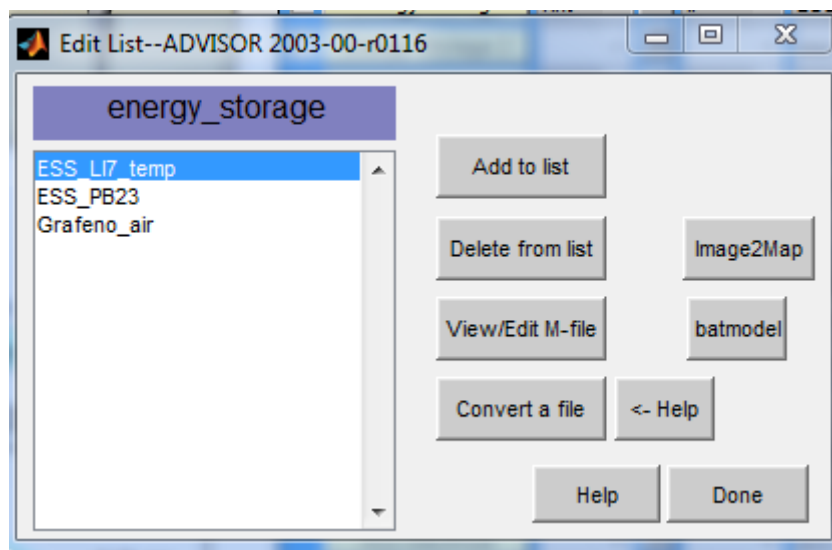


Figura 6.9: Lista de baterías.

En este menú nos encontramos a la izquierda el listado de tipos de batería de los que disponemos y a la derecha una serie de botones para editar la lista. En nuestro caso pulsaremos “Add to list” para añadir nuestro fichero en la lista. Al pinchar este botón nos abrirá una ventana de búsqueda de archivos, seleccionamos el fichero *.m* que habíamos creado y nos aparecerá en la lista. Finalmente solo queda seleccionarlo y pulsar “Done”.

Nuestra batería en concreto, tiene los datos que se ven en la siguiente tabla. Todos ellos han sido sacados de bibliografía después de haber realizado un exhaustivo estudio.

Tabla 6: Valores para batería de grafeno

module mass(kg)	0.25	Min_volts	2.65
Max_volts	2.65	Module_num	1
Mod_cp(J/kgK)	900	Set_temp(C)	35
Mod_sarea(m2)	0.032	Mod_airflow(kg/s)	0.07/12
Mod_flow_area(m2)	0.011	Mod_case_thk(m)	0.001
Mod_case_th_cond(W/mK)	15	Coulombic_eff 26C	0.9
Coulombic_eff 33C	0.9		

7 RESULTADOS

Con la batería creada dentro del entorno de ADVISOR, podemos introducirla dentro de un vehículo eléctrico y realizarle cualquier tipo de ensayo. Como ya explicamos en otro apartado, existe una pantalla de simulación en la que podemos elegir diferentes tipos de ciclos que recorrerá el vehículo. Dentro de la extensa lista que nos proporciona ADVISOR nos hemos decantado por tres ensayos distintos. Cada uno de estos ha sido aplicado al mismo modelo de coche en dos ocasiones, una vez con la batería que hemos creado y una segunda con una batería de litio. Hemos elegido este tipo de batería por ser la más usual en el mercado actual. Los ciclos de ensayo han sido:

- Ciclo UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule).
- Ciclo Interurbano.
- Ciclo a velocidad constante 104.61 km/h

A continuación pasamos a describir cada tipo de ciclo y mostrar cuales han sido los resultados para cada batería.

7.1 CICLO UDDS

El primero de los ciclos elegido ha sido un ciclo urbano. Las características de dicho ciclo podemos verlas en la figura 7.1, este ciclo es uno de los más utilizados en varios estudios de eficiencia y emisiones de CO₂.

time:	1369 s
distance:	11.99 km
max speed:	91.25 km/h
avg speed:	31.51 km/h
max accel:	1.48 m/s ²
max decel:	-1.48 m/s ²
avg accel:	0.5 m/s ²
avg decel:	-0.58 m/s ²
idle time:	259 s
no. of stops:	17
max up grade:	0 %
avg up grade:	0 %
max dn grade:	0 %
avg dn grade:	0 %

Figura 7.1: Características ciclo UDDS

El recorrido tiene unas 17 paradas desde que inicia la marcha, se recorren unos 12 km en aproximadamente 23 minutos. La velocidad máxima que se alcanza es de 91.25 km/h y la velocidad media del ciclo son 31.51 km/h. El diagrama velocidad tiempo es:

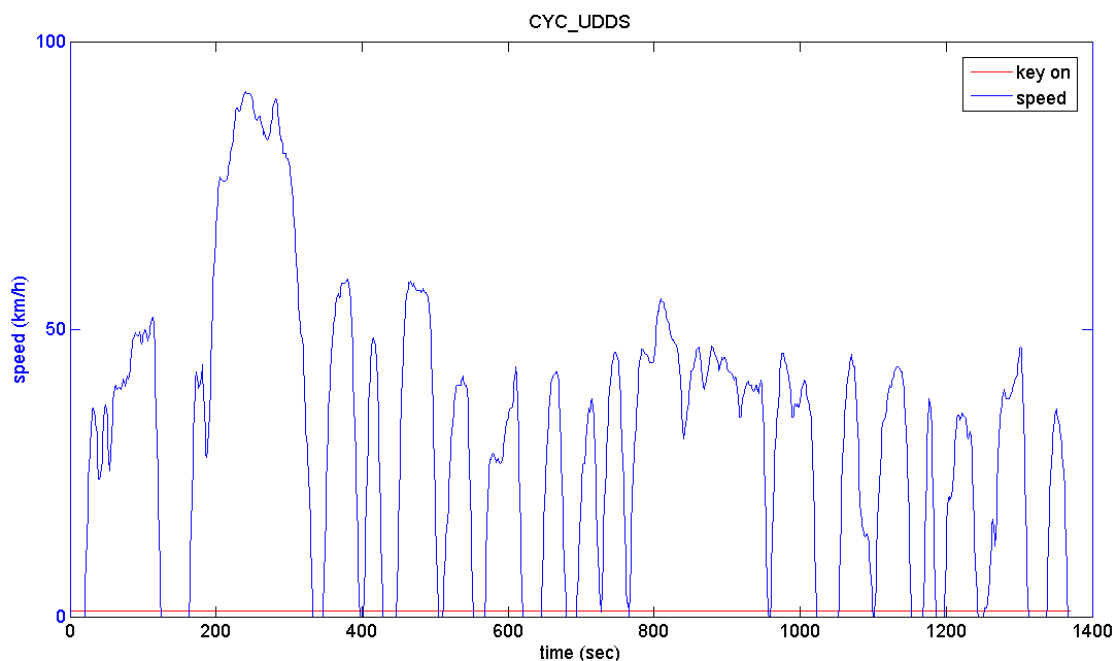
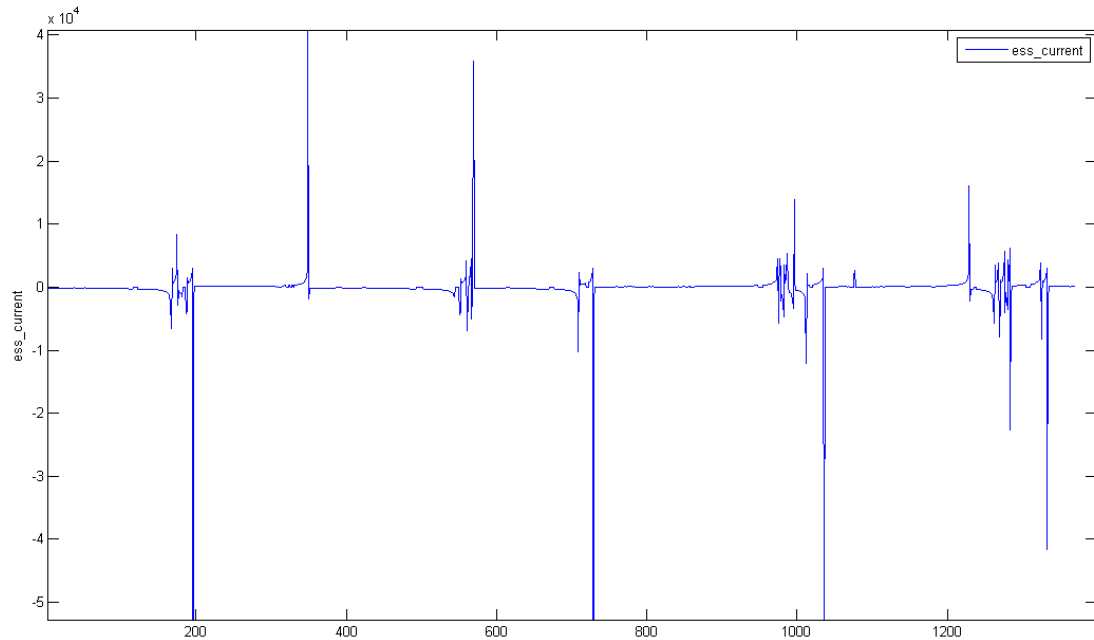


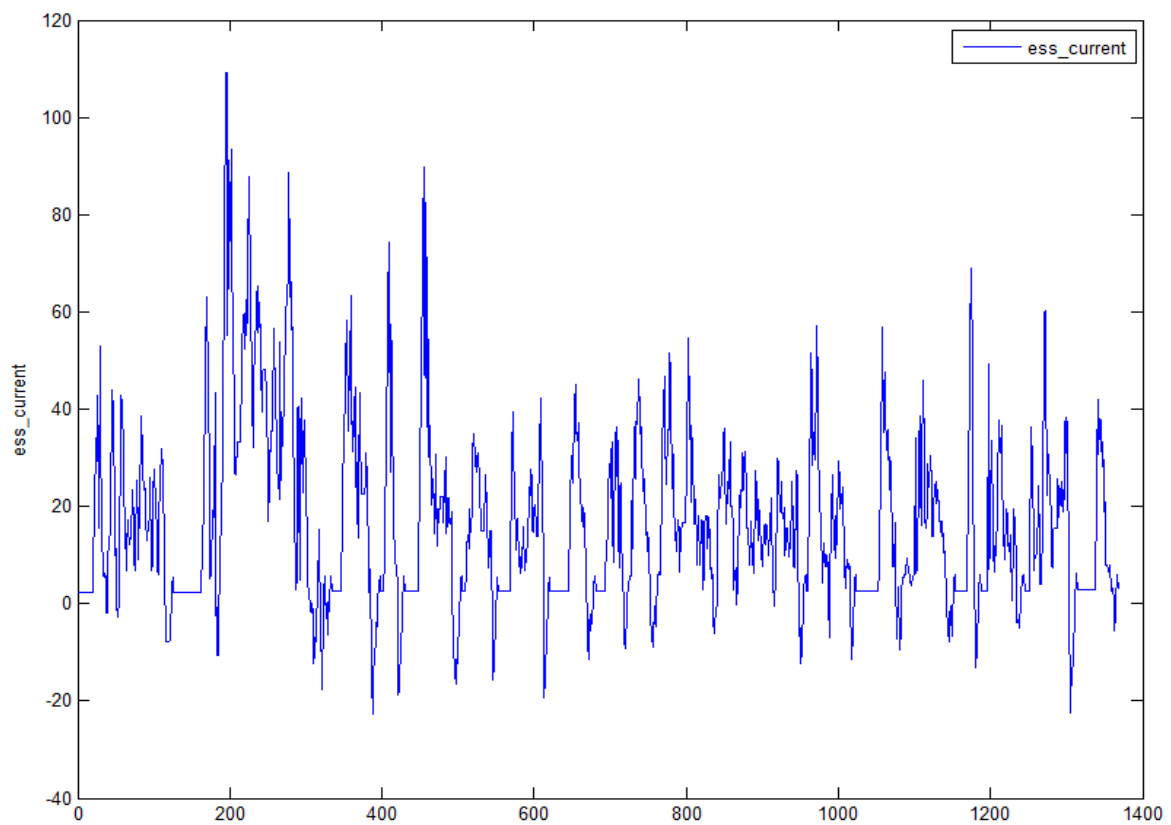
Figura 7.2: Ciclo UDDS

Los resultados obtenidos para las baterías son:

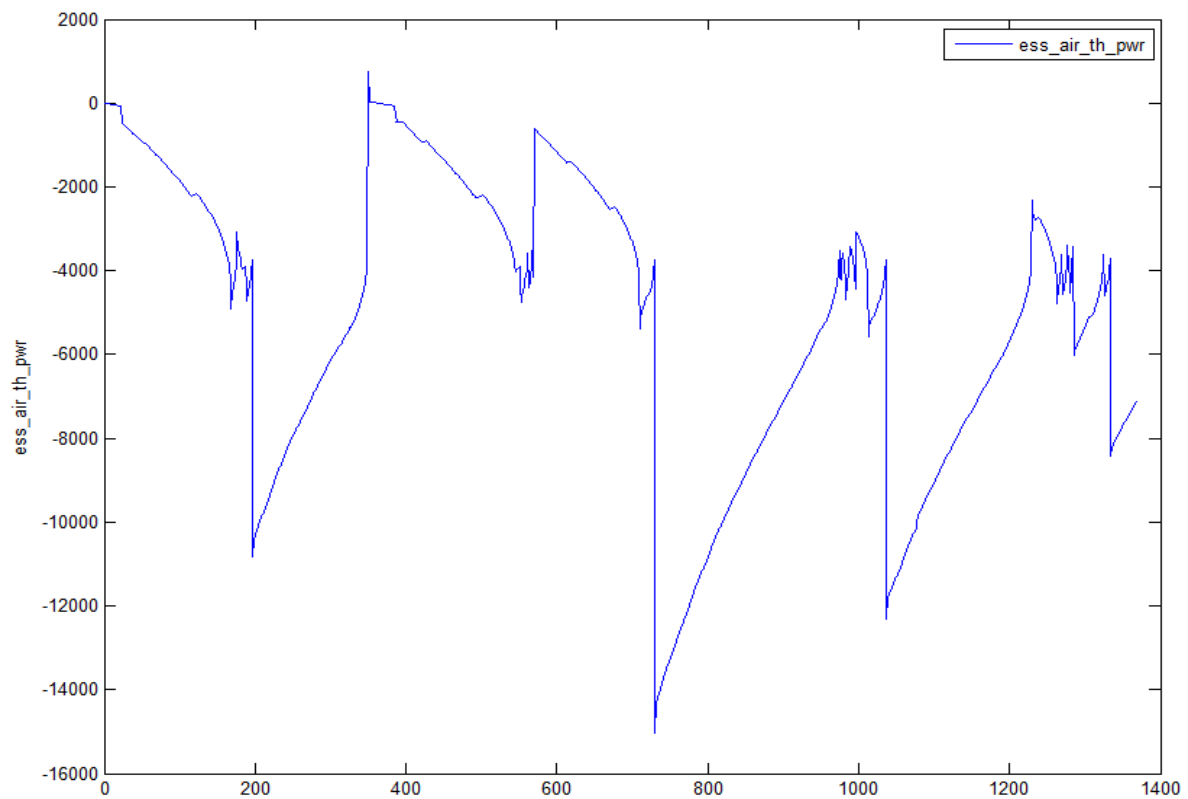
- Corriente batería de grafeno:



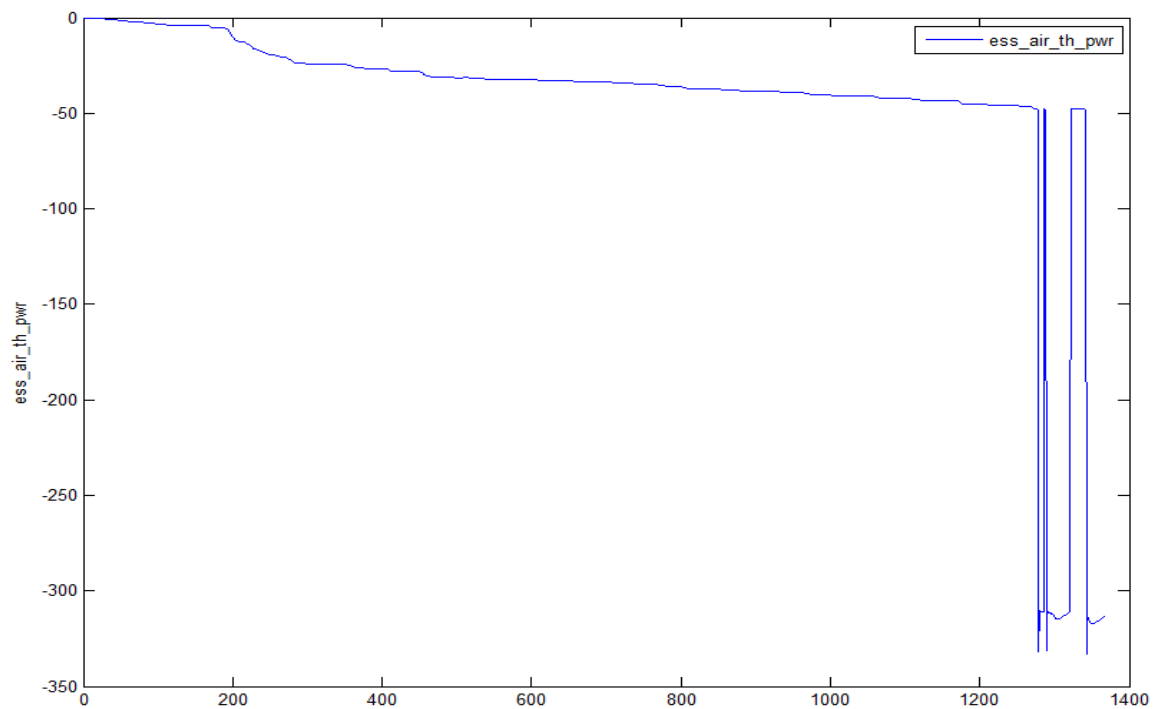
- Corriente batería Litio:



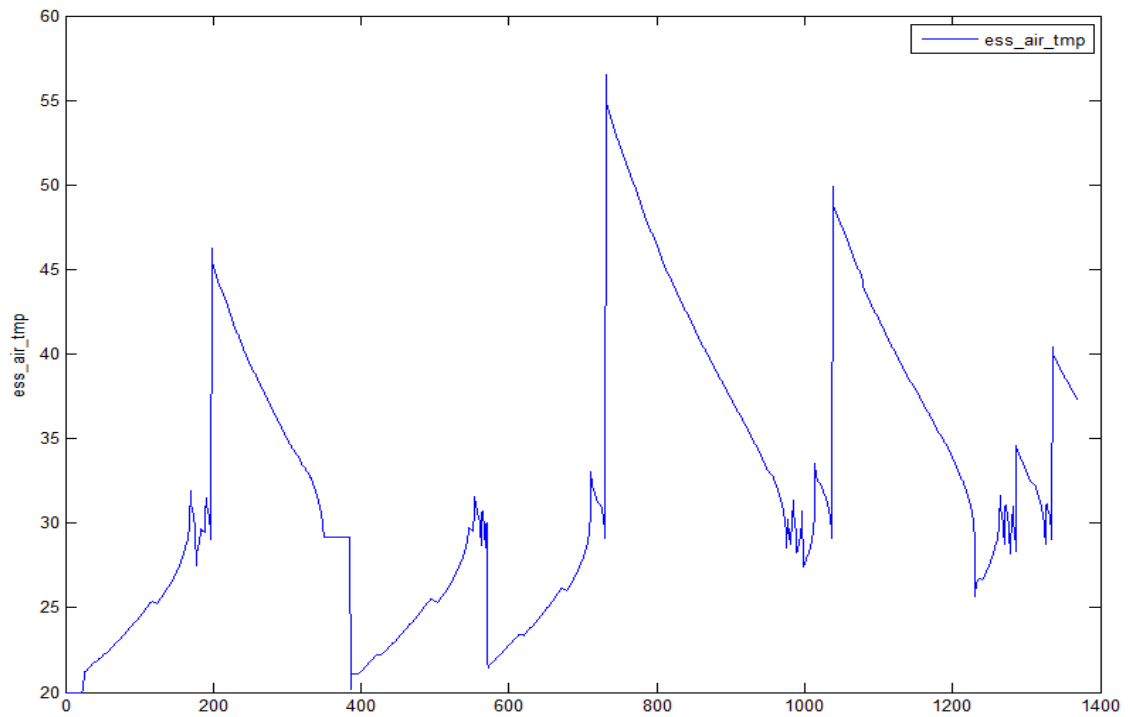
- Calor eliminado por batería grafeno:



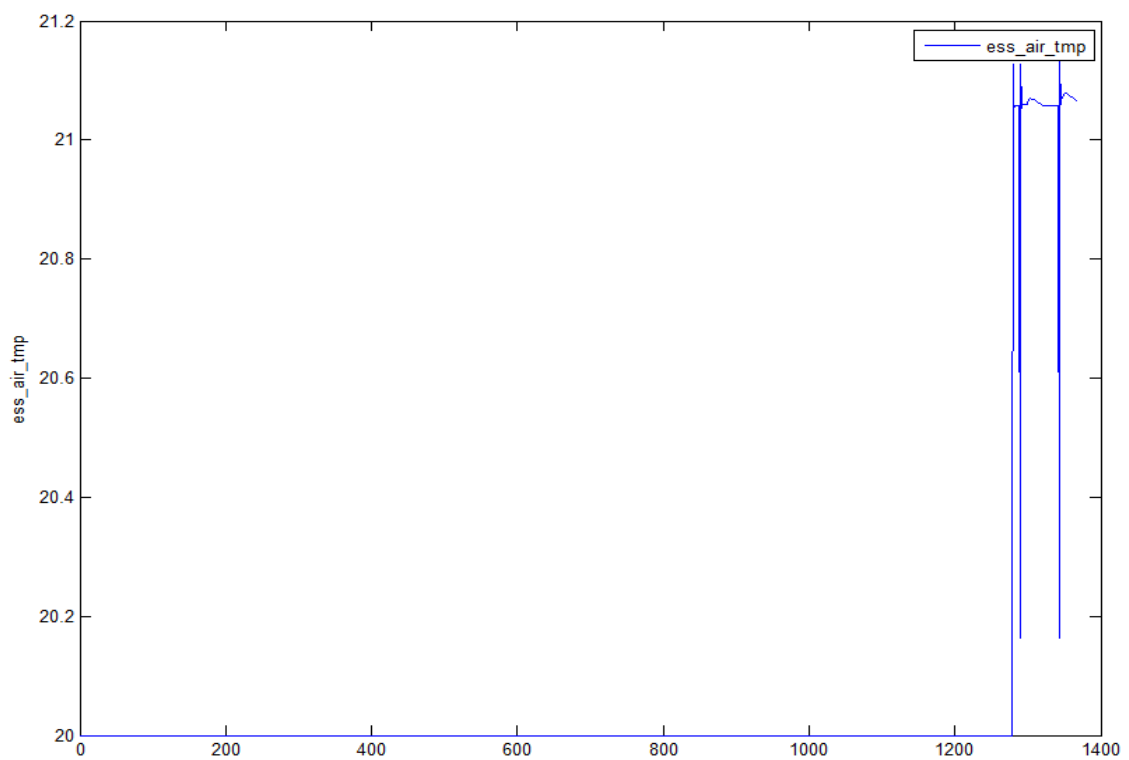
- Calor eliminado por batería de litio:



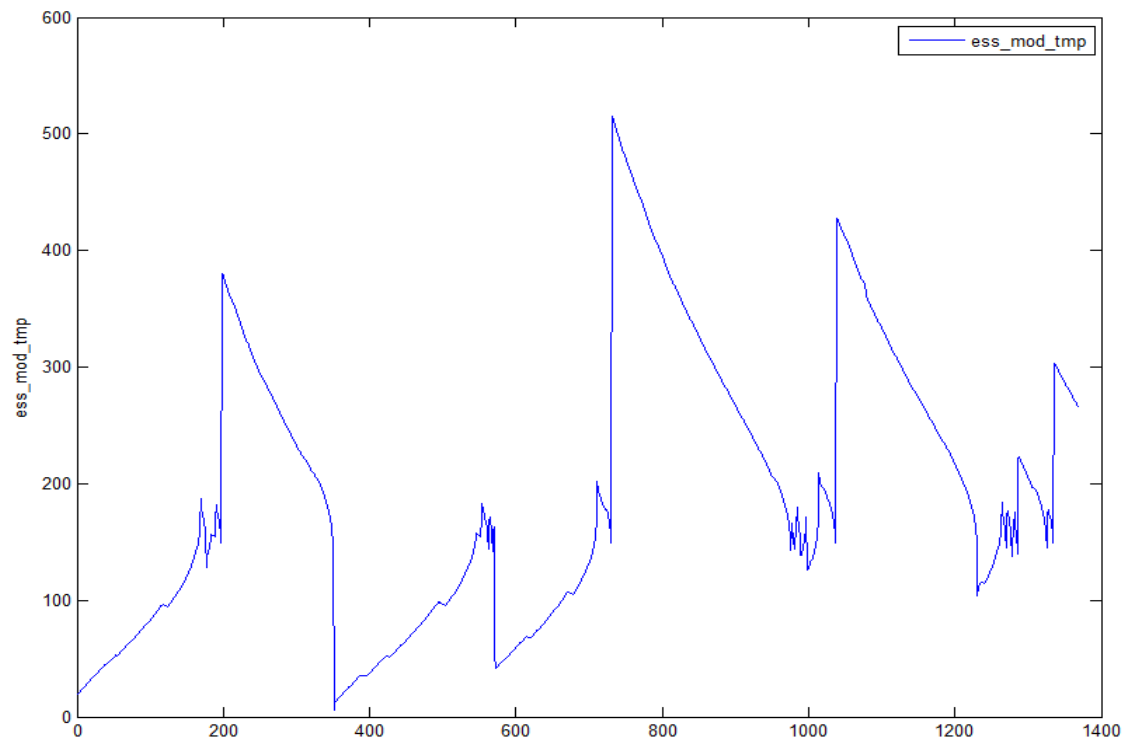
- Temperatura del aire batería de grafeno:



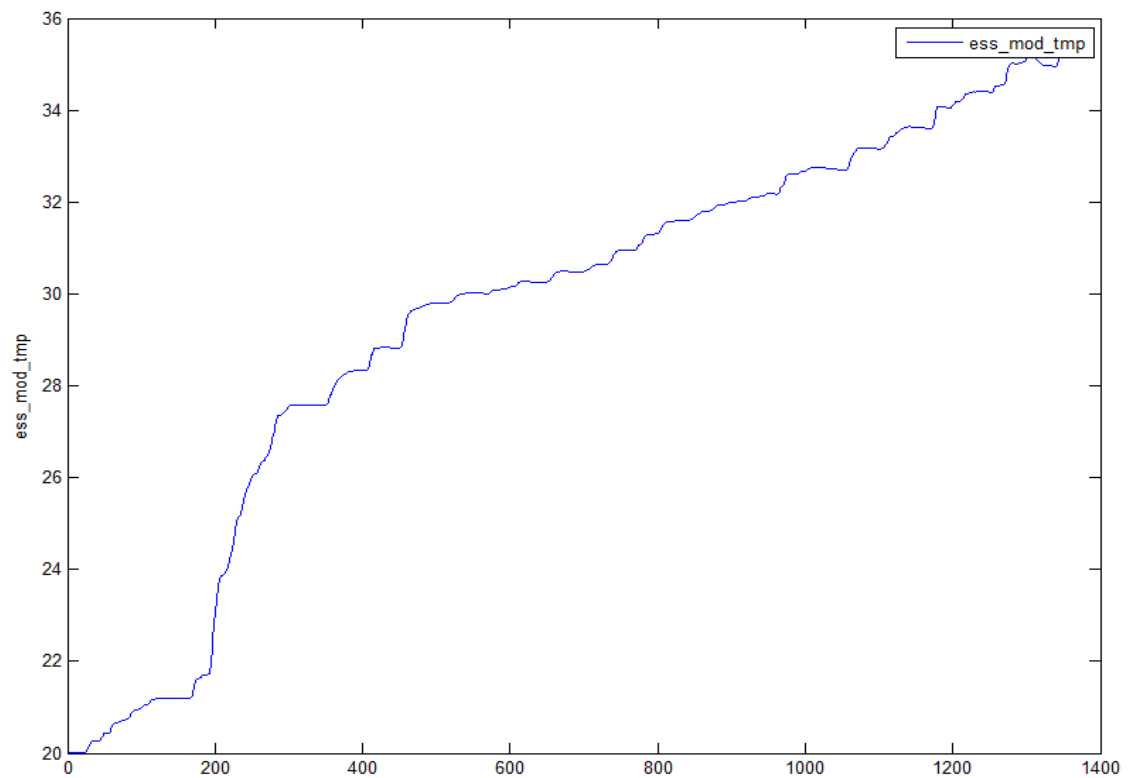
- Temperatura del aire batería de litio:



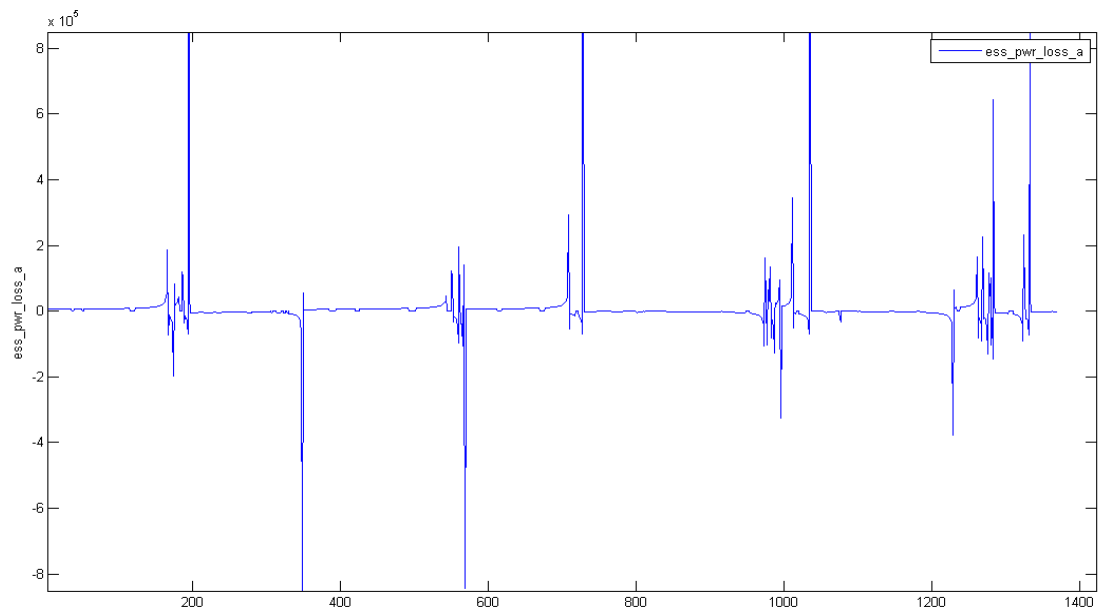
- Temperatura del módulo batería de grafeno:



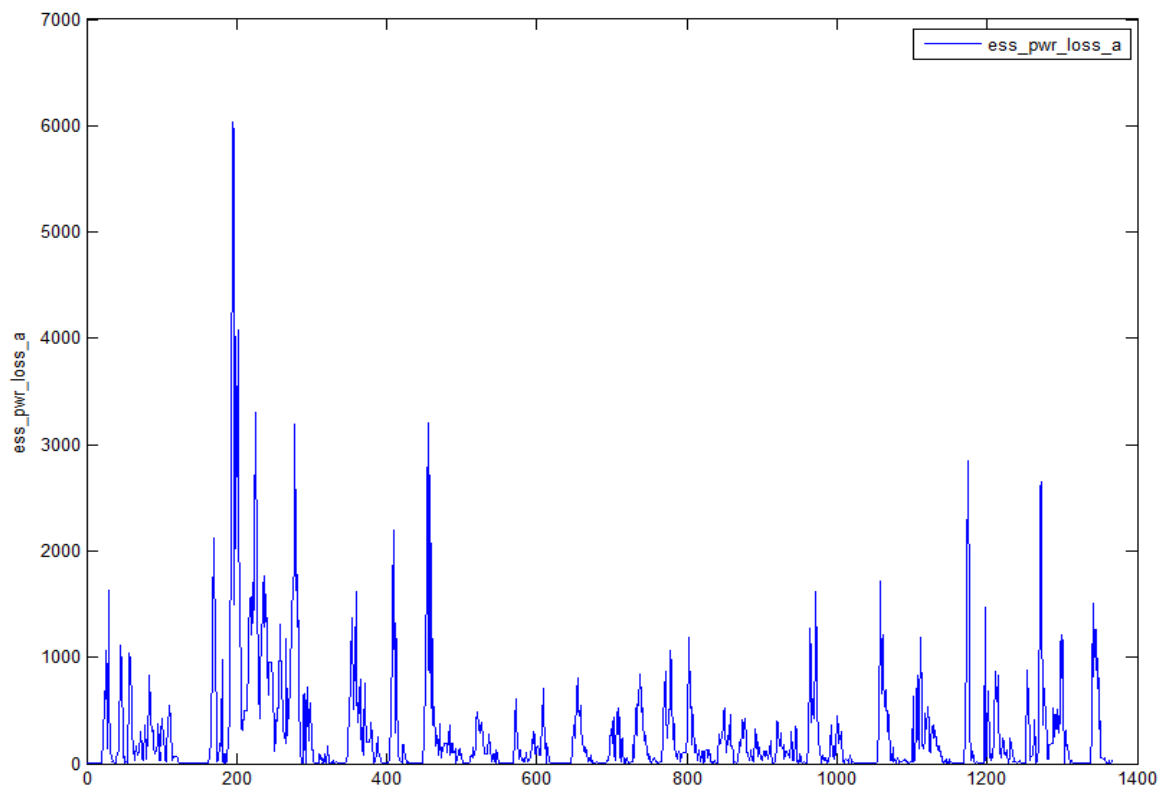
- Temperatura del módulo batería de litio:



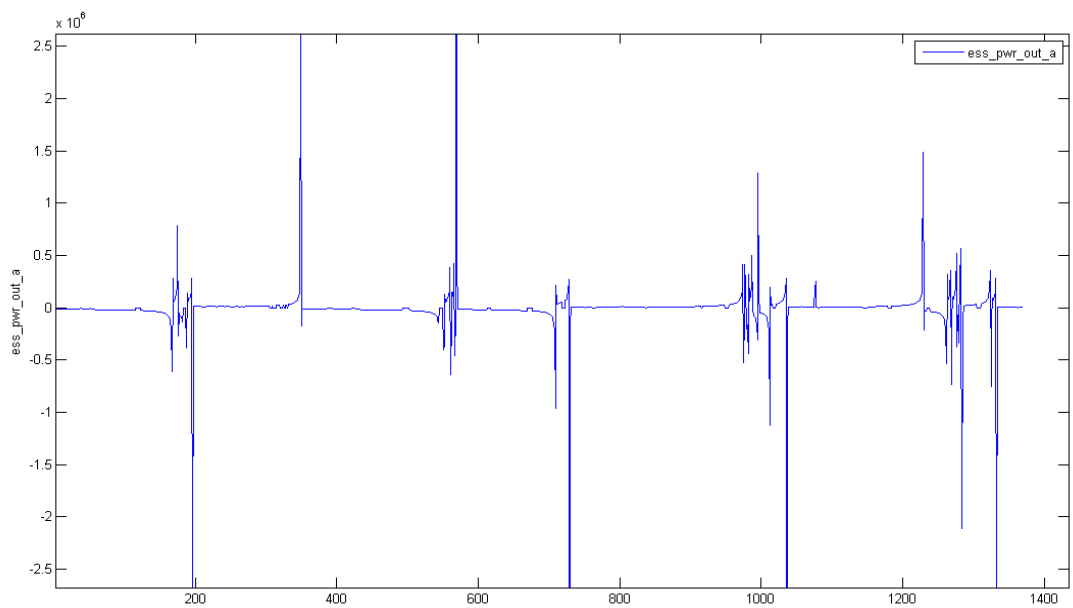
- Pérdidas de potencia batería de grafeno:



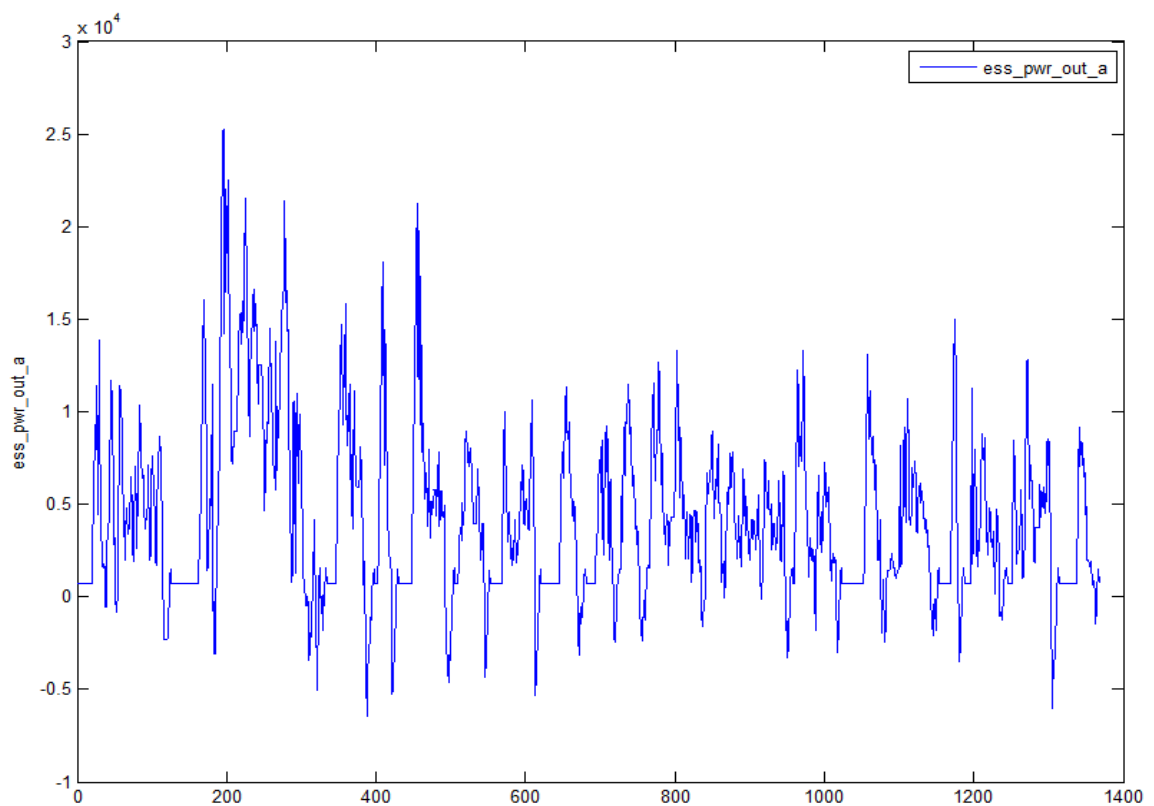
- Pérdidas de potencia batería de litio:



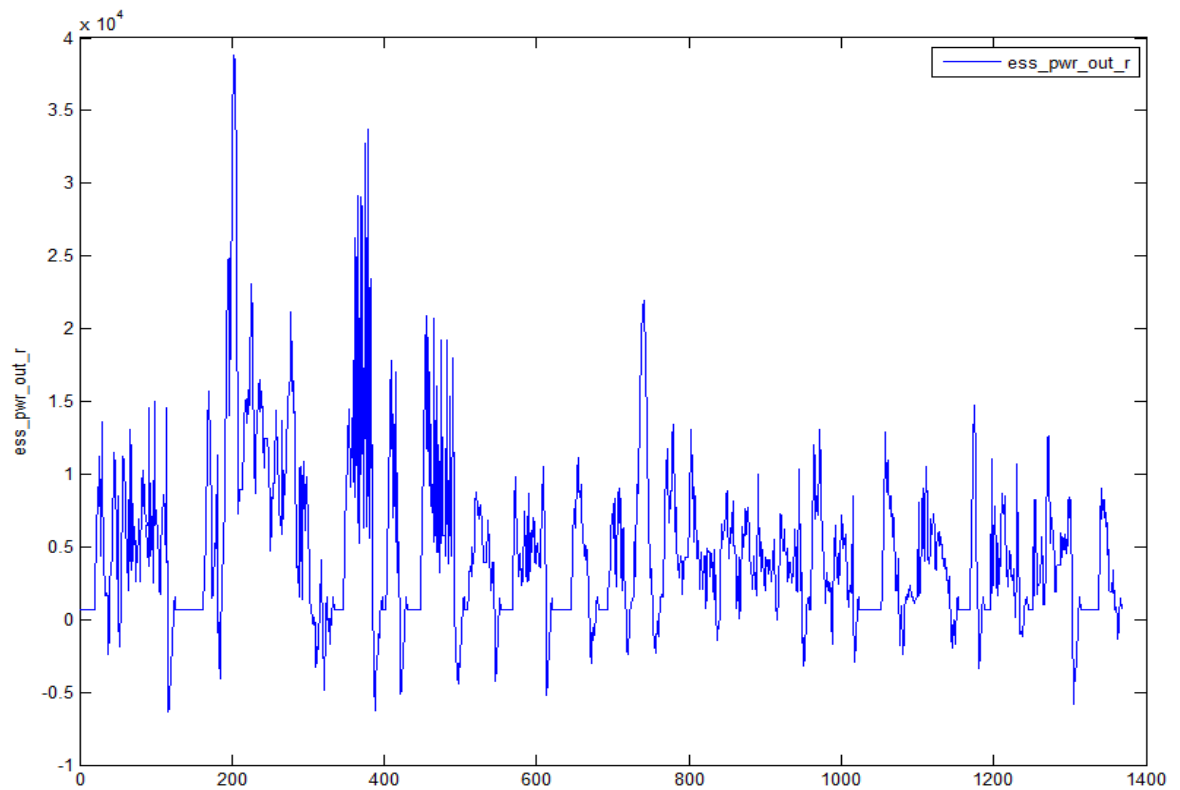
- Potencia de salida disponible batería de grafeno:



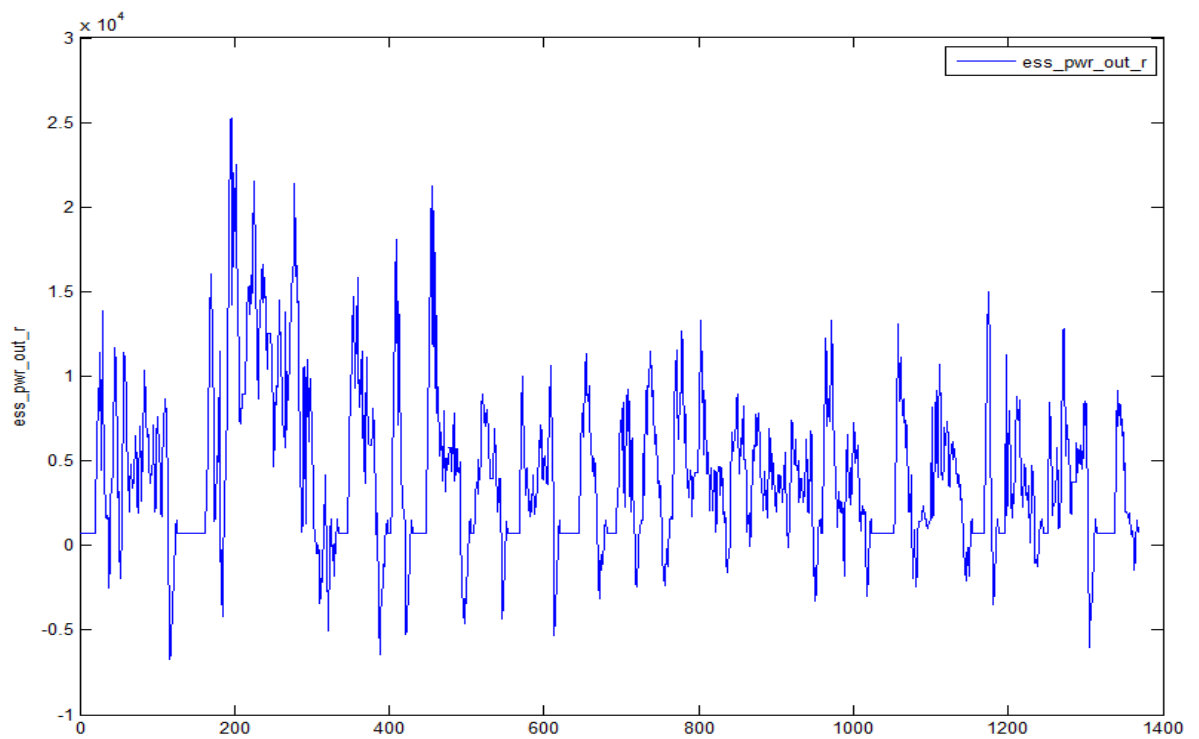
- Potencia de salida disponible batería de litio:



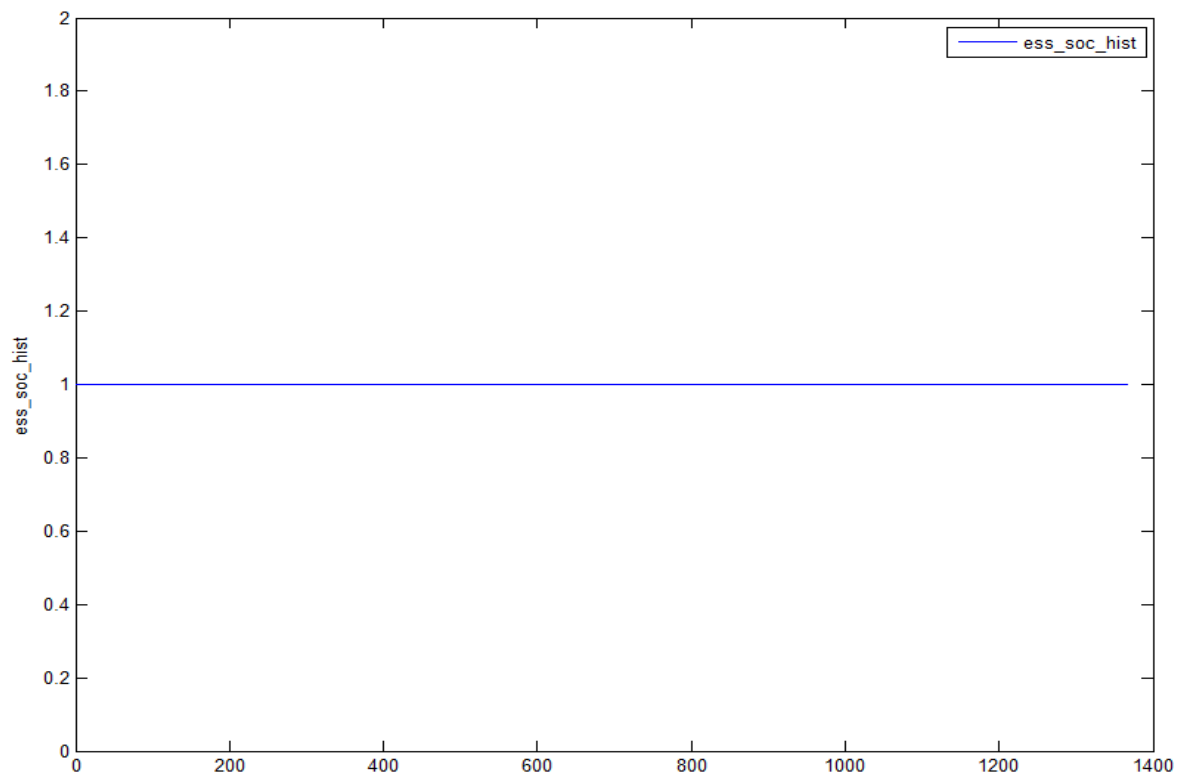
- Potencia de salida solicitada batería de grafeno:



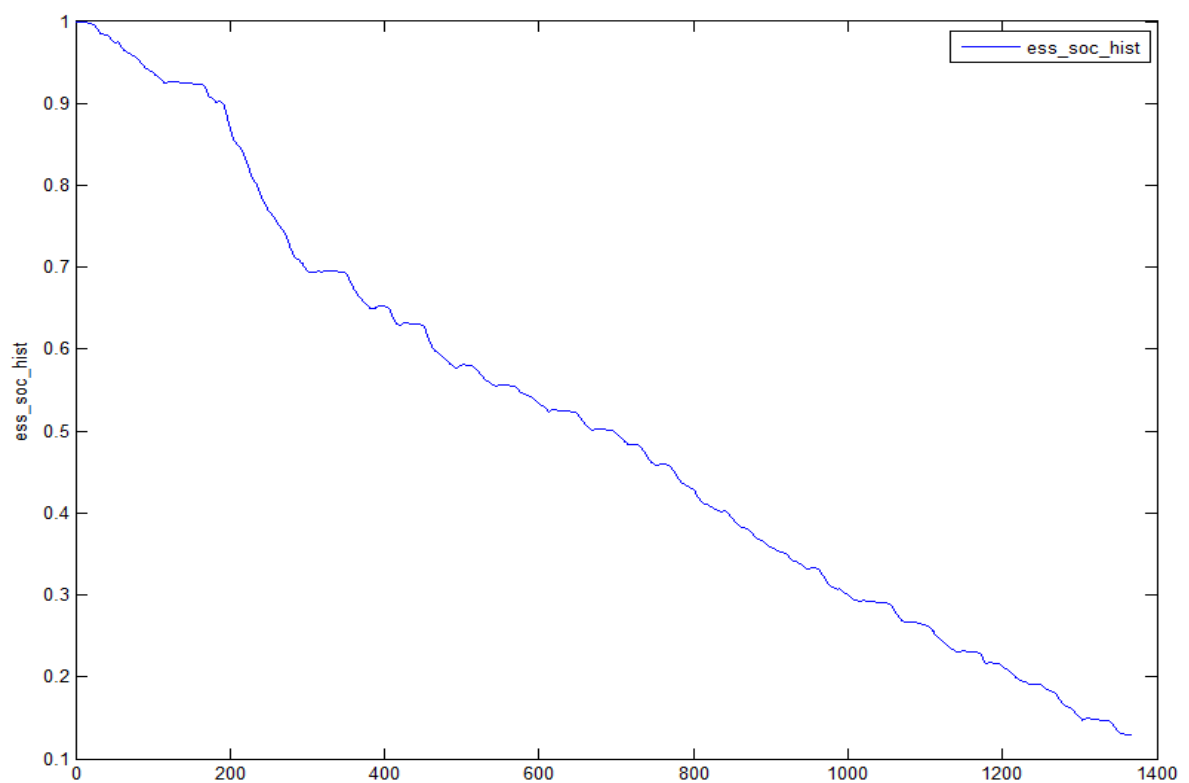
- Potencia de salida solicitada batería de litio:



- SOC batería de grafeno:



- SOC batería de litio:



7.2 CICLO INTERURBANO.

Cuando queremos comprar un coche, uno de los consumos más representativos de la eficiencia es el consumo mixto, donde un vehículo circula tanto por ciudad como por carretera. Las características de este son:

time:	1640 s
distance:	24.96 km
max speed:	97.74 km/h
avg speed:	54.75 km/h
max accel:	1.42 m/s ²
max decel:	-1.86 m/s ²
avg accel:	0.2 m/s ²
avg decel:	-0.21 m/s ²
idle time:	153 s
no. of stops:	9
max up grade:	0 %
avg up grade:	0 %
max dn grade:	0 %
avg dn grade:	0 %

Figura 7.3: Características ciclo IU

El vehículo recorrerá 25 km aproximadamente en un tiempo de 27 minutos. La velocidad máxima será de 97.74 km/h y la velocidad media durante el recorrido será 54.75 km/h, en ambos casos superiores al ciclo anterior. En su diagrama velocidad tiempo podemos ver bien diferenciadas las zonas urbanas con una velocidad media más baja que la de carretera:

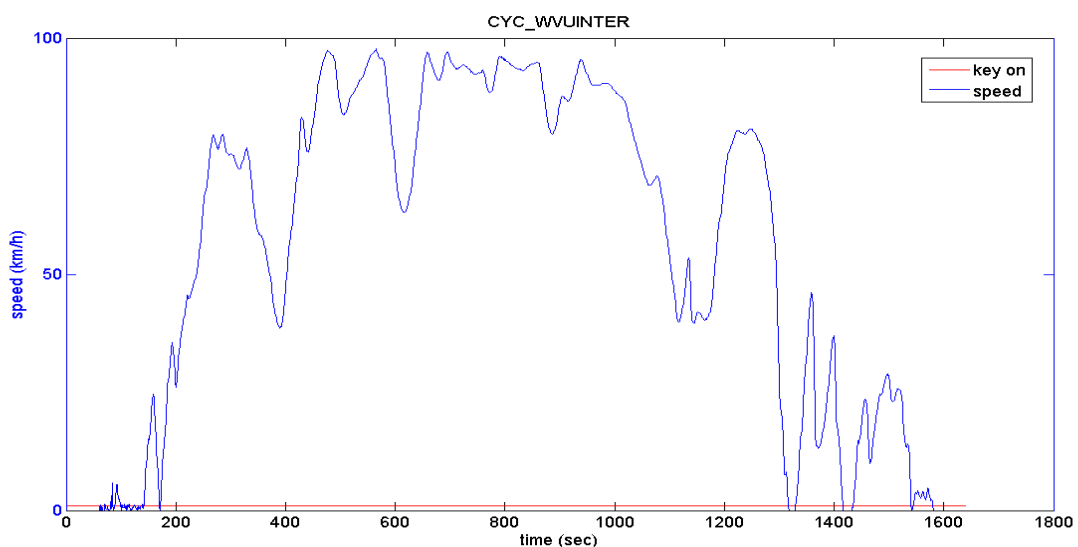
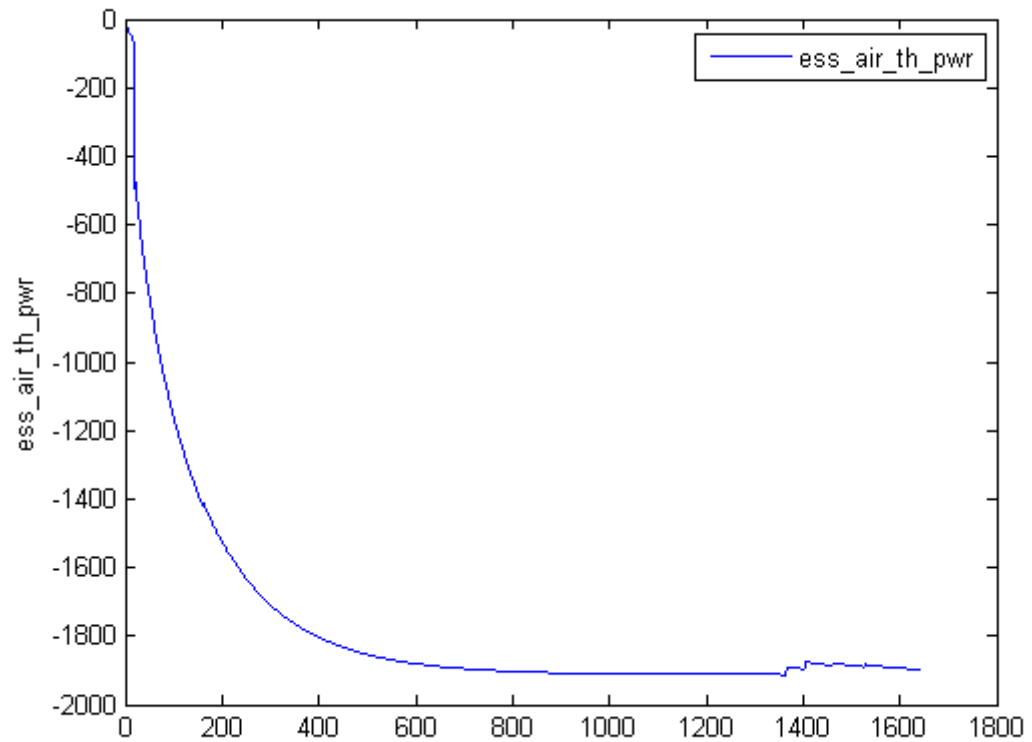


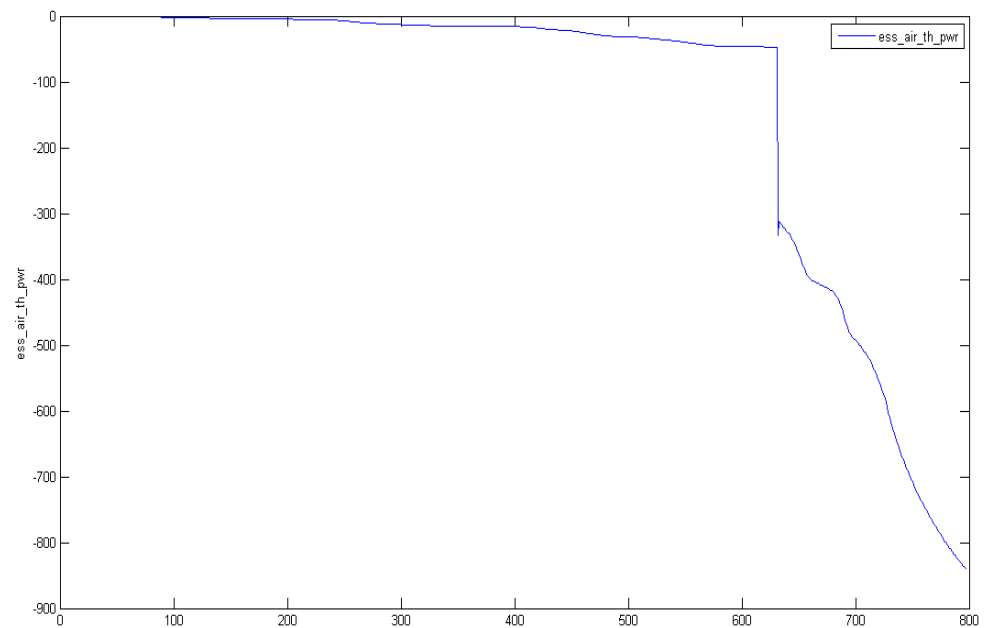
Figura 7.4: Ciclo Interurbano.

Los resultados obtenidos para las baterías son:

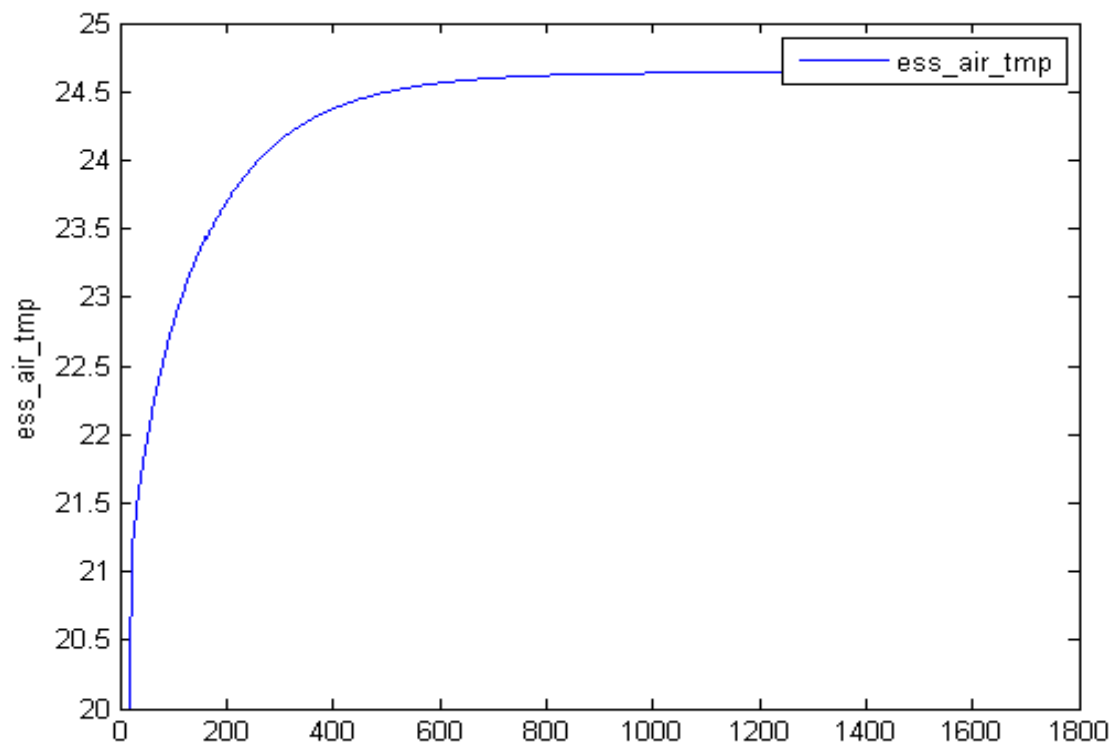
- Calor eliminado por batería de Grafeno:



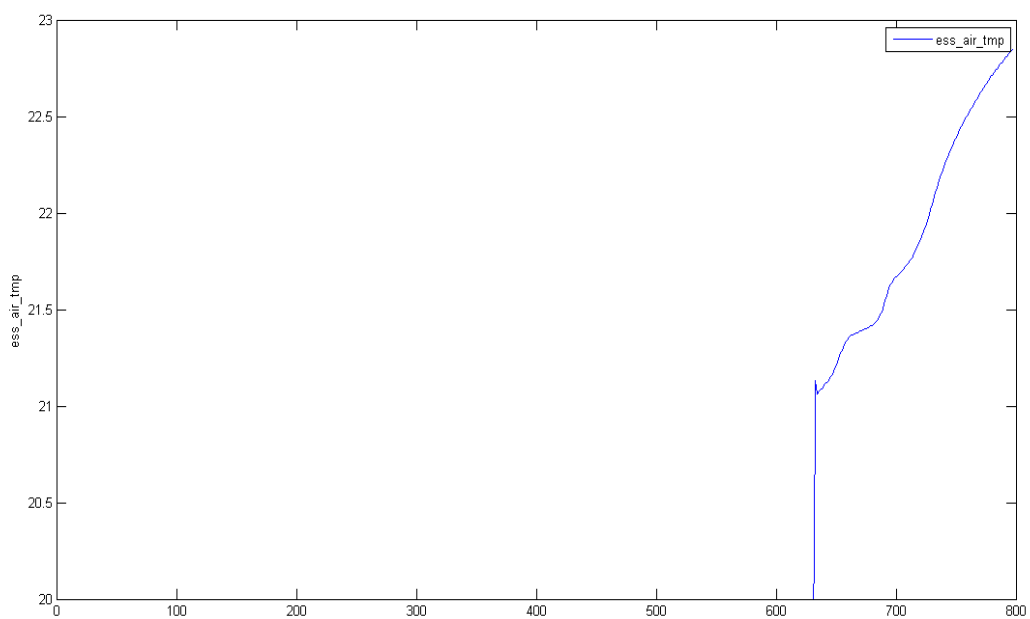
- Calor eliminado por batería de Litio:



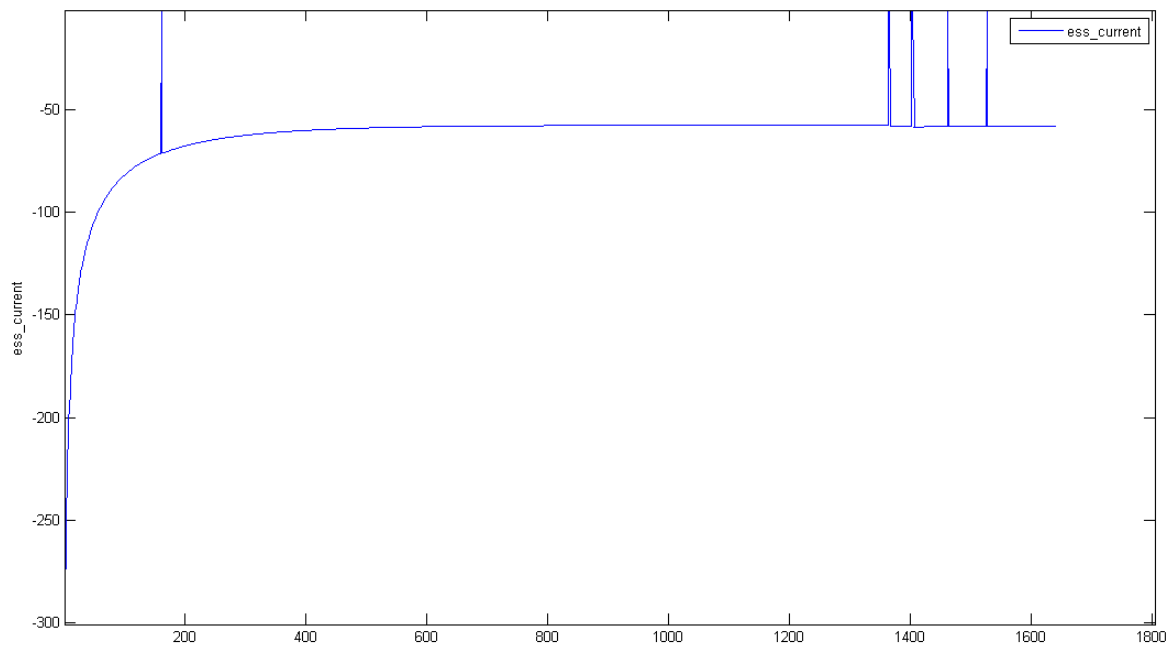
- Temperatura del aire batería de Grafeno:



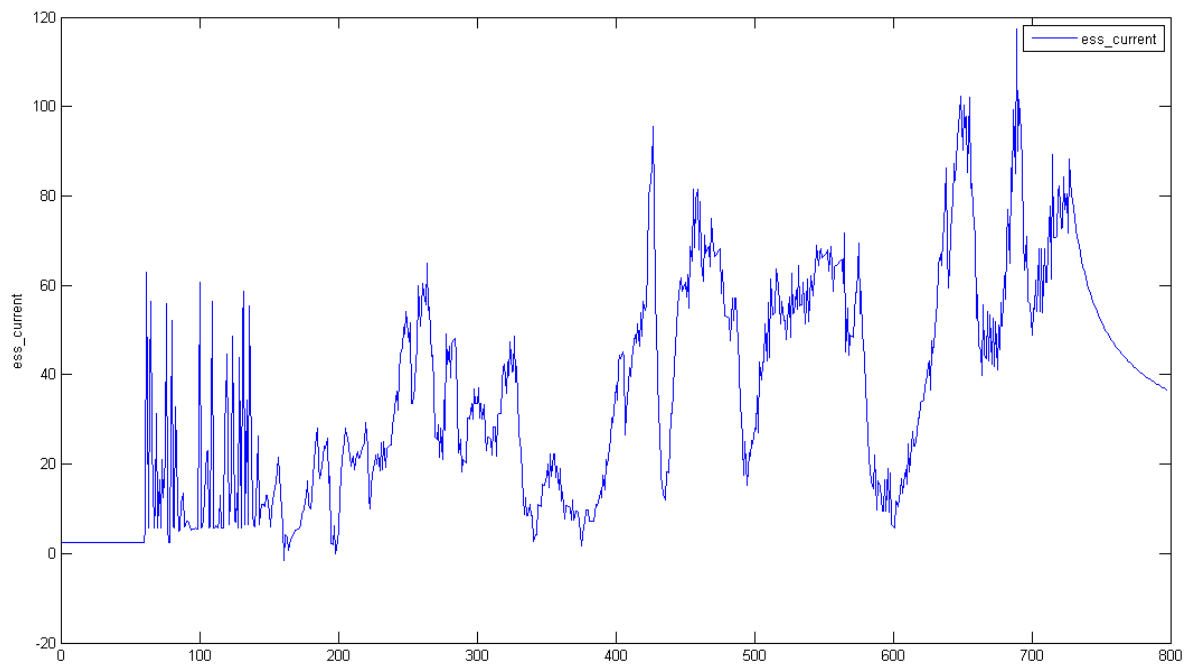
- Temperatura del aire batería de Litio:



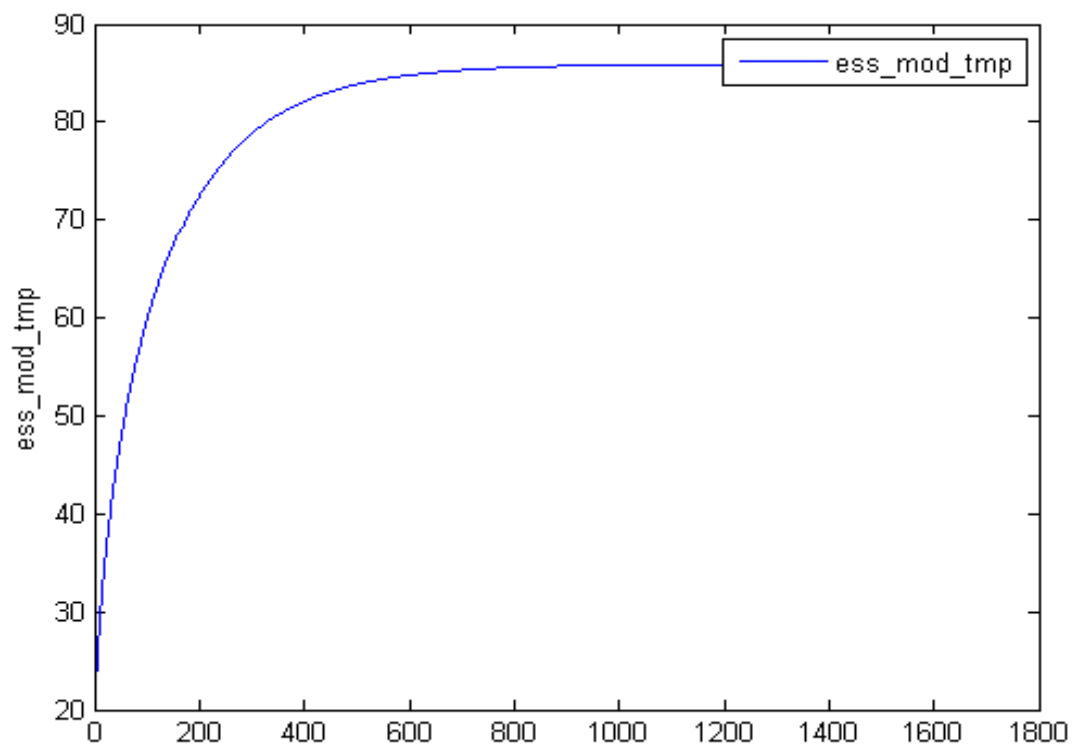
- Corriente en batería de Grafeno:



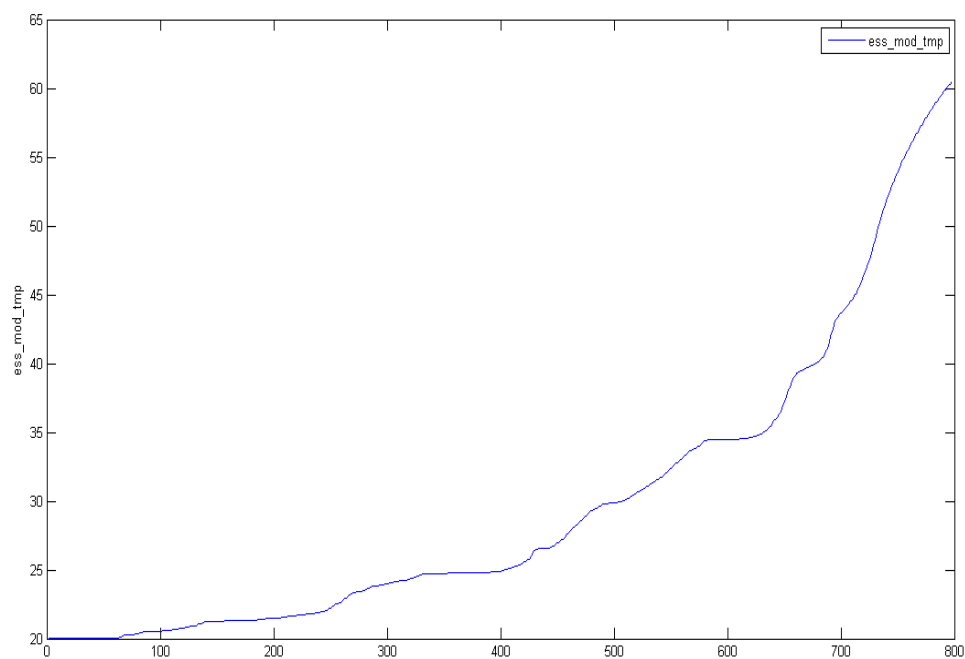
- Corriente batería de Litio:



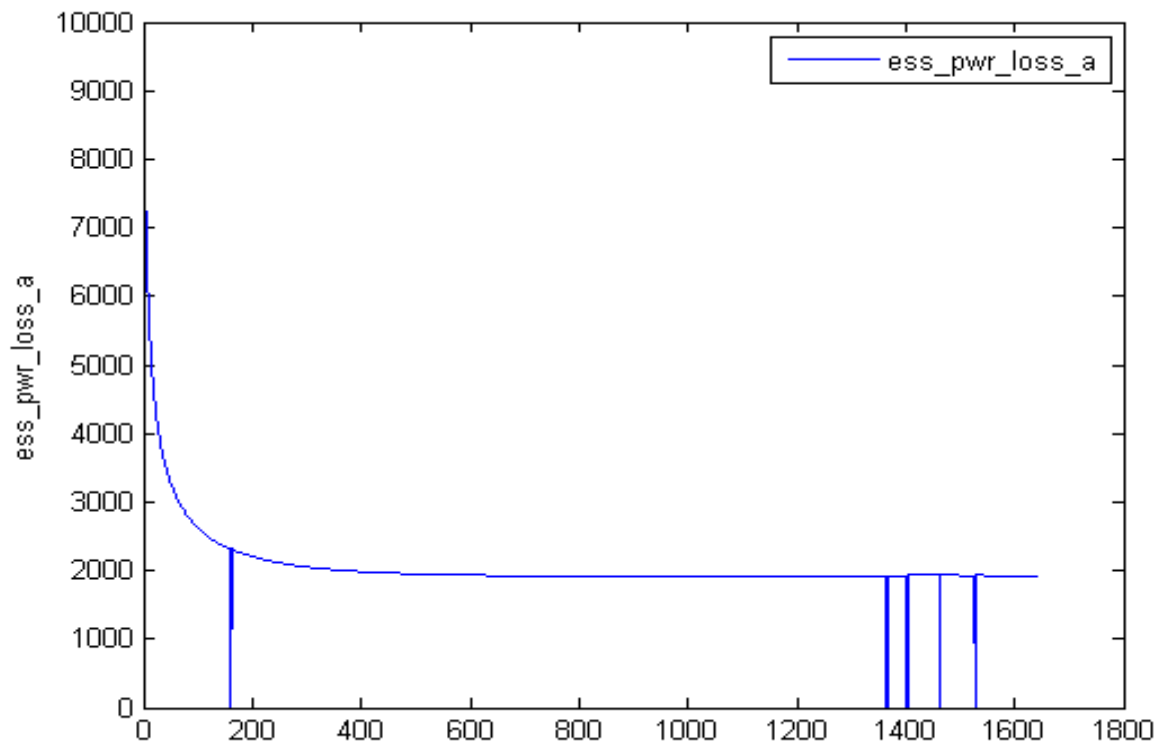
- Temperatura del módulo en batería de Grafeno:



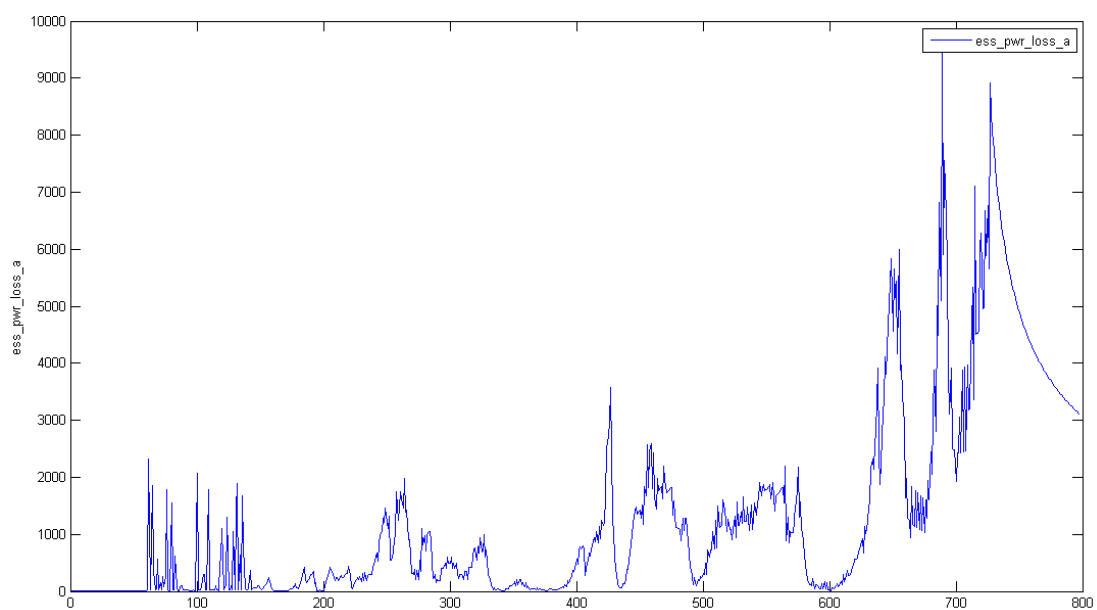
- Temperatura del módulo en batería de Litio:



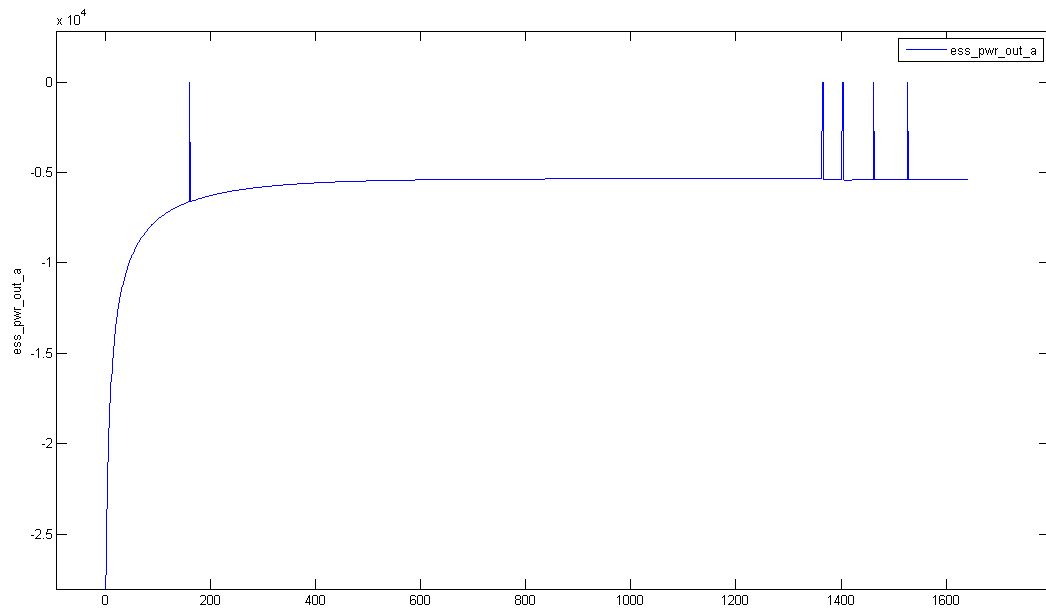
- Pérdidas de potencia en batería de grafeno:



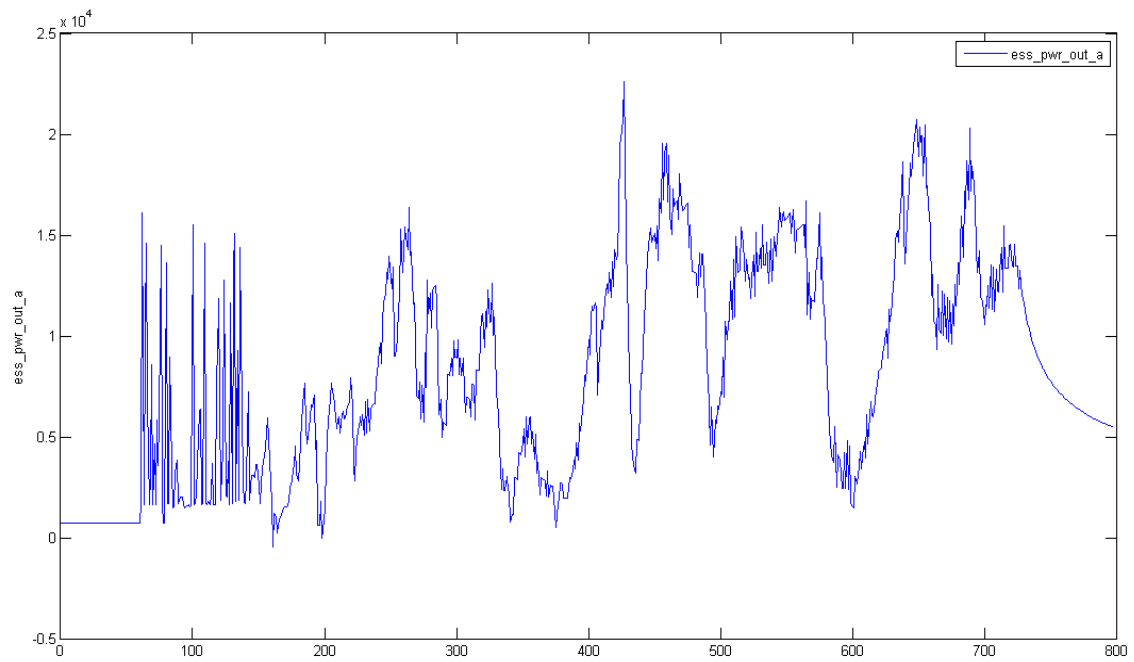
- Pérdidas de Potencia en batería de Litio:



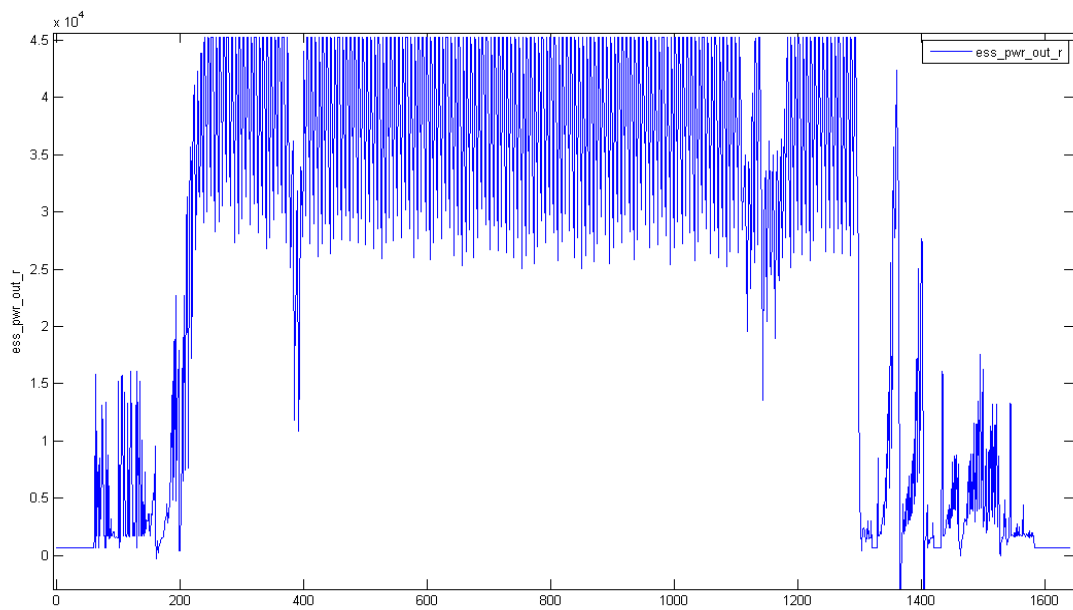
- Potencia de salida disponible en batería de Grafeno:



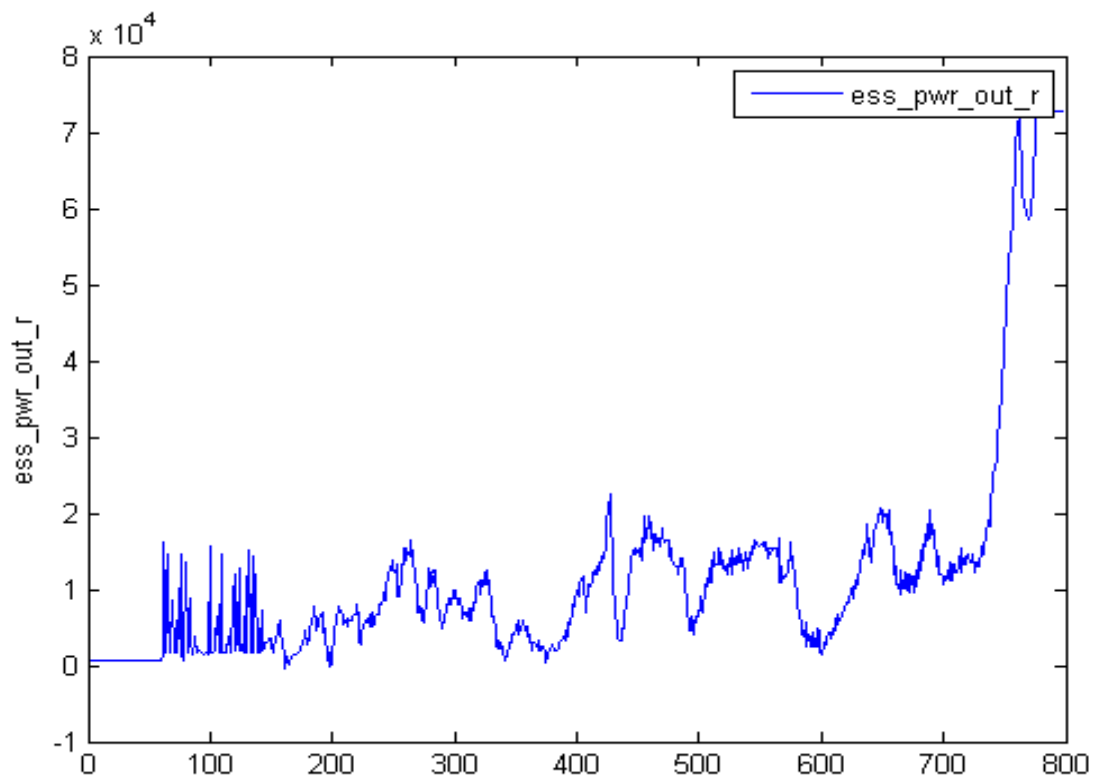
- Potencia de salida disponible en batería de Litio:



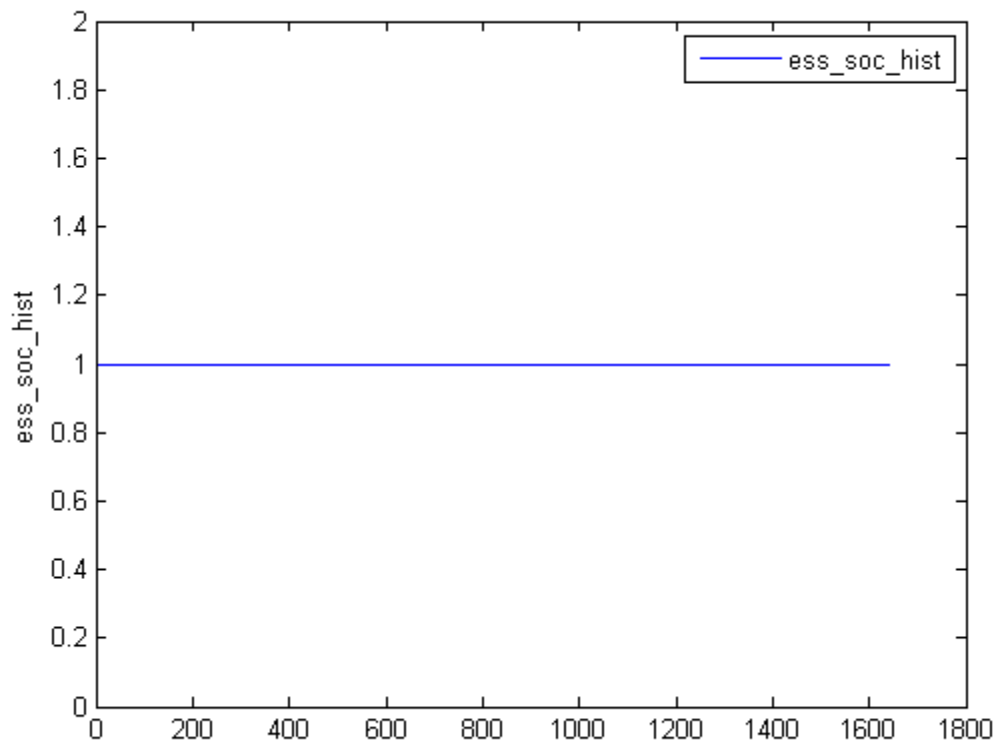
- Potencia de salida solicitada para batería de grafeno:



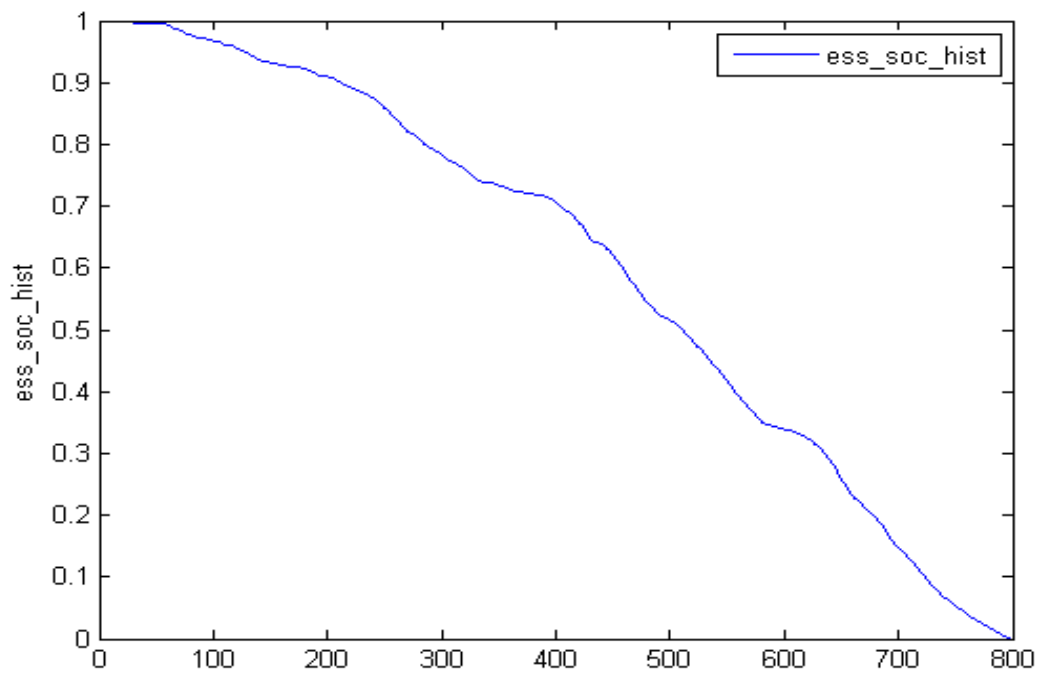
- Potencia de salida solicitada para batería de litio:



- SOC para batería de grafeno:



- SOC para batería de Litio:



7.3 CICLO A VELOCIDAD CONSTANTE.

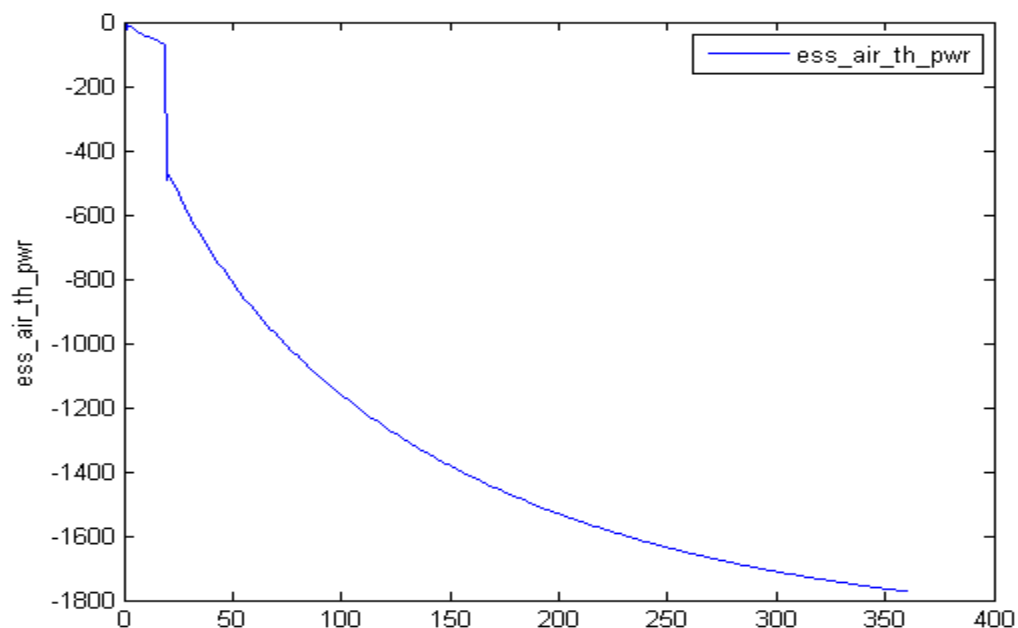
Una vez hemos realizado los ensayos más usuales que se pueden ensayar en un vehículo, comprobamos que en estos ciclos algunos de los resultados obtenidos no eran suficientemente estables, obteniendo gráficas con mucho ruido en pequeños intervalos con velocidades distintas. Por ello el tercer ciclo que elegimos tiene una velocidad constante, lo que nos proporcionará unos resultados más estables.

time:	360 s
distance:	10.46 km
max speed:	104.61 km/h
avg speed:	104.61 km/h
max accel:	0 m/s ²
max decel:	0 m/s ²
avg accel:	0 m/s ²
avg decel:	0 m/s ²
idle time:	0 s
no. of stops:	0
max up grade:	0 %
avg up grade:	0 %
max dn grade:	0 %
avg dn grade:	0 %

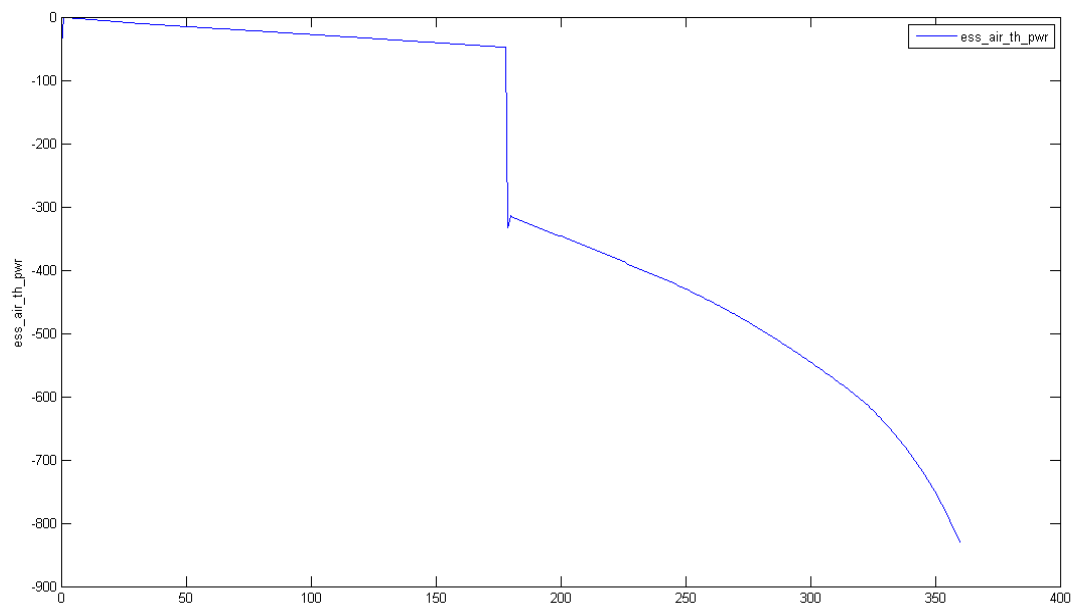
Figura 7.5: Características ciclo v= cte.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

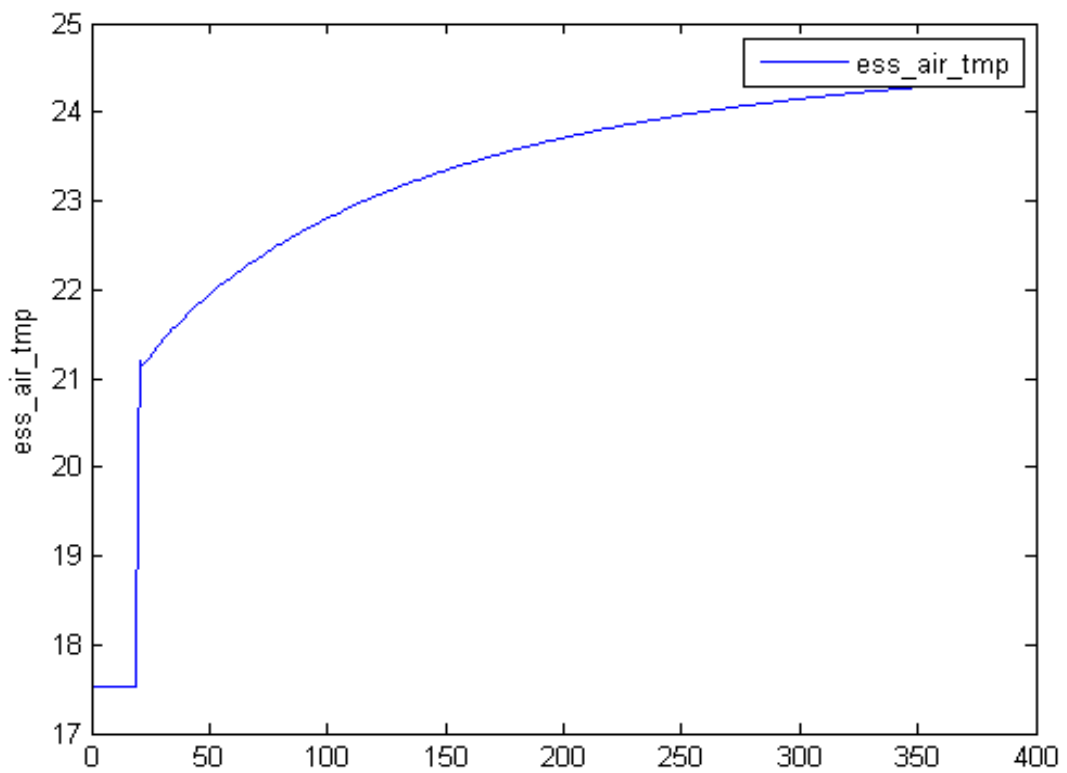
- Calor eliminado por batería de grafeno:



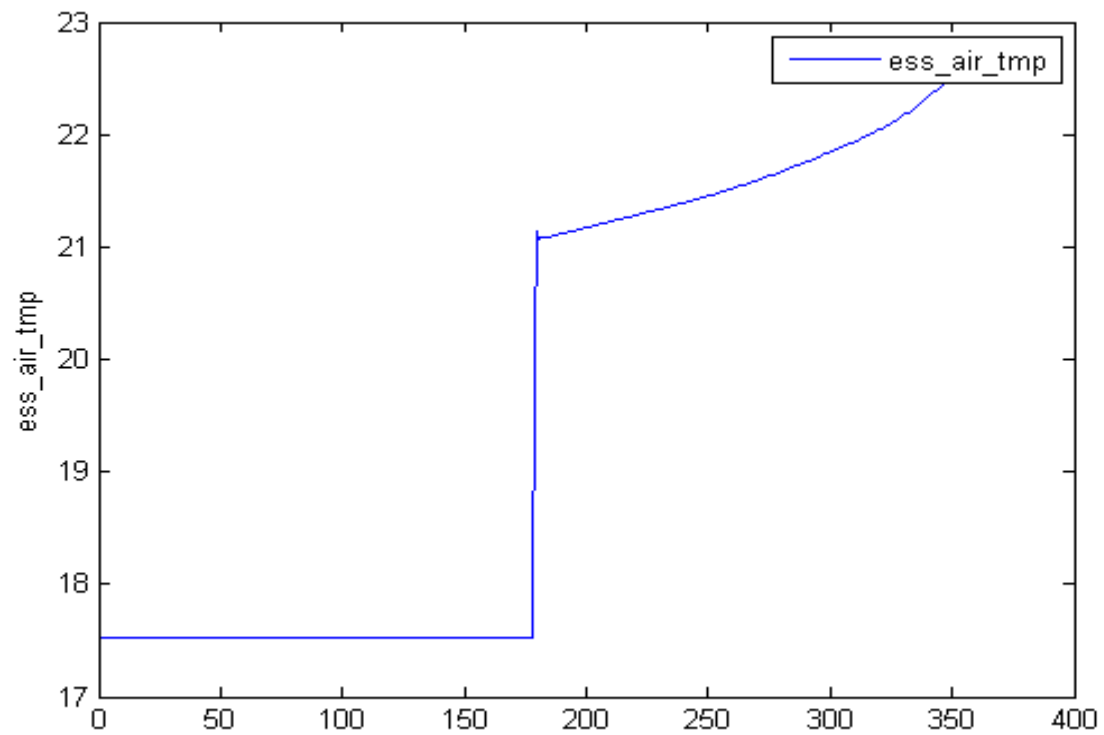
- Calor eliminado por batería de Litio:



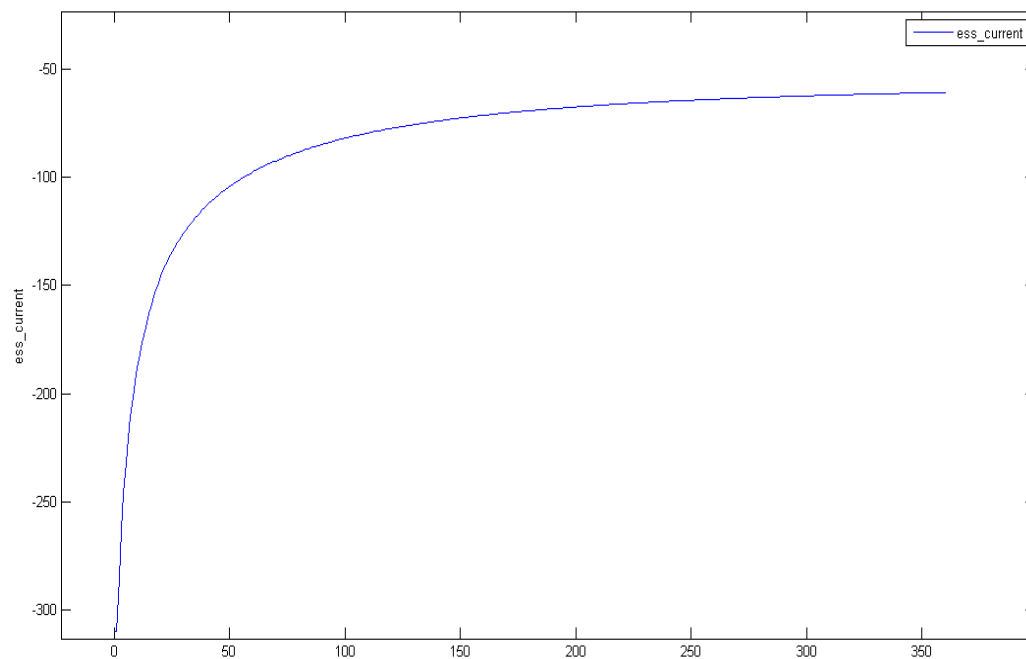
- Temperatura del aire en batería de grafeno:



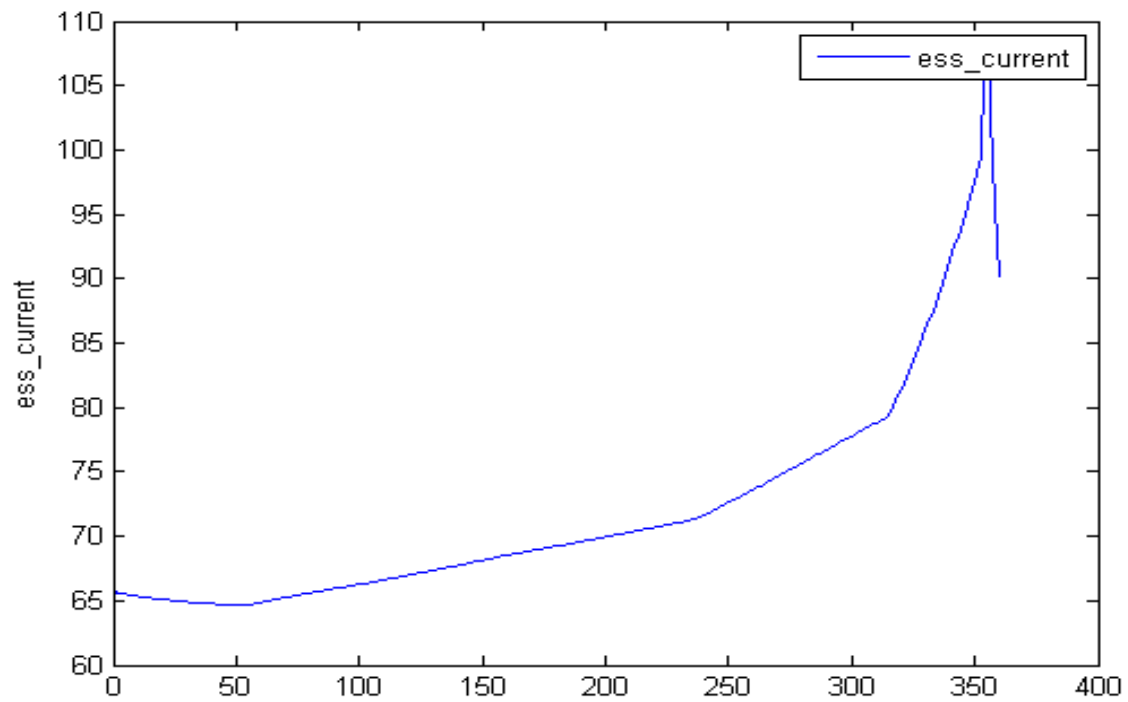
- Temperatura del aire en batería de Litio:



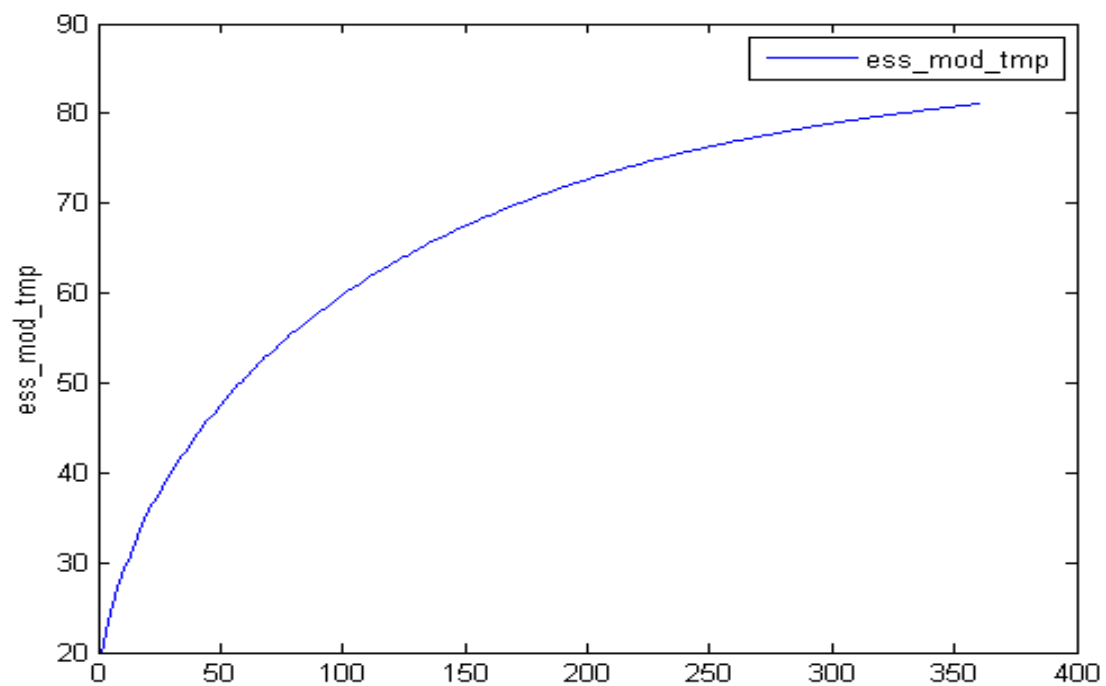
- Corriente en batería de grafeno:



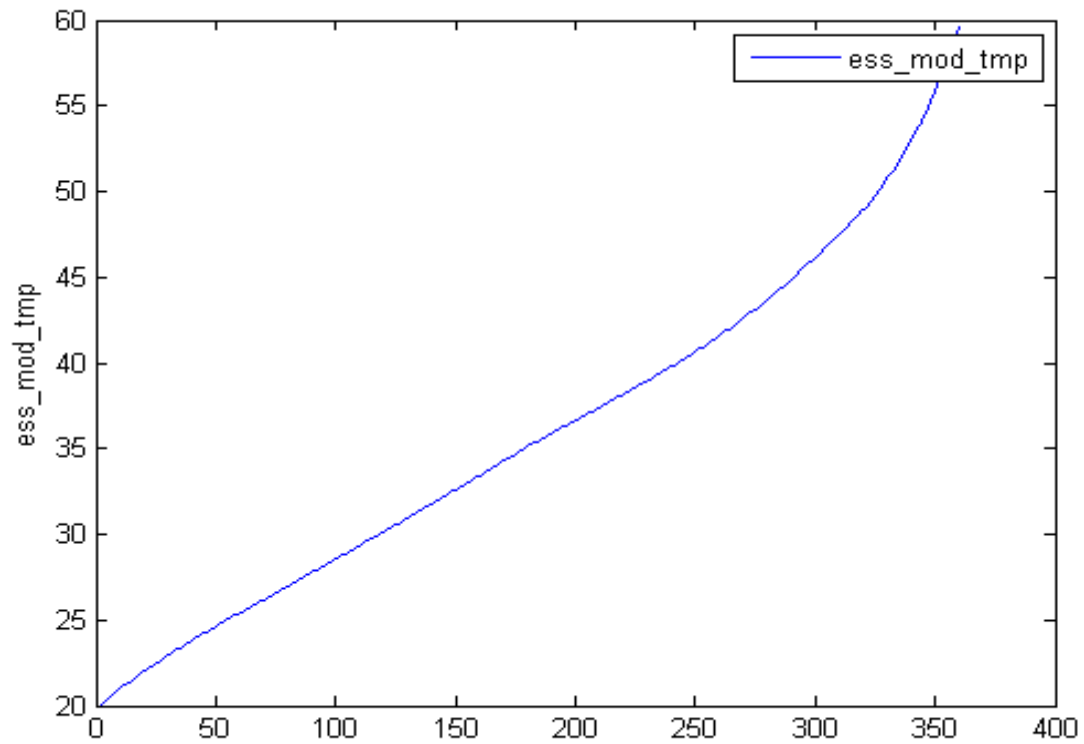
- Corriente en batería de Litio:



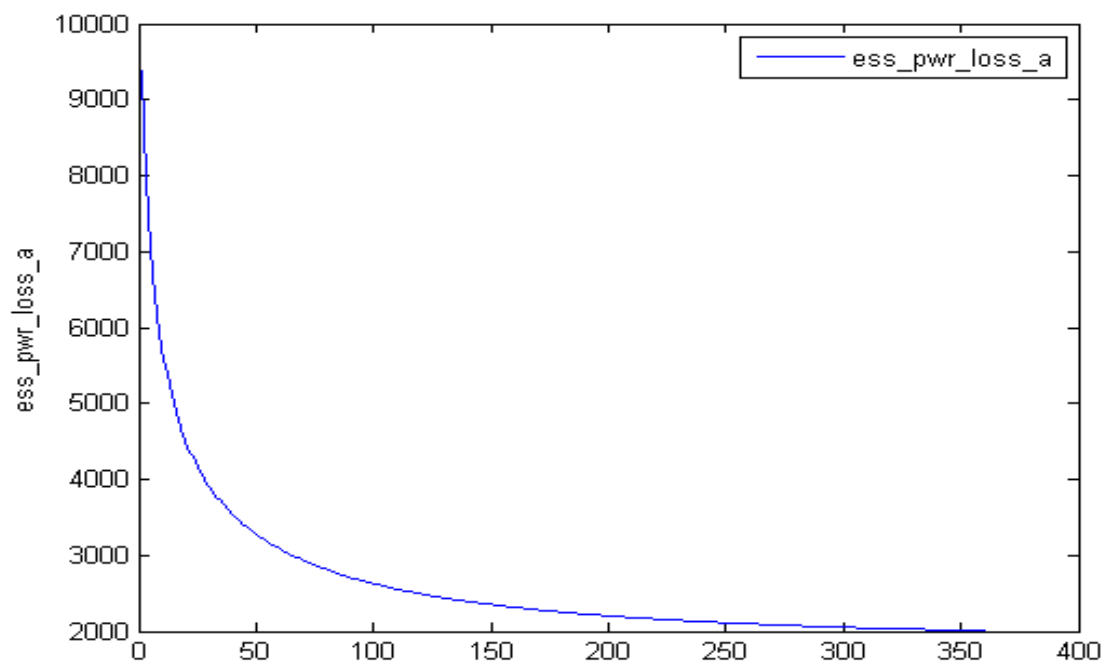
- Temperatura del módulo batería de grafeno:



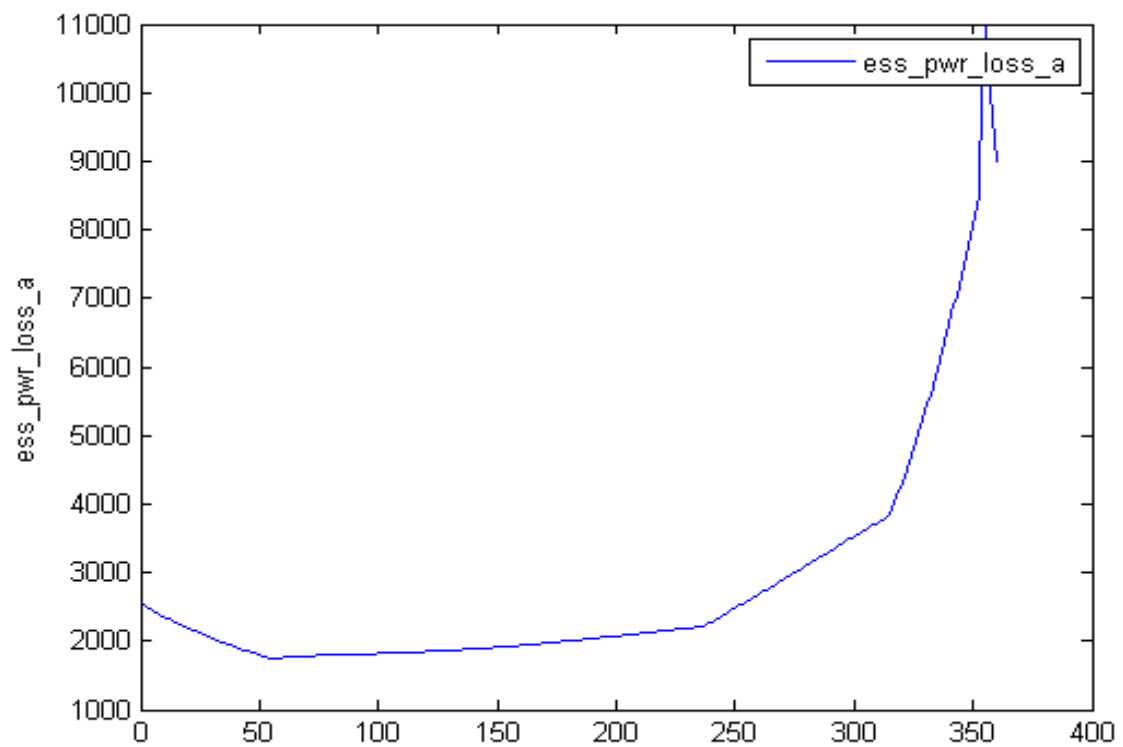
- Temperatura del módulo batería de Litio:



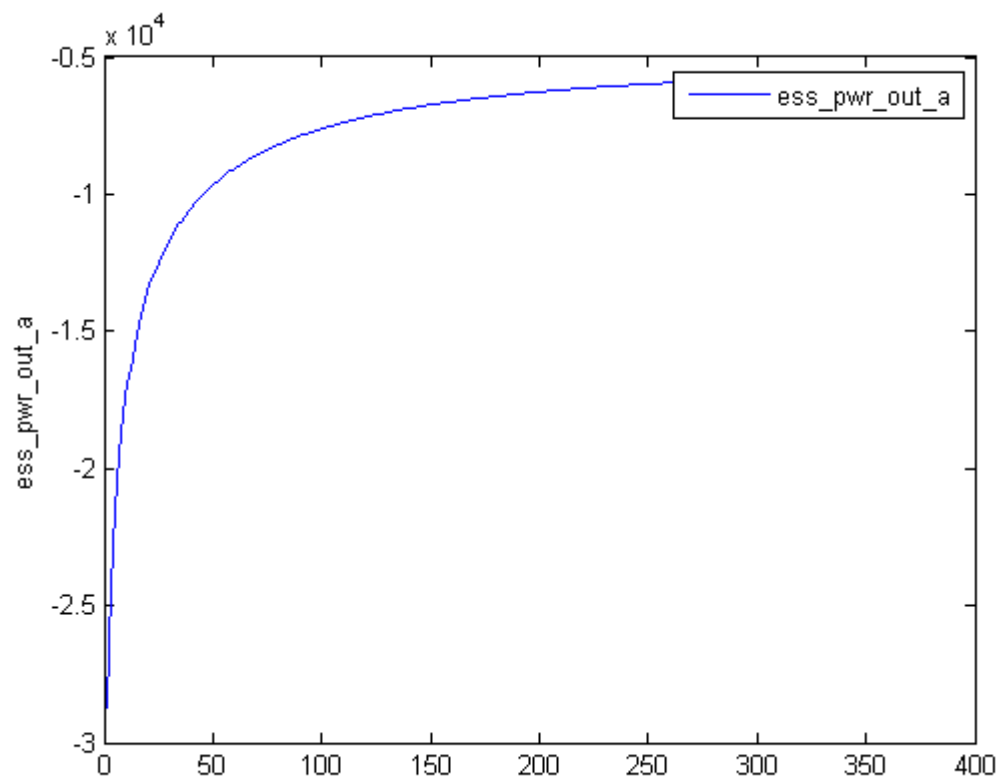
- Pérdidas de potencia en batería de grafeno:



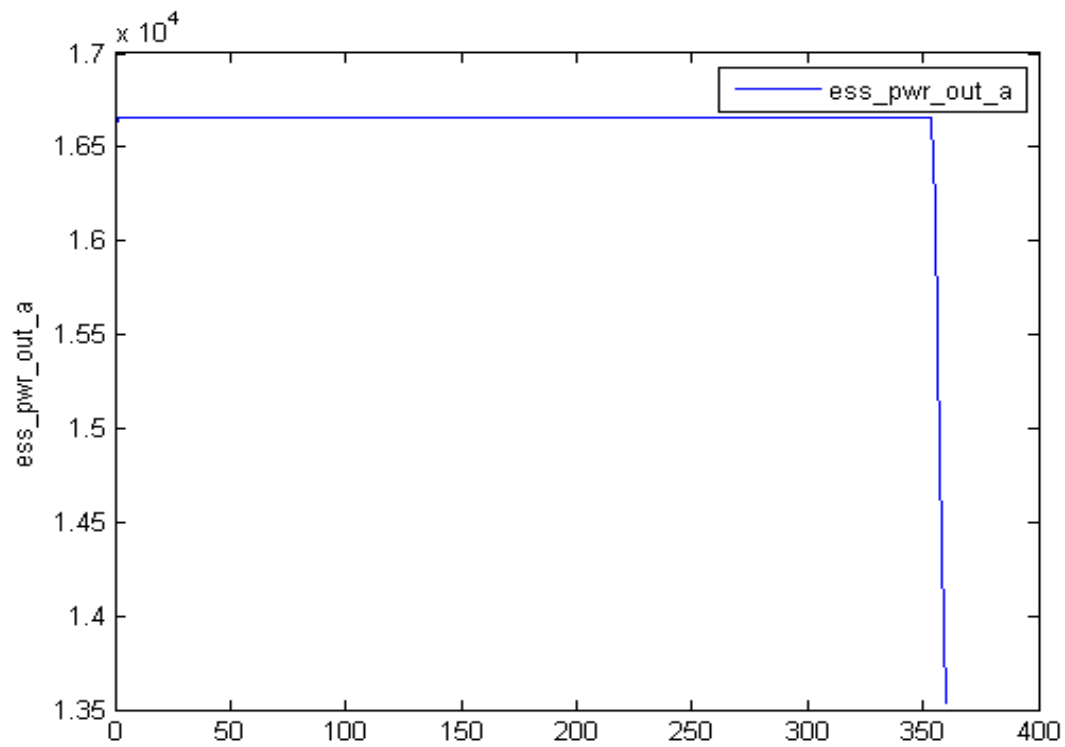
- Pérdidas de potencia en batería de Litio:



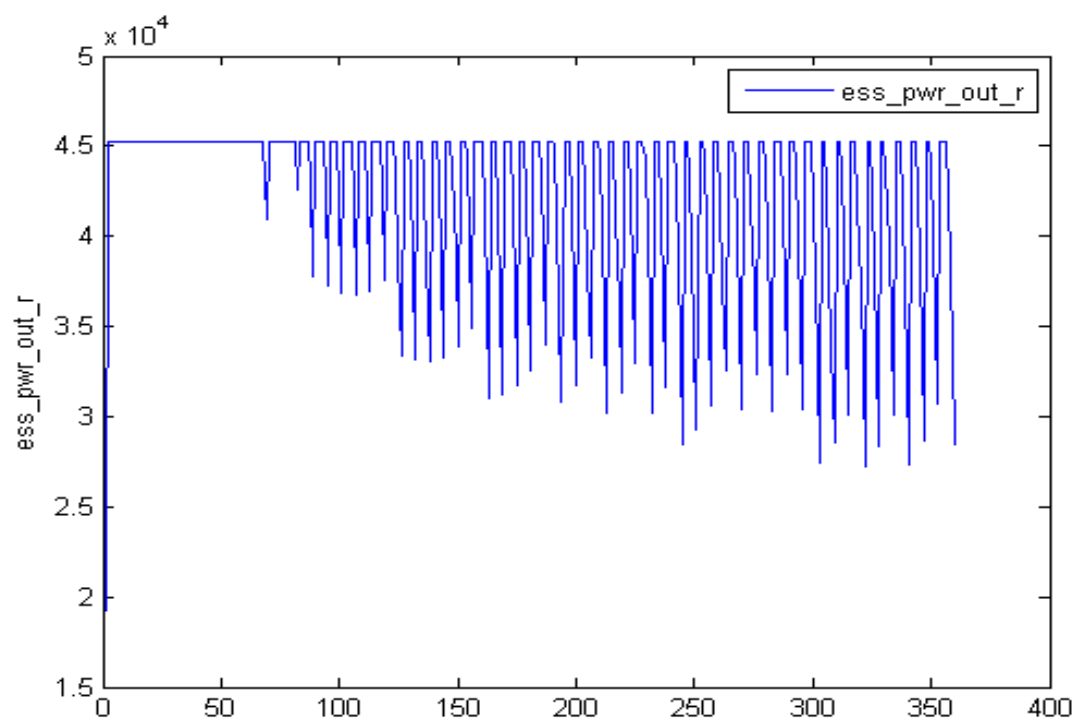
- Potencia de salida disponible en batería de grafeno:



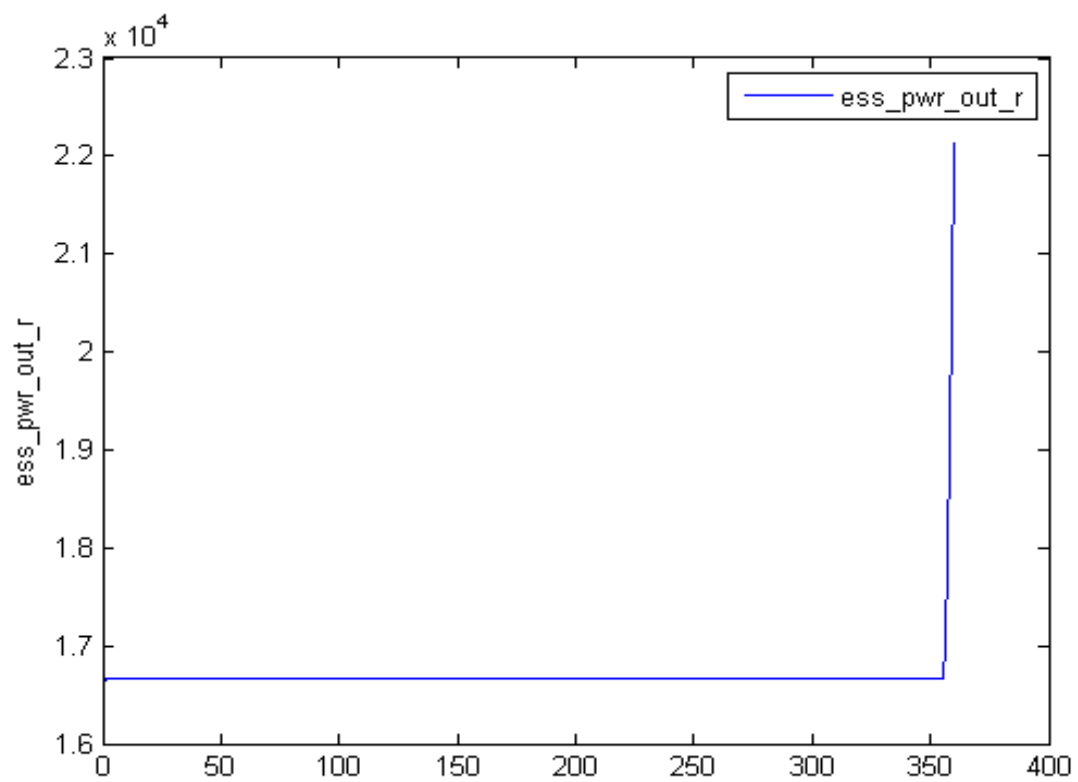
- Potencia de salida disponible en batería de Litio:



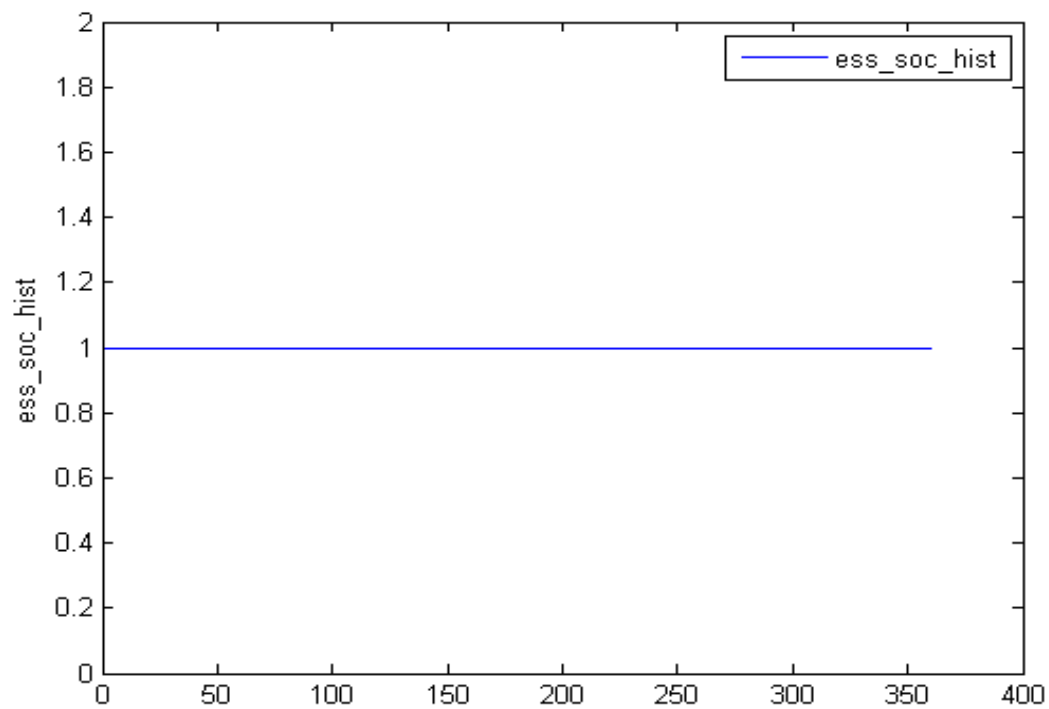
- Potencia de salida solicitada por batería de grafeno:



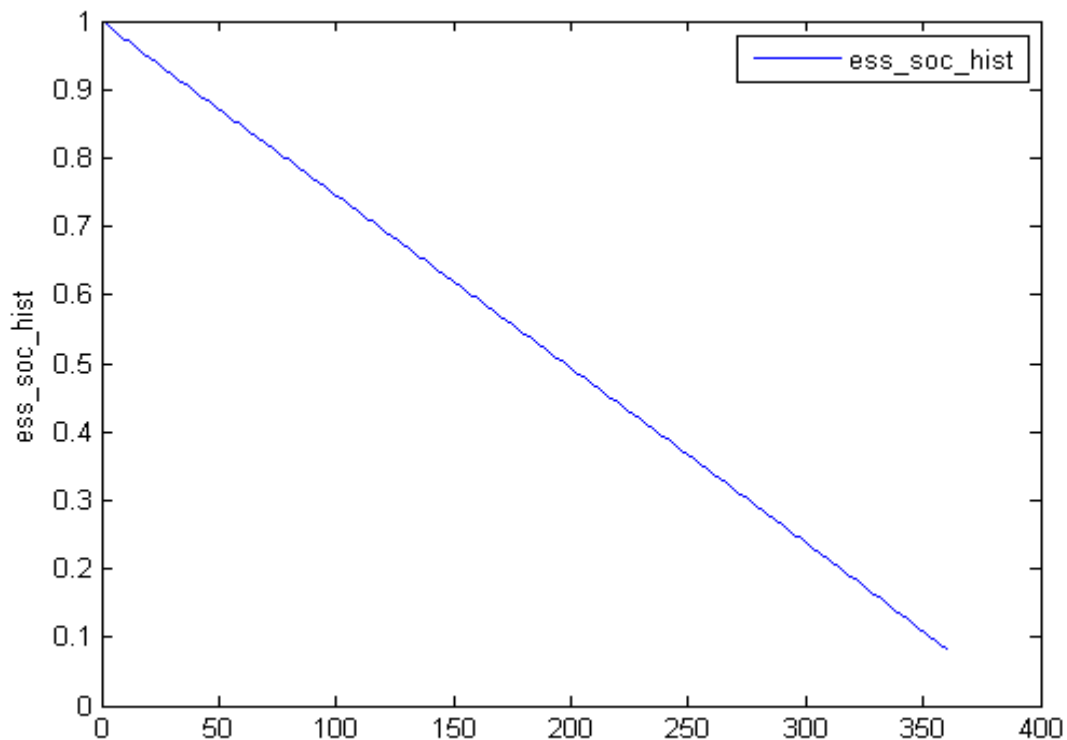
- Potencia de salida solicitada por batería de Litio:



- SOC batería de grafeno:



- SOC batería de Litio:



7.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Al realizar las simulaciones con los tres ciclos que hemos determinado, nos arroja los resultados que hemos expuesto anteriormente. Las magnitudes que hemos escogido han sido únicamente las referentes a Energy Storage System (batería), también podemos coger magnitudes del motor, transmisión, o neumáticos, pero en relación al estudio que nos atañe hemos considerado que no tenían gran relevancia.

Las magnitudes que estudiamos para la batería son ocho, entre ellas tenemos 5 correspondientes a electricidad, y tres relacionadas con el estado térmico del módulo de batería. A continuación vamos a realizar una comparación general entre los valores obtenidos para cada una de ellas teniendo en cuenta los tres ciclos que se han ensayado. No tendremos en cuenta algunos valores pico obtenidos, debido a que estos son errores de cálculo del propio programa.

- **Corriente:** su comportamiento ha estado ligado al ciclo de ensayo que se le ha realizado, coincidiendo los picos de intensidad con las velocidades más altas, y los descensos con frenadas y velocidades menores. Las gráficas obtenidas para la batería de Litio han sido menos estables que en la batería de grafeno. Siendo la corriente la magnitud más significativa hemos visto necesario describir el comportamiento para cada uno de los ciclos:
 - **Ciclo UDDS:** encontramos los valores menos estables de entre los 3 ciclos, aún así la batería de grafeno ha desarrollado valores más altos de amperaje y ha demostrado comportarse mejor a los cambios de velocidad y las frenadas.
 - **Ciclo Interurbano:** la gráfica para la batería de Litio presenta valores muy dispersos con grandes cambios de intensidad, sin embargo, para la batería de grafeno obtenemos una gráfica exponencial que en su arranque comienza en 275 A y rápidamente se establece en 60 A aproximadamente.
 - **Ciclo a velocidad constante:** volvemos a tener una figura exponencial para la batería de grafeno, se produce un pico de intensidad para alcanzar la velocidad crucero, una vez alcanzada la intensidad disminuye exponencialmente. En la batería de Litio ocurre lo contrario, parte de 67 A, la intensidad mínima de la gráfica, y a medida que mantenemos la velocidad constante la intensidad aumenta hasta 105 A.
- **Potencia de salida disponible:** tal y como era de esperar la potencia de salida que muestran las gráficas tienen todas las mismas figuras que las mostradas en corriente. La potencia en una batería depende del valor de la intensidad, ya que la tensión se establece una constante. La descripción por ciclo es análoga a la realizada en la corriente. Los valores en los ciclos interurbano y a velocidad constante son más estables que para el ciclo urbano. Las potencias de salida oscilan entre los 25 kW y los 5 kW, mostrando picos de hasta 80 kW en el caso de la batería de Litio y 40 kW en la batería de grafeno.
- **Pérdidas de potencia:** al igual que la potencia de salida, las pérdidas vuelven a tener la misma figura que la corriente. En este caso son aún más parecidas ya que las mayores pérdidas que tiene un circuito eléctrico están ocasionadas por el efecto

Joule, dependiente de la intensidad. Observando las gráficas de corriente y de pérdidas a la misma vez, coincide que a mayores intensidades obtenemos mayores pérdidas, por lo tanto los datos calculados son correctos. En cuanto a la batería de Grafeno y de Litio, las pérdidas son mucho menores en la primera. Podemos confirmar con estos datos la mayor eficiencia de una batería de grafeno con respecto a la batería de Litio.

- **SOC:** el estado de carga de una batería corresponde a la cantidad de carga que dispone esta. Una vez entendido esto, en el caso de la batería de Grafeno, la capacidad de carga es tan grande que su estado de carga no se ve afectado en tan corto espacio de tiempo y trayecto, necesitaríamos unos ciclos de ensayo mucho mayores para poder descargarla. Por otro lado, el SOC de la batería de Litio desciende de forma casi lineal sin llegar a descargarse en dos de los ciclos efectuados.
- **Potencia de salida neta:** esta variable representará la potencia sin pérdidas que utilizará la batería. Centrándonos en los ciclos interurbano y de velocidad constante donde los resultados son más concretos, la batería de grafeno presenta valores mayores de potencia en cada ciclo. Adecuándose la cantidad de potencia a la intensidad que nos ha proporcionado la batería. La batería de Litio al tener unas pérdidas de potencia mayores resulta en una potencia útil menor.
- **Variables térmicas:** disponemos de tres variables térmicas de cálculo: temperatura del aire, temperatura del módulo y calor eliminado por la batería. No nos vamos a extender en el estudio de cada una tal y como hemos hecho con las variables eléctricas. En cuanto al calor cedido, la batería de grafeno elimina el calor de la superficie en torno a 10 veces más rápido que una batería de Litio. La temperatura del aire en la batería de Litio es más estable en cortos periodos de tiempo, mientras que la de grafeno presenta mayor estabilidad durante el ciclo completo. En cambio, en temperatura del módulo, la batería de Litio muestra valores más bajos que la batería de grafeno.

8. CONCLUSIONES

Tras el estudio previo teórico de las baterías de grafeno y sus propiedades tanto eléctricas como térmicas, los resultados han verificado cada una de ellas. A nivel estructural hemos visto como el grafeno no es utilizado al 100% para la creación de una batería, si no que es el mejor material para crear los ánodos y cátodos, parte más importante de una batería, en combinación con otros elementos. De hecho esta combinación suele ser principalmente con Litio además de añadir otros elementos como aluminio, magnesio o aire como el caso que nos incumbe.

Dos de las propiedades más importantes son la conductividad térmica y eléctrica del grafeno, de ahí su utilización en los ánodos y cátodos. Estas propiedades han sido confirmadas a través de la simulación que hemos realizado. Retrocediendo a las gráficas y a la interpretación de los resultados, observamos que en cuanto a conductividad térmica, su valor es mayor que en una batería de Litio común. Esto desemboca en tener una temperatura en el módulo de batería mucho mayor, pero una mayor conductividad térmica también proporciona mayor capacidad para disipar calor del módulo de batería. Si observamos las variables eléctricas, partiendo de la corriente como principal magnitud de donde dependen las demás, tenemos una batería de grafeno mucho más eficiente que necesita un amperaje menor para realizar el mismo recorrido. Al consumir menos intensidad, tenemos una producción menor de pérdidas de potencia en la batería, y una potencia útil mayor. El conjunto de estas magnitudes conlleva un estado de carga más estable alargando la vida útil de la batería y los kilómetros que puede llegar hacer un vehículo.

Una vez dicho todo esto, podemos concluir que una batería compuesta de Litio-Grafeno-aire es mucho más eficiente, estable y potente que una batería de Litio comercial. La siguiente pregunta que nos invade es: ¿por qué no se comercializan si su propiedades están más que comprobadas?

9. BIBLIOGRAFÍA.

- C.N.R. Rao & A.K. Sood. (2012). *Graphene Synthesis*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Hassan Raza. (2012). *Graphene Nanoelectronics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Warner, J.H., Schäffel, F., Bachmatiuk, A. & Rummeli, M.H. (2013). *Graphene*. Oxford: Elsevier.
- Mikhailov, S. (2011). *Physics and Applications of Graphene – Theory*. Rijeka: InTech.
- Choi, W. & Lee, J. (2012). *Graphene Synthesis and Applications*. Nueva York: CRC Press.
- Philip, H.S. & Akinwande, D. (2011). *Carbon nanotube and Graphene Device Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang, J. (2015). *Graphene Energy Storage and Conversion Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Aoki, H & Dresselhaus, M.S. (2014). *Physics of Graphene*. Nueva York: Springer.
- Wolf, E.L. (2014). *Applications of Graphene*. Nueva York: Springer
- Fujita, S. & Suzuki, A. (2013). *Electrical Conduction in Graphene and Nanotubes*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Skákalová, V. & Kaiser, A.B. (). *Graphene Properties, preparation, characterization and devices*. Oxford: Elsevier.
- Folkson, A. (2014). *Advanced Vehicle Technologies for Improved Enviromental Performance*. Oxford: Elsevier.
- Jiang, J. & Zhang, C. (2015). *Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*. Singapore: Wiley.
- Mi, C., Abul, M. & Wenzhong, David. (2011). *Hybrid Electric Vehicles*. Chichester: Wiley.
- Chau, K.T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives*. Singapore: Wiley.