

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

## Trabajo Fin de Grado

Javier Guembe Zabaleta

Idoia San Martín Biurrun

Julio María Pascual Miquelez

Pamplona, 28 de junio de 2016



## RESUMEN

Actualmente, con la popularización de los sistemas de generación renovable, el almacenamiento estacionario se está convirtiendo en una herramienta necesaria y las baterías electroquímicas son una tecnología adecuada para estas aplicaciones.

Al mismo tiempo, crece la necesidad de evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de trabajo dentro del amplio abanico de sus posibilidades. Para una gestión eficiente, es de gran importancia modelar las características de la batería para predecir su comportamiento ante carga y descarga, permitiendo optimizar el diseño tanto de los elementos de la batería, como los diferentes elementos del sistema. En el funcionamiento de la batería se definen dos parámetros básicos: Estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH), y hacen referencia a la carga disponible en la batería (en %) y a su envejecimiento.

En el presente trabajo fin de grado se ha caracterizado un algoritmo de estimación del SOC para un banco de baterías de plomo-ácido situado en la microrred de la Universidad Pública de Navarra. Para ello, se ha realizado un modelo simplificado para el banco de baterías de plomo-ácido y se ha diseñado un método de estimación que permite conocer su estado de carga con más exactitud que los métodos actuales, con el objetivo de mejorar la gestión energética de la microrred.

De la microrred únicamente se dispone información de la corriente y la tensión en bornes de la batería del año 2012. Por lo que tras el caracterizado del algoritmo, se ha implementado el algoritmo en la microrred para evaluar su funcionamiento en tiempo real y la evolución del SOH.

## ABSTRACT

Nowadays, due to the popularization of renewable generation systems, the stationary storage is becoming a necessary tool and electrochemical batteries are a suitable technology for these applications.

At the same time, the need to evaluate its behavior under different working conditions among the wide range of their possibilities is growing too. For efficient management, it is essential to model the characteristics of the battery in order to predict its behavior on charge and discharge, allowing the optimization of the design for battery elements, as well as different elements of the system. In battery functioning, two basic parameters are defined: State of charge (SOC) and state of health (SOH), which are refer to the available battery power (in %) and aging.

In this final project a SOC estimation algorithm has been characterized for a lead-acid battery bank located in the microgrid of the Public University of Navarre. For this purpose a simplified bank lead-acid model has been conducted and an estimation method that allows to know the SOC more accurately than the available methods has been designed, with the aim of improving the energy management of the microgrid.

The only information available for the microgrid is that of the current and the terminal voltage from 2012's battery. So, after the algorithm has been characterized, it has been implemented in the microgrid in order to evaluate its performance in real time, as well as the development of the SOH.



## ÍNDICE

1. OBJETIVO .....	7
2. INTRODUCCIÓN .....	8
3. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO .....	8
3.1 FUNDAMENTOS DE UNA BATERÍA ELECTROQUÍMICA .....	8
3.2 PARÁMETROS DE LA BATERÍA .....	9
3.3 ESQUEMA INTERNO DE UNA BATERÍA .....	10
3.4 ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO .....	10
3.5 PERDIDAS DE UNA BATERÍA .....	14
3.6 PROCESOS DE DEGRADACIÓN .....	14
4. MODELADO DE UNA BATERÍA .....	15
4.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL SOC .....	15
4.2 ESTADO DEL ARTE .....	18
5. DISEÑO DEL ALGORITMO .....	23
5.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL SOC .....	23
5.2 OBTENCIÓN DE LA CAPACIDAD NOMINAL .....	25
5.3 ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN .....	27
5.3.1 Tensión de circuito abierto .....	27
5.3.2 Estimación de la resistencia .....	28
5.4. ALGORITMO FINAL .....	35
5.4.1 Funcionamiento de la regulación .....	35
5.4.2 Regulador proporcional .....	38
5.4.3 Resultados obtenidos .....	40
5.4.4 Conclusiones .....	46
6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EN LA MICRORRED .....	48
7. CONCLUSIONES FINALES Y LÍNEAS FUTURAS .....	53
8. BIBLIOGRAFÍA .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema interno de una batería.....	10
Figura 2. Funcionamiento de una batería.....	11
Figura 3. Evolución de la tensión de una celda vs al SOC en un ensayo descarga de I=30A.....	12
Figura 4. Evolución de la tensión de una celda frente al SOC en un ensayo carga de I=30A.....	13
Figura 5. Modelo Randle de 2º orden .....	18
Figura 6. Estimación del SoC mixta .....	19
Figura 7. Modelo propuesto por Coleman .....	20
Figura 8. Relación V vs SOC .....	21
Figura 9. Modelo Thevenin teórico .....	21
Figura 10. Modelo Thevenin de Mahmud .....	22
Figura 11. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto .....	23
Figura 12. Rendimiento en descarga.....	24
Figura 13. Rendimiento en carga .....	24
Figura 14. Modelo de batería propuesto .....	25
Figura 15. Ensayos de descarga 1, 2, 3 y 4 .....	26
Figura 16. Ensayo de descarga 2 .....	28
Figura 17. Ensayo 2: Obtención de R en función del SOC .....	29
Figura 18. R vs SOC para los ensayos de descarga. ....	29
Figura 19. Ensayo de carga.....	30
Figura 20. Ensayo de carga: Representación de R en función del SOC .....	31
Figura 21. R obtenidas en los ensayos de carga y descarga en función del SOC .....	31
Figura 22. Tensión y corriente para los datos del 01/03/2012 .....	33
Figura 23. Calculo del SOC y de la Resistencia instantánea en datos del 01/03/2012.....	33
Figura 24. Resistencia instantánea en función de la corriente para los datos del 01/03/2012.33	33
Figura 25. Resistencia instantánea frente a bajas corrientes .....	33
Figura 26. Factor de corrección $\beta$ en función de la corriente .....	34
Figura 27. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto .....	36
Figura 28. Tendencia de R frente al SoC.....	36
Figura 29. Esquema funcionamiento de la regulación .....	37
Figura 30. Esquema 2 .....	37
Figura 31. Regulador proporcional.....	38
Figura 32. Prueba de Kp en datos del 06/09/2012.....	39
Figura 33. Tensión y corriente para los datos del 01/03/2012 .....	41
Figura 34. Resultados obtenidos en los datos 01/03/2012.....	41
Figura 35. Tensión y corriente para los datos del 06/09/2012 .....	42
Figura 36. Resultados obtenidos en los datos 06/09/2012.....	43
Figura 37. Tensión y corriente para los datos del 08/03/2012 .....	43
Figura 38. Resultados obtenidos en los datos 08/03/2012.....	44
Figura 39. Tensión y corriente para los datos del 13/09/2012 .....	45
Figura 40. Resultados obtenidos en los datos 13/09/2012.....	45
Figura 41. Interfaz de control de la microrred .....	48
Figura 42. Implementación en Labview .....	49
Figura 43. Gráfico en tiempo real de las tensiones y del SOC.....	49
Figura 44. Funcionamiento del algoritmo en la microrred .....	50
Figura 45. Funcionamiento del algoritmo en la microrred una vez cargadas completamente las baterías.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos de descarga .....	25
Tabla 2. Capacidad obtenida en los ensayos de descarga .....	27
Tabla 3. RMSE obtenidos en la estimación de Vbat .....	46
Tabla 4. MAPE obtenidos en la estimación de Vbat .....	46
Tabla 5. RMSE y MAPE obtenidos tras implantar el algoritmo en la microrred .....	50
Tabla 6. RMSE y MAPE obtenidos una vez cargadas las baterías de la microrred.....	51

## 1. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fin de grado es realizar un modelo simplificado de baterías de plomo-ácido y diseñar un algoritmo que permita conocer su estado de carga con más exactitud que los métodos actuales.

Para ello, se ha recopilado información para comprender los diferentes fenómenos que ocurren dentro de una batería electroquímica, como sus estados de funcionamiento, las pérdidas o los procesos de degradación. Una vez caracterizada la batería se propone un algoritmo de estimación para la determinación del estado de carga. Para ello, primeramente se describen los modelos de baterías más importantes así como las diferentes metodologías para la estimación del estado de carga.

Una vez elegido algoritmo, se procede a su caracterizado y ajuste, realizando los ensayos, pruebas y conclusiones correspondientes.

Finalmente, el algoritmo es probado en tiempo real en la microrred de la Universidad Pública de Navarra. El algoritmo propuesto de este trabajo tiene como objetivo una mejora de la gestión energética de la microrred.

## 2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, con la popularización de los sistemas de generación renovable, el almacenamiento estacionario se está convirtiendo en una herramienta necesaria y las baterías electroquímicas son una tecnología adecuada para estas aplicaciones.

Al mismo tiempo crece la necesidad de evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de trabajo dentro del amplio abanico de sus posibilidades. Para una gestión eficiente es de gran importancia modelar las características de la batería para predecir su comportamiento ante carga y descarga, permitiendo optimizar el diseño tanto de los elementos de la batería, como los diferentes elementos del sistema.

En los últimos años, las microrredes se han popularizado como una gran alternativa a los sistemas de generación tradicionales en un futuro a medio-largo plazo. Una microrred comprende tecnologías de generación distribuida, incluido almacenamiento. Es instalada en los puntos de consumo y posee capacidad de gestión propia. La generación distribuida comprende fuentes de generación de pequeña potencia, generalmente de carácter renovable, situada cerca de los puntos de consumo.

En una microrred, el objetivo principal es la satisfacción local de la demanda. Por ello, las estrategias de control de la microrred juegan un carácter fundamental debido al carácter aleatorio de varios recursos renovables, como el caso de la eólica o la fotovoltaica. Para una gestión eficiente es imprescindible una correcta estimación del estado de carga del banco de baterías.

De todos los elementos que componen una microrred, la parte más crítica de la instalación son las baterías, puesto que su vida útil suele encontrarse en torno a los 5 años. Además, con el tiempo las baterías se van degradando progresivamente, disminuyendo su capacidad de almacenar energía, por lo que el control del estado de carga todavía se hace más impreciso.

Por tanto, conocer con precisión el estado de carga de las baterías supone una mayor eficacia en las estrategias de control, así como un ahorro en costes, puesto que evita el sobredimensionamiento de la instalación.

## 3. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

### 3.1 FUNDAMENTOS DE UNA BATERÍA ELECTROQUÍMICA

Una batería es un elemento que convierte energía química en energía eléctrica mediante un proceso electroquímico. Una celda es la unidad básica de una batería, por lo que una batería está formada por un conjunto de celdas. La celda está formada por 2 electrodos (uno positivo y otro negativo) inversos en un electrolito, el electrolito es el medio iónico que permite la transferencia de electrones entre el ánodo y el cátodo.

Las baterías son capaces de almacenar energía. Los factores que determinan la cantidad de energía de una batería son la capacidad y el voltaje. La capacidad indica la cantidad de corriente que puede suministrar durante una descarga en un tiempo especificado y para una tensión de corte. La capacidad se expresa en Amperios hora (Ah) y depende de varios factores, como la corriente, la temperatura o el estado de salud de la batería.

A mayor corriente de descarga, menor capacidad efectiva o aprovechable. Esto es debido a que la corriente determina la velocidad de reacción. A mayor corriente, las reacciones internas de la batería son más superficiales y por tanto la capacidad aprovechable disminuye.

El incremento de temperatura favorece a los procesos electroquímicos que tienen lugar en la batería, y por tanto la capacidad efectiva aumenta.

El estado de carga o SOC (*State of charge*) es un indicador de la energía almacenada en una batería. Este indicador se expresa en porcentaje y varía de 0 a 100. Cuando el estado de carga es igual a 100% la batería se encuentra cargada completamente, y 0% cuando esté completamente descargada. Que el SOC sea igual 0% no implica que no quede energía en el interior de la batería, de hecho, sí queda almacenada en el interior. El 0% indica el límite a partir del cual si se continua extrayendo energía de la batería, se producirán cambios irreversibles en esta, quedando gravemente deteriorada. Este límite lo marca la tensión de corte, esta tensión presenta el valor minimo de tensión por el cual, por debajo de este la batería se deteriora. La cantidad de energía que puede extraerse de una batería se denomina profundidad de descarga (DOD).

### 3.2 PARÁMETROS DE LA BATERÍA

A continuación se definen los parámetros que definen el comportamiento de una batería.

- **Tensión nominal:** Diferencia de potencial entre el polo positivo y negativo proporcionado por el fabricante.
- **Tensión de carga:** Tensión necesaria para vencer la resistencia que opone una batería a ser cargada.
- **Tensión en circuito abierto:** Tensión en bornes de la batería cuando la corriente es cero.
- **Capacidad nominal:** Cantidad de corriente que puede suministrar durante una descarga en un tiempo especificado y para una tensión de corte.
- **Impedancia interna:** Resistencia que oponen todos los componentes internos de la batería como electrodos, electrolito y terminales y varía en función del estado de carga, el estado de salud, la corriente y la temperatura. Aumenta con la descarga de la batería y con el envejecimiento de ésta. Contra más impedancia interna menor rendimiento de la batería.
- **Estado de carga (SOC):** Parámetro que expresa en % la energía disponible de la batería en un momento dado.
- **Profundidad de descarga:** El *Depth of Discharge* (DOD), se mide en tanto por ciento y hace referencia a la cantidad de energía extraída de una batería en función de su capacidad nominal en cada ciclo de descarga

$$DOD = 1 - SOC \quad (1)$$

- **Estado de salud:** El *State of Health* (SoH) cuantifica la degradación y el envejecimiento sufrido por la batería. Este parámetro afecta considerablemente la capacidad de la batería.
- **Vida útil:** Tiempo que tarda una batería en reducir su capacidad a un 80% del total. Está muy relacionada con el DoD, puesto que dependiendo del DoD la batería puede realizar un mayor número de ciclos de carga/descarga. A mayor DoD, menor número de ciclos.
- **Eficiencia energética:** Porcentaje de energía eléctrica que proporciona la batería con respecto a la empleada para cargarla. Idealmente debería ser un 100%.
- **Efecto de la temperatura:** Uno de los factores que más afecta al correcto funcionamiento de la batería. A temperaturas bajas la capacidad de la batería disponible se reduce, y las altas temperaturas pueden dañar la batería, acortando su vida útil.

### 3.3 ESQUEMA INTERNO DE UNA BATERÍA

Las baterías eléctricas están formadas principalmente por los siguientes elementos:

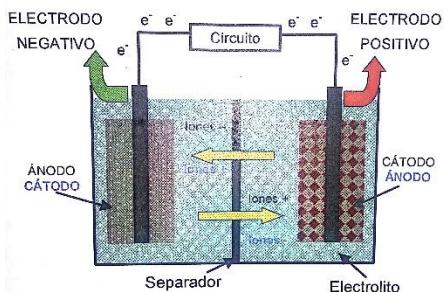


Figura 1. Esquema interno de una batería. [1]

**Depósito:** Recipiente que contiene a todos los elementos internos de la batería.

**Placas:** Las placas tienen como objeto aprisionar en los innumerables agujeros que tiene su plancha de plomo (en el caso de baterías plomo-ácido) la materia activa desprendida por la conversión de la energía eléctrica en química. El número de agujeros de las placas es distinto en las positivas que en las negativas debido a la diferente naturaleza de la materia que se adhiere a cada una de ellas. Cuantas más placas tenga una batería mayor capacidad.

**Separadores:** Elementos aislantes que se interponen entre dos placas para evitar que estas tengan entre sí el más leve contacto, lo que ocasionaría el mal funcionamiento de la batería.

**Electrodo:** Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica. Los electrodos positivo y negativo suelen denominarse ánodo y cátodo, a no ser la batería sea recargable. En ese caso, cuando la celda está siendo cargada, el ánodo se convierte en el electrodo positivo (+) y el cátodo en el negativo (-), y cuando la celda está siendo descargada el ánodo es el negativo (-) y el cátodo el positivo (+).

**Electrolito:** Material en la que se encuentra entre los 2 electrodos. Permite la trasferencia de electrones entre el ánodo y el cátodo.

### 3.4 ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de una batería está basada en una reacción redox (reducción-oxidación), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida ( pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones).

Existen diferentes tecnologías de baterías. Las más destacables son las baterías secundarias, es decir, aquellas que permiten ser cargadas y descargadas, puesto que en ellas la transformación de energía química en eléctrica es reversible. Este tipo de baterías también son conocidas como acumuladores.

De las baterías secundarias destacan las de plomo-ácido, níquel-cadmio, ion-litio, polímero-lítio, redox-vanadio y zebra. El presente trabajo se centra en las baterías de plomo-ácido, puesto que esta tecnología es utilizada en el banco de baterías de la microrred.

Las baterías plomo ácido son una de las más utilizadas en la actualidad debido a ser una tecnología madura, de bajo coste y de rápida disponibilidad. No obstante, tienen desventajas como la baja energía y potencia específica y un ciclo de vida relativamente corto. Estas desventajas hace que otras tecnologías como las de ion-litio estén comenzando a popularizarse en el mercado.

Los baterías plomo-ácido se pueden clasificar según la tecnología de fabricación empleada, destacando 2 tipos: Las baterías de electrolito líquido y las selladas. Las baterías de electrolito líquido se caracterizan por tener orificios de acceso a su interior con tapones removibles, los cuales permiten la verificación del nivel y gravedad específica del electrolito, la eventual reposición del agua perdida, y que los gases producidos en su interior pueden escapar a la atmósfera. Invariablemente, el electrolito en estas baterías se encuentra en estado líquido. Las baterías selladas o reguladas por válvula (VRLA) el escape de los gases producidos por la electrólisis del electrolito es controlado automáticamente por una válvula sensitiva a la presión. Como su propio nombre indica, estas selladas, teniendo algunas ventajas sobre las abiertas, como la ausencia de fugas de electrolito, mínima emisión de gases, nula posibilidad de contaminación del electrolito y bajos requerimientos de mantenimiento. Por el contrario, presentan limitaciones tales como un menor número de ciclos, la imposibilidad de reponer el agua perdida por exceso de sobrecarga, la imposibilidad de verificar en forma confiable su estado de carga, y en algunos casos su mayor sensibilidad a la temperatura de operación.

En las baterías plomo-ácido el electrolito es ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) disuelto en agua ( $H_2O$ ). Además uno de los electrodos es de plomo ( $Pb$ ), mientras que el otro es dióxido de plomo ( $PbO_2$ ).

Al disolverse en agua, cada molécula de ácido sulfúrico se disocia en un ión sulfato negativo (anión) y dos iones hidrógenos positivos (cationes). El anión es negativo debido a los dos electrones que tomó de los dos átomos de hidrógeno. Como cada átomo de H solo contaba con un electrón, resulta positivo por la falta de un electrón.

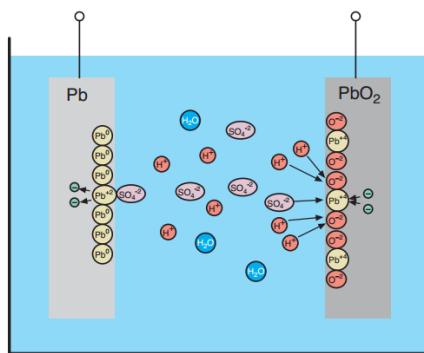
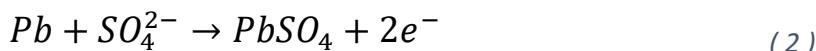


Figura 2. Funcionamiento de una batería.  
 Recuperado de [egresadoselectronicaunc.blogspot.com.es](http://egresadoselectronicaunc.blogspot.com.es)

## DESCARGA

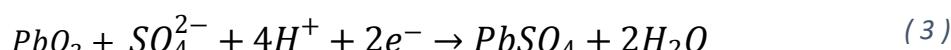
Durante la descarga, en el electrodo de plomo se produce la siguiente reacción:



Cuando los iones sulfato del electrolito se aproximan a los átomos neutros de plomo lo ionizan positivamente haciendo que pierda dos electrones, que van a quedar dentro del electrodo. El ión sulfato (-2), atrae electrostáticamente al ion Pb (+2) y forman una molécula de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ), mediante un enlace iónico entre ambos.

El resultado es que se forma una capa de sulfato de plomo sobre la superficie del electrodo de plomo y que los electrones que se liberan en el interior del plomo, hacen que este electrodo resulte negativo.

En el caso del electrodo de óxido de plomo:



Los iones cargados de sulfato (-2) e hidrógeno (+) se aproximan a la molécula de dióxido de plomo (netamente descargada), ionizándola, dando dos iones O (-2), que se unirán con iones de H(+), dando dos moléculas de agua y un ión Pb (+4), al que le sobra carga positiva para unirse con el ión  $\text{SO}_4$  (-2), es decir, necesitará extraer dos electrones del electrodo para ser compatible y resultar  $\text{Pb}(+2)$ , pudiendo así unirse mediante un enlace electrostático (iónico). Al ser extraídos estos dos electrones del electrodo, este queda con una carencia de dos electrones, o sea dos huecos positivos. Por tanto el electrodo queda cargado positivamente.

Por tanto, al poseer 2 electrodos con carga de signo contrario se produce una transferencia de electrones, dando lugar a una corriente eléctrica saliente en la batería.

Durante el proceso, de descarga la densidad del electrolito disminuye linealmente, pudiendo ser estudiada para determinar el SOC de la batería. Esto es debido a que ambos electrodos transforman el material activo en sulfato de plomo, consumiéndose el electrolito.

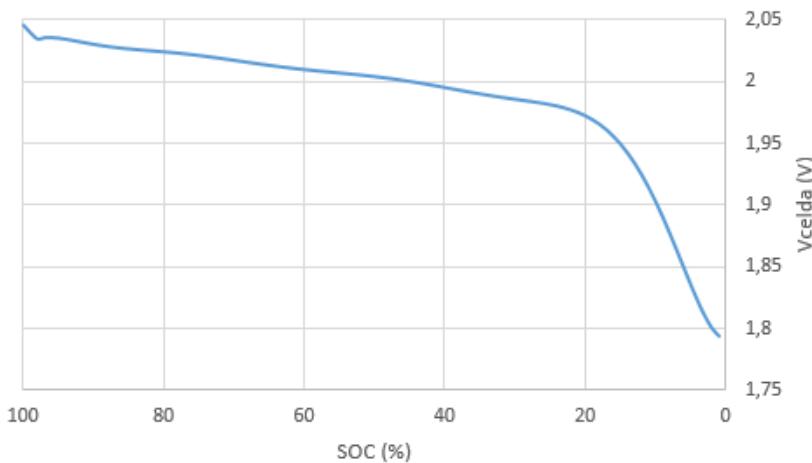


Figura 3. Evolución de la tensión de una celda vs al SOC en un ensayo descarga de  $I=30\text{A}$ .

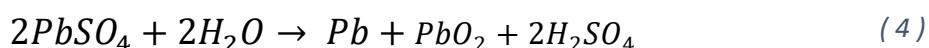
Puede observarse en la figura 3 como en las baterías de plomo-ácido no existe una tendencia lineal de la tensión de una celda con el estado de carga. A partir 20% la tensión comienza a caer rápidamente. La evolución de la tensión en función del estado de carga depende de varios factores, como la corriente, la temperatura o el estado de salud de la batería. Otras baterías de diferente tecnología, como las ion-litio, sí que tienen una tendencia más lineal entre la tensión y el SOC.

### CARGA

Durante el proceso de carga, se almacena la energía eléctrica en forma de energía química.

En este caso el sulfato de plomo se plomo de los electrodos se transforma en plomo en el electrodo negativo y en óxido de plomo en el positivo.

La reacción es la siguiente:



En la figura 4 se muestra la evolución de la tensión en un ensayo de carga a 30 A de unas baterías de plomo ácido VRLA.

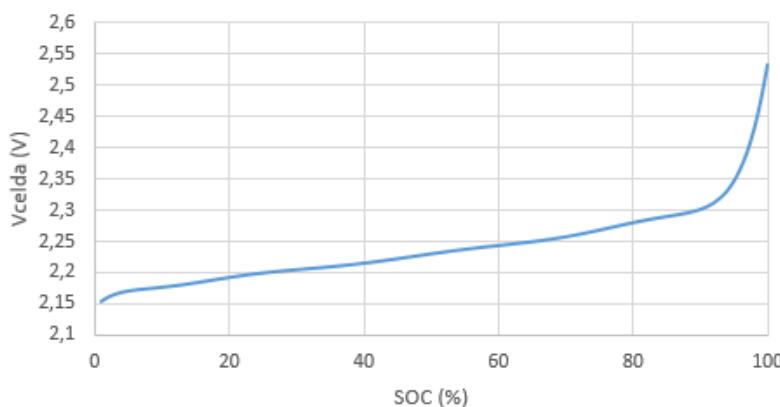


Figura 4. Evolución de la tensión de una celda frente al SOC en un ensayo carga de  $I=30A$ .

Del mismo modo que en descarga, en baterías de plomo-ácido tampoco aparece una dependencia lineal de la tensión de la celda con el estado de carga (ver figura 4).

La carga o descarga de las baterías tiene un rendimiento. No toda la energía empleada para la carga de una batería se transforma en energía química. Del mismo modo ocurre en descarga. Durante el proceso de carga/descarga se producen pérdidas. El aumento de corriente favorece a un aumento de pérdidas en la batería, en cambio la temperatura favorece a las reacciones y se reducen las pérdidas. En el apartado 3.4 detalla las pérdidas que pueden darse en una batería.

### CIRCUITO ABIERTO/AUTODESCARGA

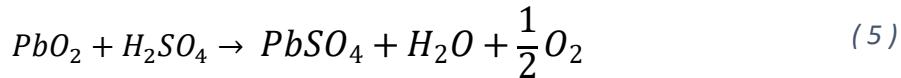
Cuando la batería se encuentra en circuito abierto la batería no absorbe ni suministra corriente.

En este estado, el plomo y el óxido de plomo son inestables termodinámicamente la disolución de ácido sulfúrico, por lo que la materia activa de los electrodos reacciona con el electrolito. Este fenómeno es conocido como autodescarga.

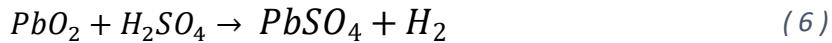
La autodescarga se ve influenciada principalmente por dos factores: la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura.

A continuación se muestran las reacciones producidas en los electrodos:

1. Electrodo positivo



2. Electrodo negativo



Típicamente en baterías plomo-ácido de calidad la autodescarga suele encontrarse en torno a un 3% mensual.

### 3.5 PERDIDAS DE UNA BATERÍA

Existen varios fenómenos que provocan perdidas en la batería, de los cuales se destacan los más relevantes:

- **Pérdidas óhmicas:** Oposición al flujo de electrones e iones de los diferentes elementos que componen las baterías. La dependencia con la corriente de este fenómeno es lineal.
- **Pérdidas de activación:** Refleja la dificultad para que tenga lugar la reacción entre la materia activa de la batería. La materia activa disponible varía en función del estado de carga, y por tanto las pérdidas por activación también. Estas pérdidas dependen logarítmicamente con la corriente.
- **Pérdidas de concentración:** Conforme se produce la descarga la materia activa se va agotando y existe una mayor dificultad para que los reactivos alcancen el lugar de la reacción, por tanto, estas pérdidas también dependen del estado de carga y de la corriente.

La corriente y el estado de carga influyen en el rendimiento de la batería. A mayor corriente, mayores pérdidas, y por tanto el rendimiento será menor. Además, en carga conforme aumenta el SOC en rendimiento es cada vez menor, debido principalmente a un fenómeno no comentado anteriormente, el fenómeno gaseo de la batería, el cual hace que a altos valores de SOC la corriente no se invierta en la formación de materia activa. [1]

En la figura 3 del apartado 3.4 se observaba como, en un ensayo de descarga, la tensión de la celda variaba en función del estado de carga. A altos valores de SOC (aproximadamente por encima del 90%) las pérdidas predominantes son las de activación. Entre el 90% y el 20% (aproximadamente) las pérdidas predominantes son las óhmicas, y por debajo del 20% predominan las pérdidas por concentración.

### 3.6 PROCESOS DE DEGRADACIÓN

Los procesos de degradación son aquellos que afectan al estado de salud (SOH) de la batería. Principalmente destacan la estratificación, la sulfatación y la corrosión.

#### ESTRATIFICACIÓN

Ya se ha comentado que el electrolito cambia de densidad según el SOC de la batería. No obstante, puede ocurrir que el electrolito reaccione de manera no uniforme provocando un gradiente de densidad entre la parte superior e inferior de la batería. Este gradiente puede provocar que la batería comience a descargarse en la parte inferior, provocando cambios irreversibles en la batería. Este fenómeno es conocido como estratificación.

#### SULFATACIÓN

En descarga el Pb y el PbO<sub>2</sub> de los electrodos se transforman en PbSO<sub>4</sub> y en carga los cristales del PbSO<sub>4</sub> se convierten Pb y PbO<sub>2</sub> nuevamente. Sin embargo, no siempre todos los cristales de sulfato se convierten el plomo y óxido de plomo, y por tanto, no se produce un aumento de capacidad. Este fenómeno se conoce como sulfatación.

El tamaño de los cristales depende de la corriente, a mayor corriente menor tamaño. Si la batería no se carga rápidamente tras la descarga, los cristales pueden crecer de tamaño produciéndose una recristalización.

Como consecuencia de la sulfatación, las baterías alcanzan antes la tensión máxima de carga aunque no se haya completado la carga, y por tanto la energía almacenada disminuye.

## CORROSIÓN

En caso de que se produzca una sobrecarga, la rejilla de la batería se corroe. En el proceso de corrosión se forman unos depósitos en el fondo de las celdas, provocando una perdida irreversible de capacidad.

Además, puede dar el caso de que se corroan los terminales, produciéndose un aumento de la resistencia óhmica.

## ENVEJECIMIENTO

Con el tiempo, todas las baterías pierden la capacidad de acumular carga, ya que con cada descarga se pierde algo de material activo. Sin embargo, la vida útil de las mismas puede ser prolongada si se las mantiene cargadas, no se sobrecargan ni descargan en exceso, permanecen en un lugar que no sufre temperaturas extremas, no son sometidas a cortocircuitos, y se reemplaza el agua destilada que pierden.

## 4. MODELADO DE UNA BATERÍA

El modelado de la batería es un conjunto expresiones matemáticas que tienen el objetivo de reflejar las características de las baterías reales, y pueden utilizarse para predecir su comportamiento bajo distintas condiciones como en carga y en descarga.

En la actualidad existen diferentes maneras de modelar una batería, puesto que cada una tiene sus ventajas y desventajas. Se pueden clasificar en 3 tipos:

1. **Modelos Lookup Table:** Los modelos lookup table (tabla de búsqueda) son aquellos métodos que establecen una relación directa entre el SOC y una medición física. Destacan los métodos OCV, impedancia interna y la densidad del electrolito.
2. **Modelos Físicos:** Basados en la definición de SOC. Buscan una relación entre la concentración disponible y la máxima del material activo en el ánodo. El contador amperios hora de Coulomb es el más conocido y uno de los más utilizados.
3. **Modelos de regresión estadística:** Relación lineal o no lineal del SoC con las entradas sin tener una interpretación física. Los más destacados son las redes neuronales.

Dentro de los modelos físicos se encuentran los modelos eléctricos. En ellos mediante circuitos eléctricos se modelizan las reacciones químicas que se dan en una batería. Para ello utilizan elementos eléctricos tales como resistencias y condensadores. En modelos de este tipo, no se suelen separar los procesos que tienen lugar en cada electrodo. Uno de los modelos eléctricos más utilizados, especialmente por su sencillez, consiste una resistencia en serie constante junto con una fuente de tensión ideal. Existen otros modelos basados en este los cuales establecen la resistencia en función del estado de carga. No obstante, en el apartado 5 se profundiza más sobre el modelado de una batería mediante circuitos eléctricos.

### 4.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL SOC

Los métodos de estimación son aquellos que pretender determinar el SOC de una batería. Existen multitud de métodos, cada uno con sus pros y contras, muchos pueden combinarse con otros para mejorar la estimación. A continuación, se comentan los métodos más significativos.

## **1. PRUEBA DE DESCARGA**

Se trata de un método que consiste en cargar y descargar la batería bajo condiciones controladas (a corriente constante, temperatura controlada etc). Sin embargo, este tipo de pruebas normalmente requieren demasiado tiempo para efectuarse, lo cual hace a esta técnica imposible de aplicar fuera del laboratorio. Además, mientras se efectúa la prueba se interrumpe la operación de los componentes alimentados por la batería.

## **2. MEDIDA DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA**

La relación entre la densidad del agua y la de una sustancia electrolítica desciende linealmente con la descarga de la celda de batería. Por tanto, midiendo la densidad del electrolito se puede conocer el SOC.

La principal ventaja de este método es que es de los más precisos. Sin embargo, es necesario acceso al electrolito interno de la batería y no puede implementarse online, puesto que es necesario esperar varias horas antes de poder realizar la medición.

## **3. MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO**

Al igual que la densidad del electrolito, el voltaje de circuito abierto de una batería de plomo-ácido varía linealmente con el estado de carga. Este método es particularmente útil en aplicaciones que implican largos períodos de descanso para la batería, puesto que es necesario esperar varias horas antes de realizar la medición. En aplicaciones más dinámicas, el voltaje de circuito abierto se usa para complementar alguna otra técnica que determine el estado de carga.

## **4. IMPEDANCIA INTERNA**

Con los ciclos de carga y descarga, la composición de los componentes químicos internos a una celda cambian y esto deriva en una variación de la impedancia interna. Por tanto, estudiando la impedancia interna es posible conocer el SOC.

Existen dos métodos para conocer la impedancia interna: los métodos activos y pasivos: Los métodos activos excitan la batería con una señal AC, siendo necesario desconectar la batería del sistema para determinar el SOC. A diferencia de los activos, los métodos pasivos buscan un impulso del perfil actual, por lo que la batería puede funcionar con normalidad.

La principal ventaja de estos métodos es su precisión, pero presentan dos grandes desventajas: son difíciles de medir y tienen una gran dependencia con la temperatura.

## **5. ESTIMACIÓN BASADA EN EL VOLTAJE**

Relación directa entre el voltaje actual de la batería y la capacidad disponible de la misma. Es muy sencillo de implementar y es de gran utilidad para determinar el estado de carga total o la descarga inminente. Sin embargo, el comportamiento no lineal de la tensión de la batería hace que sea poco preciso, siendo inservible para calcular el SOC en estados intermedios. Por ello suele ser habitual complementarlo con otros métodos de estimación.

## **6. ESTIMACIÓN BASADA EN LA INTENSIDAD**

También conocido como contador amperios-hora de Coulomb (*Coulomb Counting*). El método consiste en integrar la intensidad suministrada y absorbida de la batería.

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta}{C} \cdot \int_{t_0}^t I(t) \cdot dt \quad (7)$$

Donde:

$SOC_0$ : Estado de carga inicial  
 $\eta$ : Rendimiento de la batería  
 $I(t)$ : Corriente de la batería

$t_0$ : instante inicial  
 $SOC$ : Estado de carga  
 $C$ : Capacidad de la batería

Se trata de un método fácil de implementar y preciso, y es una de las maneras más prácticas de estimar el SOC en baterías de plomo-ácido selladas, puesto que básicamente lo que realiza es un balance energético.

Presenta varios inconvenientes, como que es necesario conocer el SOC inicial, además el error de estimación aumenta con el tiempo, principalmente debido al envejecimiento, a reacciones no deseadas y a errores de lectura o precisión del sensor de corriente. Por ello es conveniente combinarlos con otros métodos de estimación.

## **7. REDES NEURONALES**

Una red neuronal es un conjunto de modelos matemáticos complejos capaces de adaptarse y aprender de su medio ambiente, pudiendo encontrar soluciones a problemas. En otras palabras, pueden descubrir relaciones entre las variables de entrada y salida.

Las ventajas más importantes son que no dependen del tipo de tecnología y aprenden del medio. Por otro lado, las desventajas más destacables son que necesitan grandes cantidades de datos históricos del sistema para funcionar correctamente, y además se trata de una tecnología todavía en desarrollo. No obstante, es uno de los métodos más prometedores a medio-largo plazo.

## **8. COMBINACIÓN DE TÉCNICAS**

Los métodos descritos anteriormente pueden combinarse entre sí, mejorando la estimación.

## 4.2 ESTADO DEL ARTE

La métodos utilizados para el calculo del estado de carga son muy variados. En el presente apartado se ha realizado una investigación por diferentes bases científicas sobre la determinación del SOC en baterías plomo-ácido. En concreto esté estudio se centrará en modelos físicos en los que la bateria sea caracterizada mediante circuitos eléctricos.

F. Codecà [2] y Jana Kalawoun [3] proponen el cálculo del SOC en algoritmo de SOC basado en el contador de coulomb complementado mediante la estimación de la tensión en bornes de la batería.

Ambos implementan un modelo de batería denominado como “Modelo Randle de 2º orden”, el cual se detalla a continuación.

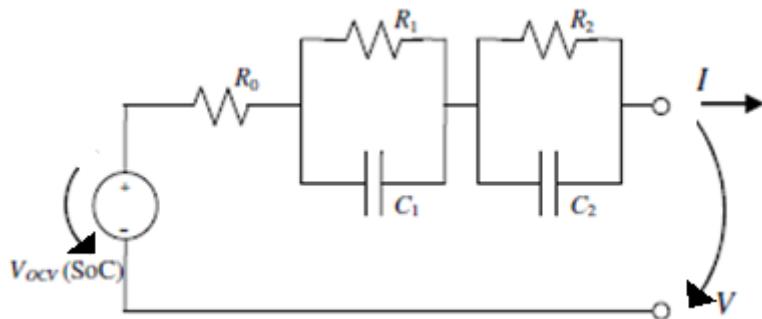


Figura 5. Modelo Randle de 2º orden [2]

Donde:

$V_{oc}$ : Tensión de circuito abierto

$R_0$ : Resistencia interna

$R_1, R_2, C_1, C_2$ : Resistencias y condensadores para el modelado dinámico de la celda

$V$ : tensión en bornes

$I_{bat}$ : Corriente de la batería

SOC: Estado de carga

Se observan que las componentes del modelo no dependen del estado de carga exceptuando  $V_{oc}$ , la cual es expresada mediante una función donde SOC es la entrada. Dicha función ha sido determinada mediante ensayos.

Mediante la transformada de Laplace determinan la relación entre  $V$  y  $V_{oc}$ :

$$V = V_{oc}(SoC) - \left( R_0 + \frac{R_1}{1+sR_1C_1} + \frac{R_2}{1+sR_2C_2} \right) I \quad (8)$$

Para obtener las diferentes resistencias y condensadores del modelo es necesario un caracterizado de las células de la batería mediante los ensayos pertinentes.

El algoritmo que proponen F. Codecà [2] y Jana Kalawoun [3] realiza una mezcla entre el contador Ah de Coulomb y el método basado en el modelo anterior, el cual estima la tensión en bornes de la batería y la compara con la real, obteniendo un error que servirá para corregir el SoC.

El esquema del algoritmo es el siguiente:

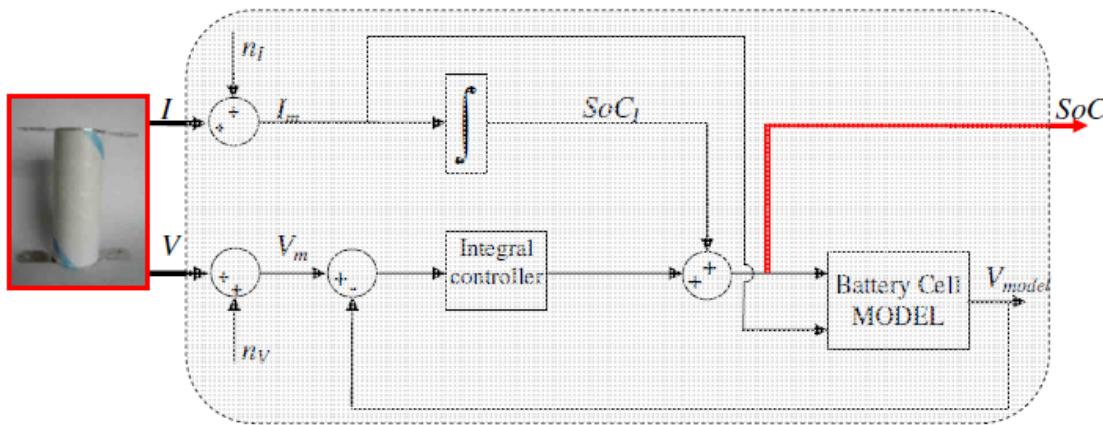


Figura 6. Estimación del SoC mixta [2]

El funcionamiento del algoritmo se refleja a continuación:

1. La tensión y corriente de la batería es medida mediante unos sensores.
2. La corriente se integra mediante el contador de coulomb y se obtiene una primera aproximación del estado de carga denominada  $SOC_1$ .
3. Un controlador en lazo cerrado corrige el  $SOC_1$  comparando la tensión estimada con la tensión medida, la cual es la referencia del sistema.
4. El SOC del instante anterior, la tensión y la corriente medida son las entradas del sistema.

$n_V$  y  $n_I$  son el número de celdas en serie y el número de ramas en paralelo de la batería.

Para ello, mediante el modelo de la batería, cuyas entradas son  $SOC_1$  y la corriente, se obtiene la tensión estimada  $V_{model}$ , la cual es comparada con la tensión medida, obteniendo un error. F. Codecà [2] apuesta por controlador integral (Figura 6) cuya salida proporciona el incremento que debe añadir al  $SOC_1$  para corregir la desviación propia del contador de Coulomb. Sin embargo, Jana Kalawoun [3] decide que un controlador proporcional es suficiente.

El algoritmo propuesto destaca por ser fácil de implementar, así como que es capaz de corregir los errores del contador Ah debidos al ruido propio del sensor o una mala estimación del estado de carga inicial de la batería. Sin embargo, el modelo se basa en que el SOC real se alcanzará cuando el error entre la tensión medida y la estimada sea cero, cosa que no es cierto, puesto que esto depende de la precisión del modelo de estimación de la tensión del batería.

Otro modelo es el propuesto por Martin Coleman [4], el cual está basado en el contador Amperios-hora. El SOC se determina midiendo la tensión en bornes, la carga y la resistencia interna, mitigando la desventaja de utilizar sólo la impedancia.

A continuación se muestra el modelo de la batería propuesto por Coleman [4]:

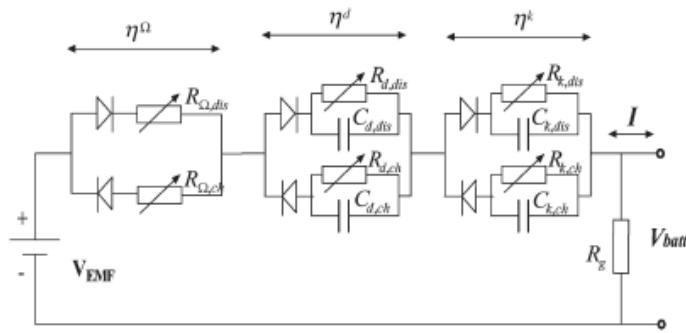


Figura 7. Modelo propuesto por Coleman [4]

Se trata de un modelo bidireccional según el sentido de la corriente, por tanto el modelo es diferente según nos encontremos en carga o en descarga.

La EMF (fuerza electromotriz) se predice cuando la batería se encuentra en condiciones de carga, y acto seguido se determina el SOC.

Se observan 3 zonas claramente diferenciadas:

1.  $\eta_\Omega$ : Sobre potencial óhmico durante la carga/descarga.
2.  $\eta_d$ : Sobre potencial por el proceso de difusión.
3.  $\eta_k$ : Sobre potencial cinético. Debido a la reacción que forma sulfato de plomo.

Estos sobrepotenciales se pueden modelar mediante una resistencia si se asume que la temperatura es constante [4], pudiendo obtener la relación entre la fuerza electromotriz y la tensión en bornes de la batería:

$$V_{EMF} = V_{Batt} + \eta^\Omega + \eta^d + \eta^k \quad (9)$$

$$V_{EMF} = V_{Batt} + (R_\Omega + R_d + R_K)I \quad (10)$$

$$Z = R_\Omega + R_d + R_K \quad (11)$$

$Z$  es la impedancia de la batería, la cual mediante ensayos es normalizada en función de la capacidad y el estado de carga.

Finalmente, establece que existe una relación entre  $V_{EMF}$  y el SOC:

$$V_{EMF} = SOC \cdot A_{SOC} + EMF_{min} \quad (11)$$

Donde SOC es el estado de carga,  $A_{SOC}$  es la pendiente y  $EMF_{min}$  la fuerza electromotriz cuando el SOC es cero.

$$SOC = \frac{V_{EMF} - EMF_{min}}{A_{SOC}} \quad (12)$$

Otro método interesante propuesto por Coleman [4] es determinar una relación directa entre la tensión en bornes y el estado de carga de la batería.

Para ello, primeramente realiza ensayos de baterías VRLA de 12V, con diferentes capacidades para una corriente descarga  $I=17.2A$

El método propuesto por Coleman divide la curva tensión en 2 zonas diferenciadas, tal y como se puede observar en la figura 8:

1. Región lineal: propia de estado de carga altos.
2. Región hiperbólica: propia de estado de carga bajos.

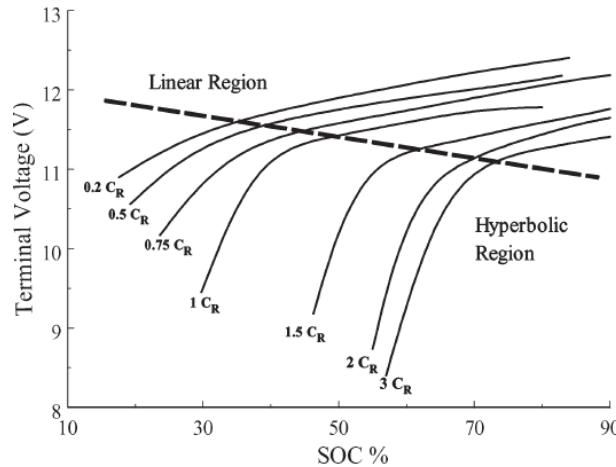


Figura 8. Relación V vs SOC [1]

Puede observarse que según la capacidad de la batería la transición entre regiones ocurre a diferente estado de carga. Pero el método solo es válido si la corriente es 17,2 A, por lo que es necesario realizar ensayos a diferentes corrientes a modo de poder obtener el estado de carga en función de la tensión y la corriente.

Otro modelo utilizado para el cálculo del estado de carga es el “Modelo Thevenin”. El modelo Thevenin considera la batería como una fuente de tensión ideal con una resistencia interna [5].

El esquema del modelo se muestra a continuación en la figura 9:

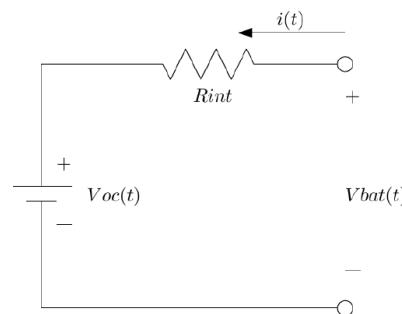


Figura 9. Modelo Thevenin teórico [5]

$$V_{bat}(t) = V_{oc}(t) + R_{int} \cdot i(t) \quad (13)$$

Este método no tiene en cuenta la temperatura ambiente, la supone constante e igual a 25°C.

Montenegro [5] propone el cálculo del SOC mediante el contador Ah de Coulombios y el modelo Thevenin, para ello introduce  $V_{oc}(t)$  en el contador. Puede observarse como la inclusión de  $V_{oc}(t)$  en el contador Ah no es muy común.

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{SOC_m} \cdot \int_0^t \frac{i(t) \cdot V_{oc}(t)}{3600} \cdot dt \quad (14)$$

donde:

$SOC_0$ : Estado de carga inicial (%)  
 $SOC_m$ : Máxima energía de la batería [Wh]  
 $I(t)$ : Corriente de la batería (A)

$V_{oc}$ : Tensión en circuito abierto (V)  
 $SOC$ : Estado de carga (%)

$SOC_m$  es obtenido multiplicando el voltaje nominal (V) por la capacidad nominal (Ah).

Para el cálculo de  $V_{oc}$ , se establece una relación directa lineal con el SOC.

En el caso de descarga:

$$V_{oc}(t) = (2 + 0,148 \cdot \beta) \cdot n_s ; \beta = \frac{SOC(t)}{SOC_m} \quad (15)$$

donde  $n_s$  es el número de celdas en serie de la batería.

En el caso de carga:

$$V_{oc}(t) = (1,926 + 0,124 \cdot \beta) \cdot n_s \quad (156)$$

Para poder calcular la tensión en la batería, supone que la resistencia interna es constante. Tomar la resistencia como constante supone un error en la estimación bastante considerable.

Uno de los problemas de este método es que considera que todos los elementos del modelo son constantes, cuando ya se ha visto que el estado de carga influye en las perdidas de la batería. Una de las soluciones a este problema es hacer que la resistencia dependa del estado de carga. Por ello Mahmud [6] decide realizar la siguiente modificación:

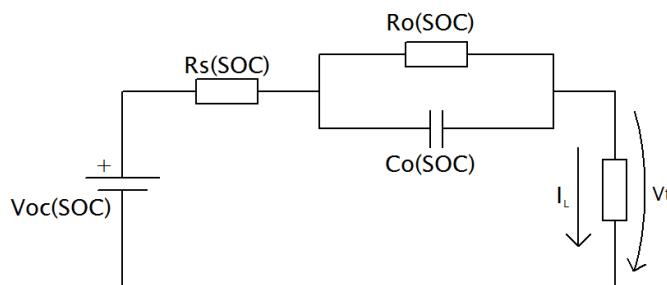


Figura 10. Modelo Thevenin de Mahmud [6]

Donde

$V_{oc}$ : Tensión de circuito abierto  
 $R_s$ : Resistencia en paralelo  
 $R_o$ : Resistencia en serie

$V_t$ : tensión en bornes  
 $I_L$ : Corriente de la batería

Mahmud [6] propone el cálculo de la tensión en bornes mediante la caracterización de  $V_{oc}$ ,  $R_s$ ,  $R_o$  y  $C_o$ , para las cuales ha determinado experimentalmente que todas ellas tienen dependencia lineal con el estado de carga. Este último aspecto no es aconsejable para baterías plomo-ácido debido a la no linealidad entre la tensión en bornes con el estado de carga, siendo más óptimo para baterías ion-litio, donde si se observa cierta linealidad entre el estado de carga y la tensión en bornes.

## 5. DISEÑO DEL ALGORITMO

El objetivo de este apartado es describir e implementar el algoritmo propuesto.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DEL SOC

Una vez recopilada toda la información necesaria se va a proponer un método de estimación del SOC.

Para ello, previamente es necesario conocer el propio sistema: el banco de baterías está formado por 120 celdas de plomo-ácido VRLA colocadas en serie. Se pusieron en funcionamiento en el año 2008, y la capacidad nominal en ese momento era de 300Ah.

Características de cada celda:

- Tecnología: Pb-ácido VRLA selladas
- Tensión nominal: 2 V/celda.
- Tensión de corte: 1.8V/celda.
- Corriente nominal 30A
- Capacidad proporcionada por el fabricante: 300 Ah a  $C_{10}$ . Es decir, es capaz de proporcionar 30 amperios durante 10 horas.

A la hora de elegir el método de estimación se ha de tener en cuenta las siguientes restricciones: las baterías son selladas por lo que los métodos de gravedad específica e impedancia interna no son aplicables. Se disponen de datos de la microrred de un periodo actual, pero únicamente se dispone de datos de la corriente de la batería y la tensión en bornes, los cuales se actualizan cada segundo. También se conoce el estado de carga del “Híbrido”, nombre del algoritmo que actualmente se encuentra en funcionamiento en la microrred.

Se ha optado por la implementación de un algoritmo basado en el contador Ah de Coulomb, y complementado con un lazo cerrado donde se estima la tensión en bornes, con el objetivo de corregir los desvíos propios del contador mediante un controlador proporcional.

En la siguiente figura se muestra el método de estimación:

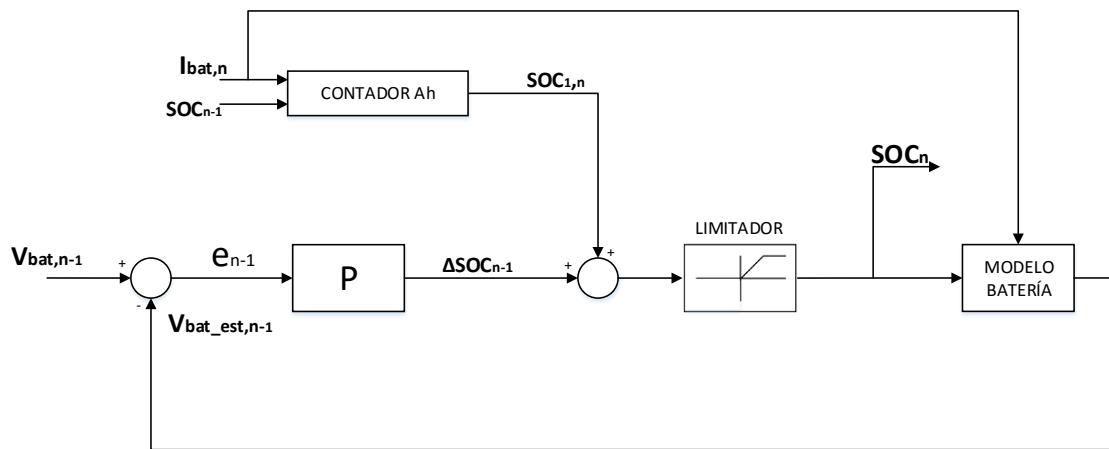


Figura 11. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto

A continuación se explica el funcionamiento de método propuesto en la figura 11: primeramente, la corriente ( $I_{bat}$ ) y el estado de carga del instante anterior ( $SOC_{n-1}$ ) se introducen el contador Ah de Coulombios obteniendo una primera estimación del SOC, denominada como  $SOC_{1,n}$ . El estado de carga definitivo ( $SOC_n$ ) es igual a  $SOC_{1,n}$  más el incremento de SOC obtenido

en el instante anterior ( $\Delta SOC_{n-1}$ ). Para determinar el incremento del estado de carga, se introduce el SOC definitivo y la corriente (ambos del instante anterior) en el modelo de la batería. Dicho modelo estima la tensión en bornes de la batería ( $V_{bat\_est}$ ), la cual es comparada con la tensión medida ( $V_{bat}$ ) obteniendo un error (e). El error es introducido en el regulador proporcional (P), obteniendo el incremento de SOC deseado. Una vez obtenido el SOC definitivo, se calcula la tensión estimada para la siguiente iteración.

La idea principal de este método es utilizar la estimación Coulomb-contando para la SOC estimación básica, y más adelante esta estimación se corrige con una sistema de control de bucle cerrado, que trata de regular la tensión de salida-modelo con el valor de la tensión real medida.

### CONTADOR DE COULOMBIOS

Ya se han comentado las ventajas y desventajas de este método en el apartado 4.1, por lo que a continuación se describe la evolución del rendimiento y de la capacidad en función del estado de carga:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta}{C} \cdot \int_0^t I_{bat} \cdot dt \quad (16)$$

Donde:

$SOC_0$ : Estado de carga inicial

$\eta$ : Rendimiento de la batería

$I_{bat}$ : Corriente de la batería

$SOC(t)$ : Estado de carga en

el instante t.

C: Capacidad de la batería

En cuanto al rendimiento, se ha separado en 2, según si la batería se encuentra en carga o en descarga: en descarga el rendimiento se considera igual 100%, independientemente del SOC. Sin embargo, en carga, cuando el SOC está comprendido entre el 0% y el 80% el rendimiento se considera 100%. A partir del 80% el rendimiento disminuye linealmente hasta 0, que coincide con el instante en el que la batería se encuentra plenamente cargada. En los siguientes gráficos se muestra la evolución del rendimiento según el estado de carga:

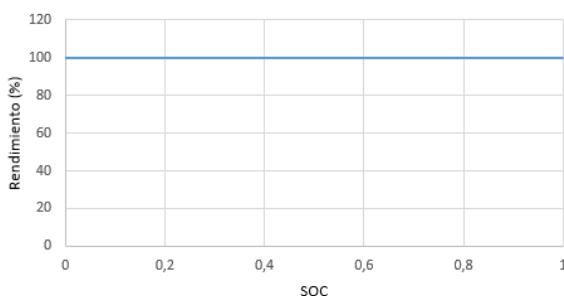


Figura 12. Rendimiento en descarga

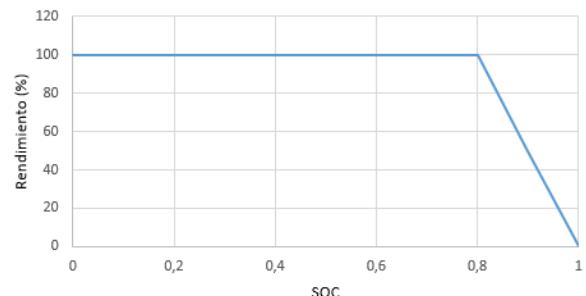


Figura 13. Rendimiento en carga

Por último, la capacidad se ha tomado como 110Ah, tal y como se determina en el apartado 6.2.

### **MODELO DE LA BATERÍA**

Para la estimación de la tensión en bornes de la batería ( $V_{bat}$ ) se ha optado por utilizar el modelo Thevenin, pero modificado con ciertas particularidades. El modelo propuesto es bidireccional, puesto que se ha separado la resistencia según el sentido de la corriente. El convenio de signos elegido considera la corriente saliente de la batería como positiva, es decir, cuando la batería se encuentre descargándose la corriente será mayor a cero. La resistencia, tanto en carga como descarga es dependiente del SOC y de la corriente ( $I_{bat}$ ), tal como se comenta en el apartado 6.3.

Por último en lo que se refiere a este apartado, la tensión de circuito abierto ha sido caracterizada mediante una recta dependiente del estado de carga. A continuación se muestra el esquema del modelo:

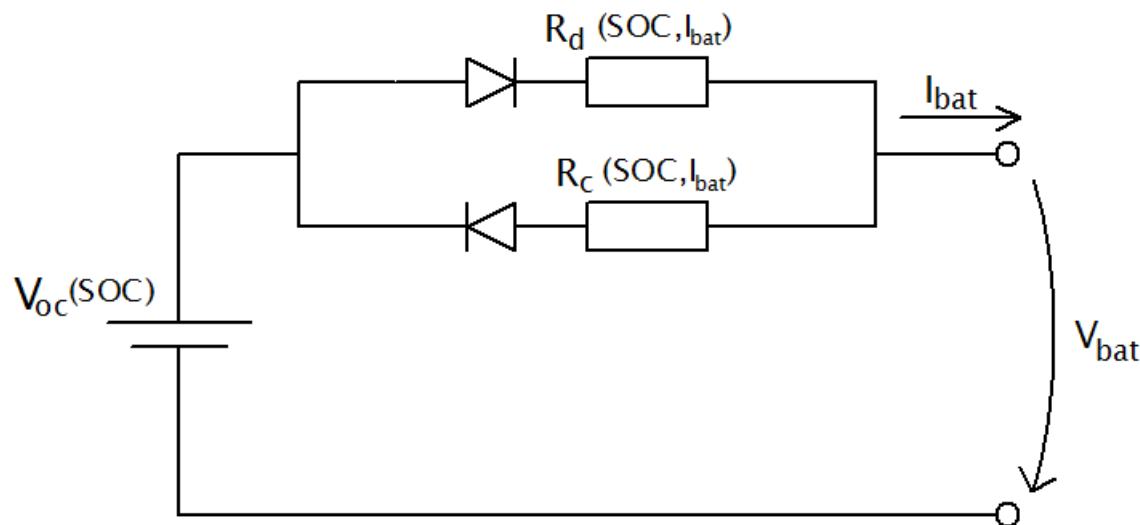


Figura 14. Modelo de batería propuesto

$V_{oc}$ : Tensión en circuito abierto

$R_c$ : Resistencia en carga.

$I_{bat}$ : Corriente de la batería.

$R_d$ : Resistencia en descarga.

$V_{bat}$ : Tensión en bornes.

### **5.2 OBTENCIÓN DE LA CAPACIDAD NOMINAL**

La capacidad nominal de la batería disminuye progresivamente con el tiempo en función del estado de salud. Por ello, es necesario conocer la capacidad actual de la batería, puesto que es muy probable que se haya reducido en los últimos años. Para determinar la capacidad del banco de baterías se dispone de diferentes ensayos de descarga que se realizaron en el año 2012. En concreto se dispone 4 ensayos:

ENSAYOS DE DESCARGA		
Nº ensayo	Fecha	I_descarga
Ensayo 1	17-jul-12	29,5 A
Ensayo 2	18-jul-12	29,5 A
Ensayo 3	22-mar-12	46 A
Ensayo 4	23-mar-12	64 A

Tabla 1. Ensayos de descarga

Consideraciones previas:

1. El rendimiento de la batería en descarga es 1.
2. Al ser un ensayo de descarga, se sabe que el SOC inicial es igual al 100%.
3. Para su determinación, se empleará el contador Ah de Coulombios.

El proceso de obtención de la capacidad es sencillo. Como la corriente es constante, la capacidad será igual a la corriente por el tiempo que tarda la batería en pasar del 100% al 0%.

$$C = I_{bat} \cdot t [Ah] \quad (17)$$

A continuación en la figura 15 se muestran la evolución temporal del estado de carga y de la corriente para los cuatro ensayos mostrados en la tabla 1:

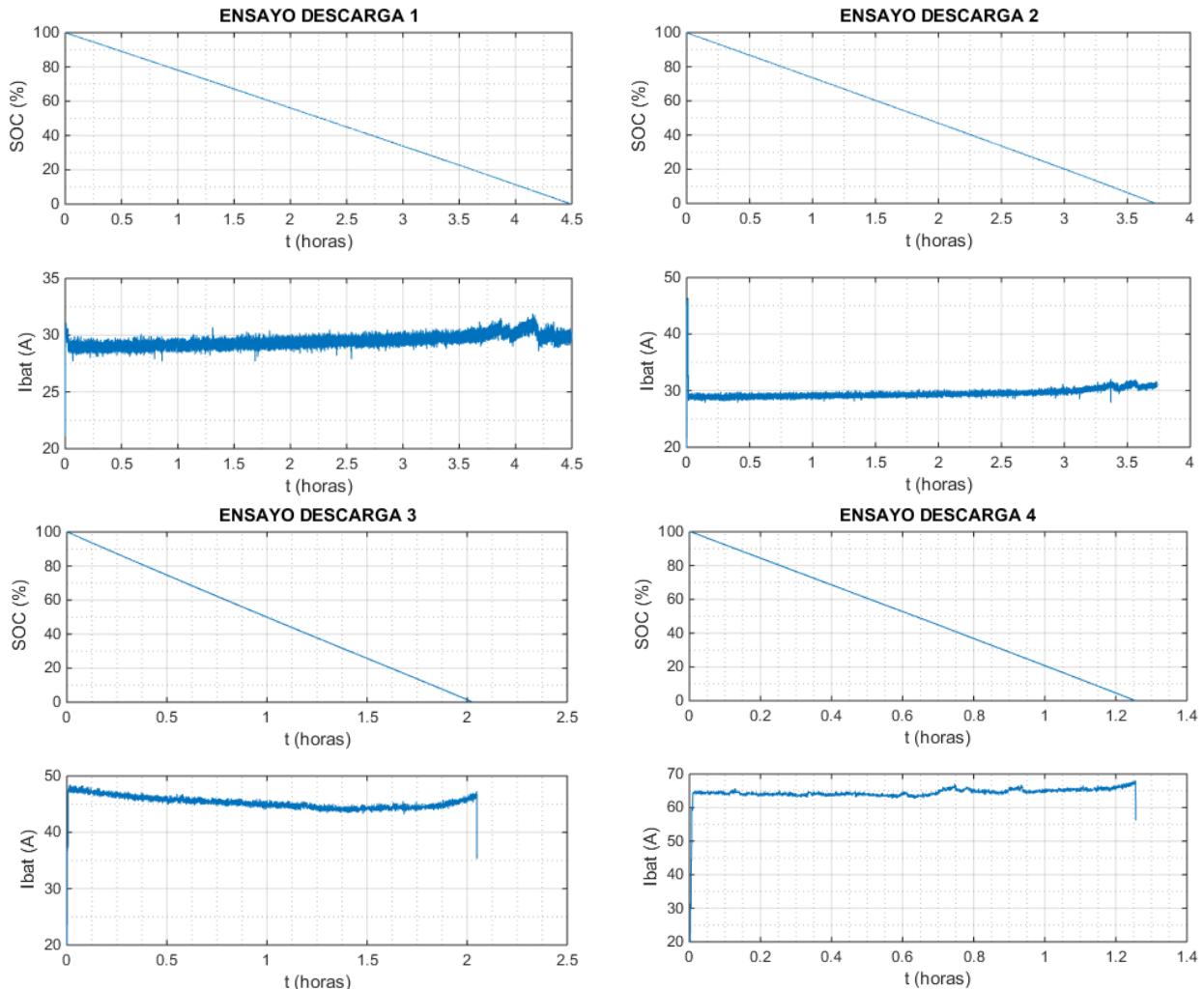


Figura 15. Ensayos de descarga 1, 2, 3 y 4

$$C_1 = I_{bat} \cdot t = 29,5A \cdot 4,5h = 132,68 Ah$$

$$C_2 = I_{bat} \cdot t = 29,5A \cdot 3,75h = 110,69 Ah$$

$$C_3 = I_{bat} \cdot t = 46A \cdot 2,03h = 91,84 Ah$$

$$C_4 = I_{bat} \cdot t = 64A \cdot 1,26h = 80,88 Ah$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2:

ENSAYOS DE DESCARGA			
Nº ensayo	Fecha	I <sub>descarga</sub>	Capacidad
Ensayo 1	17-jul-12	29,5 A	132,68 Ah
Ensayo 2	18-jul-12	29,5 A	110,69 Ah
Ensayo 3	22-mar-12	46 A	91,84 Ah
Ensayo 4	23-mar-12	64 A	80,88 Ah

Tabla 2. Capacidad obtenida en los ensayos de descarga

Según el ensayo se obtienen diferentes capacidades. Esto es debido a que a mayor corriente las reacciones son más superficiales y por tanto menor energía se puede extraer, con lo que conlleva una menor capacidad.

No obstante, se puede observar que en los ensayos 1 y 2 se obtienen diferentes capacidades para la misma corriente. Esta discrepancia es debida al criterio de parada. En una célula el voltaje varía entre 2.3 V (100%) y 1.7 V (0%). Cuando la celda está próxima a descargarse el voltaje medido oscila entre 1.7 V y 1.8 V. Por tanto, es necesario establecer un criterio de parada que indique cuando se debe dejar de extraer energía. La implantación del criterio de parada es complicada y ambigua, por lo que es normal que haya diferencias entre ensayos.

Además, en estos dos ensayos, en los cuales la corriente coincide con la nominal (30 A) se ha obtenido una capacidad algo superior a los 100 Ah, capacidad que dista mucho de los 300 Ah que se disponía en el año 2008. Por tanto, se ha perdido entre un 56% y un 63% con respecto a la capacidad inicial. Finalmente, la capacidad escogida ha sido 110 Ah, correspondiente al ensayo 2.

### 5.3 ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN

Analizando el modelo de estimación de la tensión de la batería, es necesario determinar únicamente 2 parámetros para calcular la tensión: la tensión en circuito abierto y la resistencia, puesto que la corriente es medida y conocida.

#### 5.3.1 Tensión de circuito abierto

La tensión en circuito abierto se ha decidido modelarla mediante una recta dependiente del SOC. Esta recta ha sido obtenida de la tabla de características de una batería de características similares a la de la microrred.

La ecuación resultante se muestra a continuación:

$$V_{oc}(SOC) = n_s \cdot (2,08 - 0,1005 \cdot (1 - SOC)) \quad (18)$$

donde  $n_s$  es el número de celdas en serie del banco de baterías, que en este caso son 120.

La recta de  $V_{oc}$  ha tenido que ser modificada puesto que tal y como se comenta en el apartado 6.3.2 se obtenían valores de resistencia incoherentes a bajas corrientes, por lo que la ecuación final es:

$$V_{oc}(SOC) = n_s \cdot (2,1 - 0,1005 \cdot (1 - SOC)) \quad (19)$$

Se ha modificado el término independiente de 2,08 V a 2,1 V, solventando el problema de las resistencias negativas.

### 5.3.2 Estimación de la resistencia

Una vez conocida la capacidad nominal de la batería, es posible determinar la resistencia de la batería. Como ya se ha comentado, se va a calcular una resistencia para carga ( $R_c$ ) y otra para descarga ( $R_d$ ).

Si  $I_{bat} > 0$

$$R = R_d(SoC) \quad (20)$$

Si  $I_{bat} < 0$

$$R = R_c(SoC) \quad (21)$$

Recordar que:

$$V_{bat} = V_{oc} - R \cdot I_{bat} \quad (22)$$

$$V_{oc} = 120 \cdot (2.1 - 0.1005 \cdot (1 - SOC)) \quad (23)$$

Por tanto, conociendo el SOC, la tensión  $V_{bat}$  y la corriente es posible calcular la resistencia:

$$R = \frac{V_{oc} - V_{bat}}{I_{bat}} \quad (24)$$

Puesto que todavía no se ha diseñado el regulador en lazo cerrado, el SOC se va a calcular mediante el contador Ah de Coulombios.

### RESISTENCIA DE DESCARGA

La resistencia de descarga se puede obtener mediante los ensayos de descarga anteriores. A continuación se va a calcular la resistencia para el ensayo 2, el resto de ensayos pueden ser consultados en el apartado 2.1 del Anexo 1.

En la figura 16 se muestra el estado de carga, la tensión de circuito abierto y de la batería, la corriente y la resistencia frente al tiempo. En la figura 17 se representa la resistencia obtenida en función del SOC.

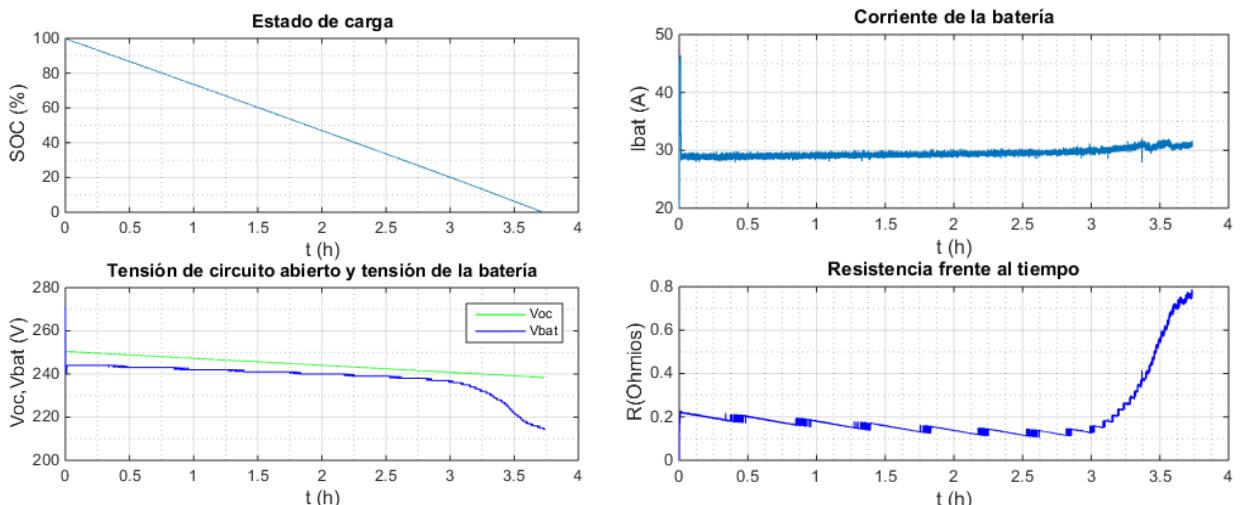


Figura 16. Ensayo de descarga 2

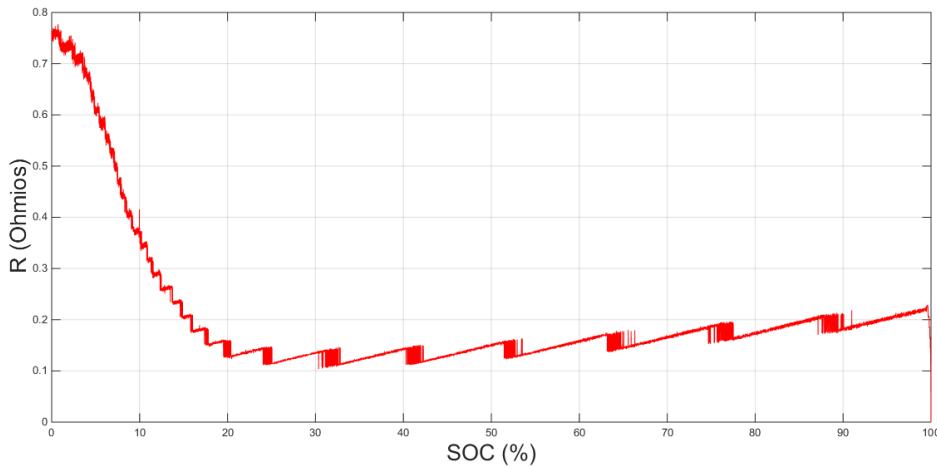


Figura 17. Ensayo 2: Obtención de  $R$  en función del SOC.

Puede observarse tanto en la figura 17 como entre el 20% y el 100% la resistencia se mantiene aproximadamente constante, rondando los  $0.2\Omega$ . A partir de un SOC menor al 20% la resistencia comienza aumentar considerablemente, alcanzando los  $0.75\Omega$ . Este aumento de resistencia es debido a que cuando la batería se encuentra próxima a descargarse las pérdidas aumentan.

Una vez realizados los 4 ensayos, en la figura 18 se representan las 4 resistencias obtenidas en función del estado de carga para realizar una comparativa. En rojo aparece la resistencia correspondiente al ensayo 1, en azul la del ensayo 2, en verde la del ensayo 3 y finalmente en negro la del ensayo 4.

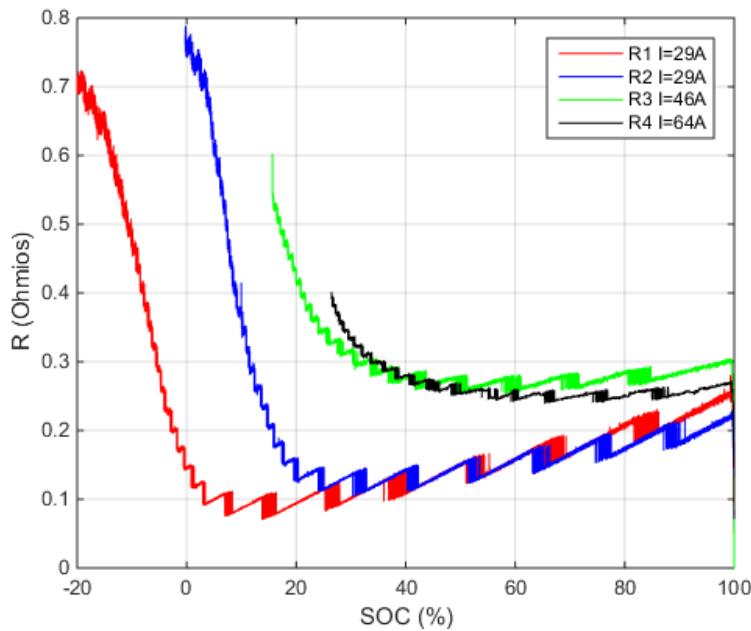


Figura 18.  $R$  vs SOC para los ensayos de descarga.

Al representar las resistencias obtenidas en función del estado de carga, se puede observar en la figura 18 como para la resistencia  $R_1$  se obtienen valores a SOC negativos, y para las resistencias  $R_3$  y  $R_4$  no existen valores para SOC bajos. En cuanto a  $R_1$ , tal como se ha comentado en el apartado 6.2, la capacidad obtenida en este ensayo es igual a 130Ah, mientras que la

capacidad elegida corresponde a la del ensayo 2 (110Ah). Por ello, al poder extraer más energía de la que se ha determinado el SOC obtenido alcanza valores negativos. Justamente ocurre lo contrario en los ensayos 3 y 4, donde las capacidades obtenidas son inferiores a 110Ah debido a que la corriente de los ensayos es superior a la del ensayo 2.

También puede observarse que para un mismo SOC, la resistencia aumenta conforme mayor es la corriente, poniendo de manifiesto que a mayores corrientes, mayores pérdidas.

Se ha decidido tomar como resistencia de descarga ( $R_d$ ) la resistencia media resultante de los ensayos 1 y 2:

$$R_d(SoC) = \frac{R1(SoC) + R2(SoC)}{2} \quad (25)$$

### RESISTENCIA DE CARGA

Para la resistencia en carga únicamente se dispone de un ensayo, el cual ha sido realizado con una corriente de 30 A. Dicho ensayo se muestra a continuación en la figura 19, proporcionando el estado de carga, la tensión de circuito abierto y la de la batería, la corriente y la resistencia frente al tiempo:

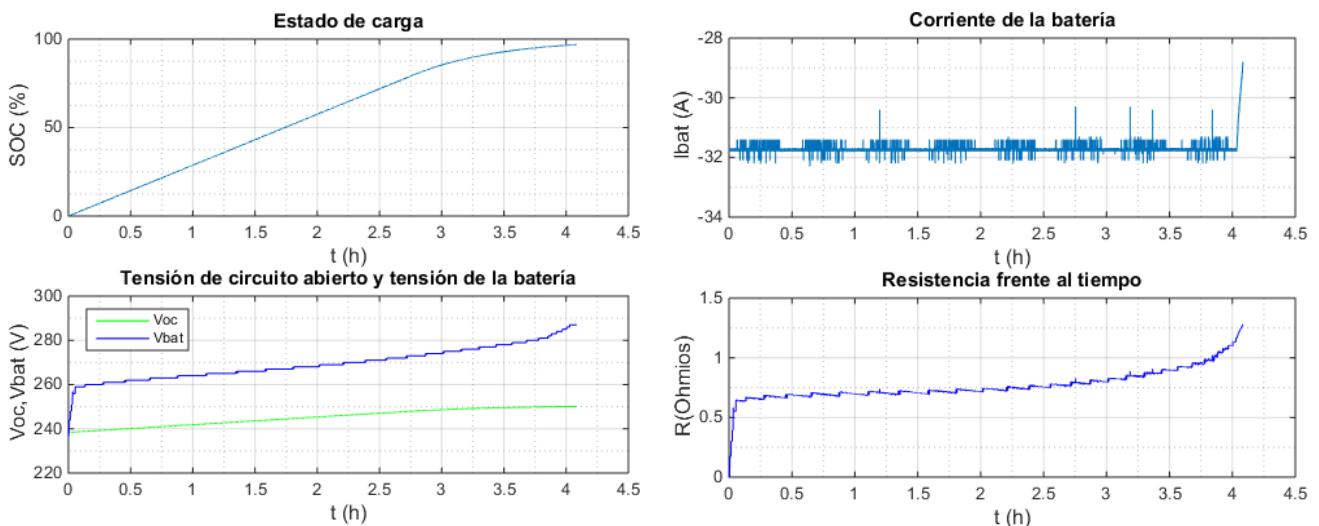


Figura 19. Ensayo de carga

De igual modo que en el ensayo de descarga, en la figura 20 se relaciona la resistencia con el estado de carga. A partir del 80% la resistencia comienza a aumentar su valor notablemente, alcanzando los  $1,2\Omega$ . Esto es debido a que el rendimiento de la batería disminuye conforme la batería se encuentra más cargada. Además, se observa como no se alcanza el 100%, quedándose en el 96%. Cuando la batería se encuentra muy próxima a la carga completa el rendimiento es muy bajo, siendo necesarias varias horas para alcanzar la carga completa. Por ello, no suele compensar la espera y suele ser habitual terminar el ensayo antes. Para SOC inferiores al 80% la resistencia es aproximadamente constante, rondando los  $0,7\Omega$ .

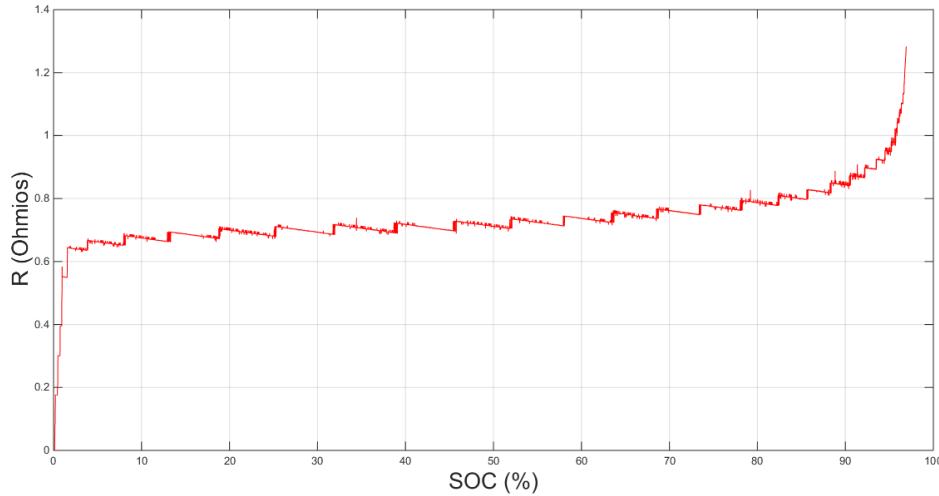


Figura 20. Ensayo de carga: Representación de  $R$  en función del SOC

Finalmente, las resistencias obtenidas tanto en los ensayos de descarga como en carga en función del SOC se muestran en la figura 21. Llama la atención, cómo la resistencia de carga es considerablemente mayor a las de descarga, llegando a triplicar su valor. Se ha dado que las pérdidas en carga son mucho mayores, no obstante, no ocurre siempre que las pérdidas en carga sean mayores, pudiendo ocurrir el caso contrario. Además, el rendimiento en carga que se ha modelizado para éste algoritmo varía en función del estado de carga, tal como se comenta en el apartado 6.1.

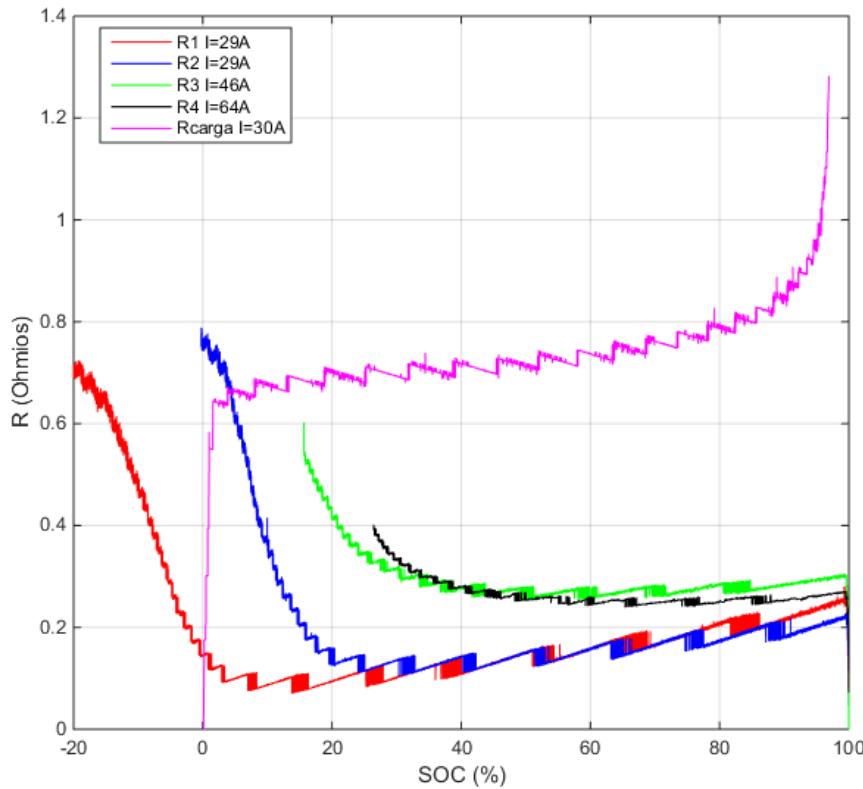


Figura 21.  $R$  obtenidas en los ensayos de carga y descarga en función del SOC.

## **CALCULO DE LA RESISTENCIA INSTANTÁNEA**

Ya se tiene caracterizada la resistencia del modelo. Sin embargo, utilizar la resistencia del apartado anterior tiene varias desventajas. La primera desventaja es que han sido obtenidas a corriente constante, por lo que puede haber diferencias cuando la corriente varíe rápidamente. Otra desventaja es que en todos los ensayos disponibles la corriente es mayor a 20 A, por lo que se desconoce el valor de la resistencia a bajas corrientes. Por ello, se va a calcular la resistencia instantánea sobre diferentes datos semanales en los que estuvo operando la microrred.

Para calcular la resistencia instantánea se presentan varios inconvenientes: como todavía no ha sido caracterizada la estimación de la tensión en bornes, no se dispone de la regulación. Por lo que el estado de carga es calculado mediante el contador amperios hora de Coulombios. Para poder implementar el contador Ah es necesario disponer del estado de carga inicial, el cual es desconocido. Por ello, se ha realizado una estimación del SOC inicial empleando especial atención en la tensión del banco de baterías. En tramos donde la corriente es próxima a cero, si la tensión se encuentra en torno a 270 V implica que un SOC alto (mayor al 80%). Por el contrario, una tensión inferior a 230 V implica que la batería está próxima a descargarse.

Una vez estimado es SOC inicial se va a proceder a calcular la Resistencia instantánea ( $R_i$ ), la cual se calcula de forma similar a los ensayos de carga/descarga:

$$R_i = \frac{V_{oc} - V_{bat}}{I_{bat}} \quad (26)$$

En el cálculo de  $R_i$  se ha limitado la resistencia a un valor mínimo, puesto que por limitaciones físicas no existen resistencias negativas. De hecho, fue necesario aumentar la tensión en circuito abierto para evitar un excesivo número de resistencias negativas a bajas corrientes.

En la figura 22 se muestra la corriente y la tensión de la batería y de circuito abierto. En la figura 23 se ha obtenido el SOC y la resistencia instantánea mediante la aplicación del algoritmo. Puede observarse como la resistencia es mayor a la obtenida en los ensayos de carga y descarga, especialmente para bajas corrientes. En especial, llama la atención que en ciertos instantes la resistencia supera los 100 Ω. Es debido a que en el cálculo de R en el denominador aparece la corriente de la batería. En los casos donde la corriente se encuentra próxima a cero la resistencia se dispara. Esto no quiere decir que la resistencia real alcance esos valores, puesto que el error cometido en estos casos es enorme, ya que dividir por un número muy pequeño aumenta el error absoluto, disminuyendo notablemente la precisión. Si se desea ver más datos sobre este apartado, el resto de gráficas se encuentran en el Anexo 1, apartado 2.2.

## Calculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido

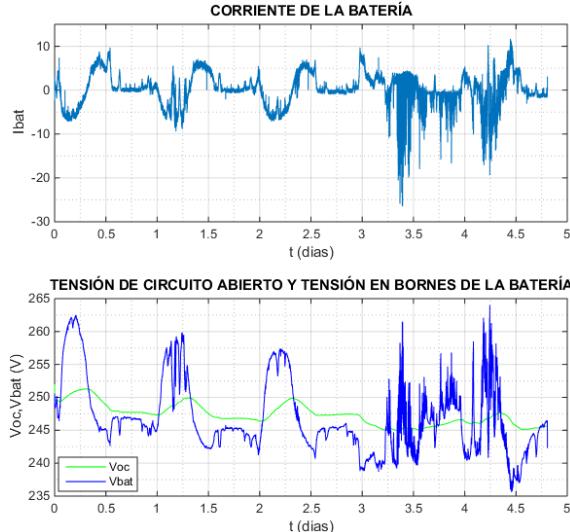


Figura 22. Tensión y corriente para los datos del 01/03/2012

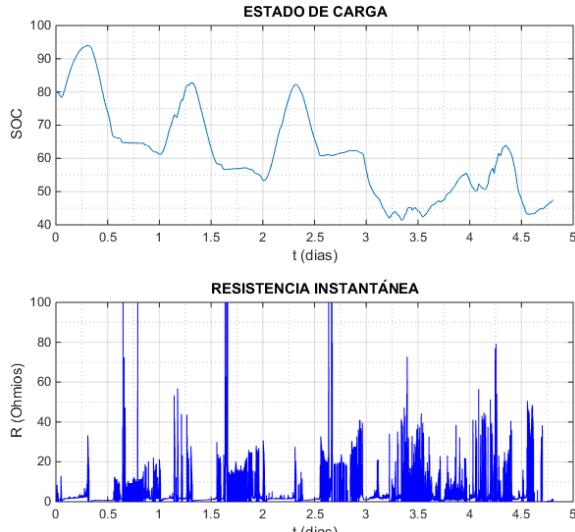


Figura 23. Calculo del SOC y de la Resistencia instantánea en datos del 01/03/2012

Si se representa la resistencia instantánea frente a la corriente se observa claramente como a corrientes muy bajas la resistencia aumenta exponencialmente. En la figura 24 se muestra la resistencia instantánea en función de la corriente, y en la figura 25 se ha realizado un zoom para observar más de cerca las bajas corrientes.

Puede observarse en la figura 24 como a mayor corriente menor resistencia, siendo un resultado incoherente, puesto que a mayor corriente mayores pérdidas, y por tanto mayor resistencia. Este comportamiento puede explicarse debido al hecho de que no se han tenido en cuenta varios factores. Al representar R vs Ibat no se está teniendo en cuenta el estado de carga, puesto que ya se ha comentado que la resistencia varía en función de este. Además la resistencia del modelo engloba las tres pérdidas fundamentales que se dan en una batería (óhmicas, activación y de concentración), de las cuales las de activación y concentración dependen logarítmicamente de la corriente. Puesto que todas las pérdidas han sido modelizadas por una resistencia, pueden ocurrir ciertas incongruencias.

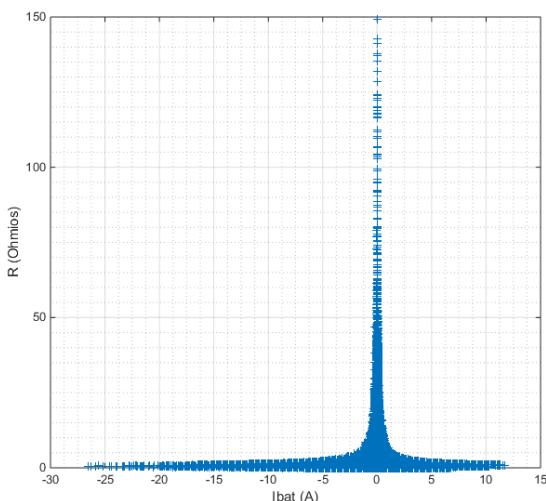


Figura 24. Resistencia instantánea en función de la corriente para los datos del 01/03/2012

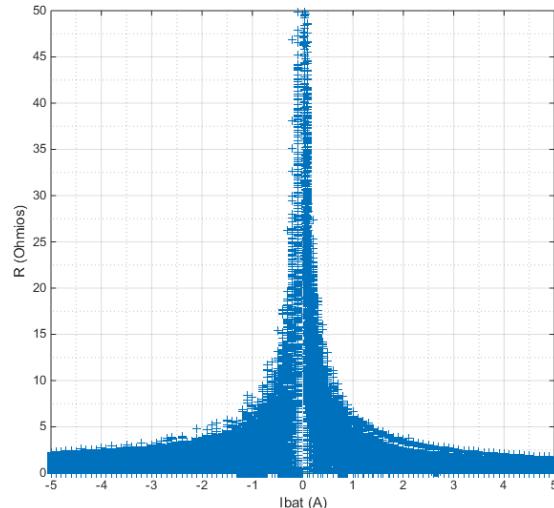


Figura 25. Resistencia instantánea frente a bajas corrientes

Otra característica observada es el hecho de que la resistencia varía según la corriente tanto en carga como en descarga. Esta dependencia plantea buscar un factor de corrección  $\beta$  que otorgue a la resistencia dependencia con la corriente, tal que:

$$R(SOC, I_{bat}) = \beta(I_{bat}) \cdot R(SOC) \quad (27)$$

### CORRECCIÓN DE LA RESISTENCIA. FACTOR $\beta$

El objetivo es buscar un factor  $\beta$  que otorgue a la resistencia dependencia del estado de carga y de la corriente.

Se separa este factor  $\beta$  en 2: uno para descarga ( $\beta_d$ ) y otro para carga ( $\beta_c$ ).

En descarga:

$$\beta = \beta_d = \frac{R_i}{R_d} \quad (28)$$

En carga:

$$\beta = \beta_c = \frac{R_i}{R_c} \quad (29)$$

Donde  $R_i$  ha sido hallada en el apartado anterior y  $R_d/R_c$  depende del estado de carga. Por tanto, para cada segundo se conoce la resistencia instantánea y el estado de carga en ese momento, por lo que  $\beta$  varía en función de ambas resistencias.

No interesa tomar todos los valores disponibles, sino que es necesario realizar una selección y filtrado de datos, tomando únicamente los que realmente aportan valor. Por ello, se han buscado períodos de tiempo en los que la corriente se mantiene aproximadamente constante. Además, en el caso de  $\beta_d$  interesa seleccionar aquellos momentos en los que el estado de carga es alto. Justo lo contrario se busca para  $\beta_c$ , puesto que se van a tomar valores en los que el estado de carga es inferior al 40%. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 26.

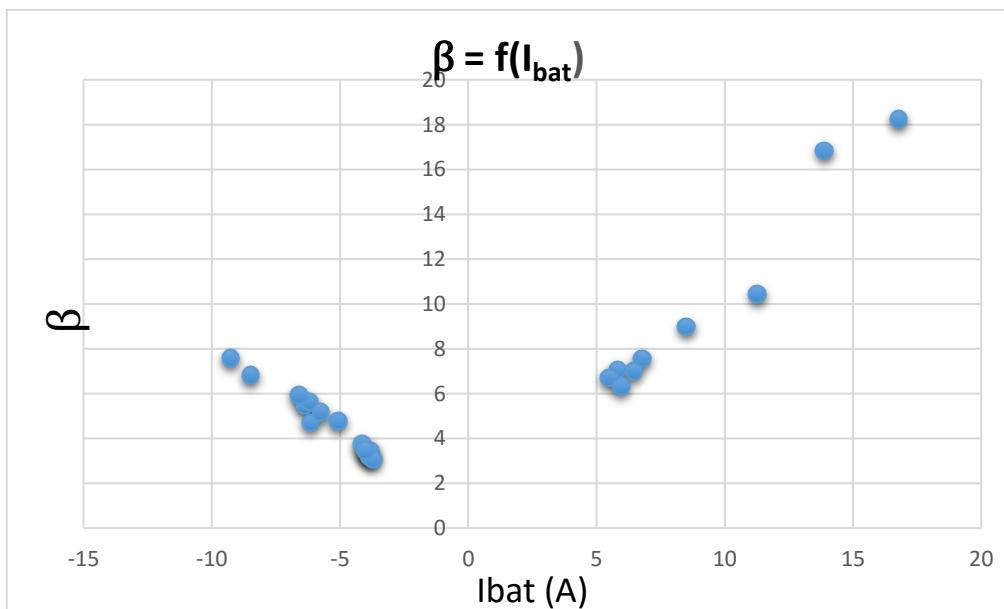


Figura 26. Factor de corrección  $\beta$  en función de la corriente

Los resultados obtenidos son muy positivos, ya que se observa una tendencia lineal tanto en carga como en descarga. Además, se cumple el hecho de que a mayores corrientes, mayores pérdidas, y por tanto la resistencia debe aumentar.

Por tanto, es posible relacionar  $\beta$  linealmente con la corriente, tal como se muestra a continuación en las ecuaciones 29 y 30:

$$\beta_d = 1,0221 \cdot I_{bat} + 1,1087 \quad (30)$$

$$\beta_c = -0,72947 \cdot I_{bat} + 0,81 \quad (31)$$

Se ha decidido limitar  $\beta$  a un valor máximo y mínimo. En caso de descarga, el valor mínimo que puede alcanzar  $\beta$  es 1, y el máximo 6. Para el caso de carga, el valor mínimo será 1 y el valor máximo 2,5.

## 5.4. ALGORITMO FINAL

Ya está completamente modelizada la batería, por lo que ya se dispone de la estimación de  $V_{bat}$ . Por tanto, el presente capítulo se centra en el diseño de la regulación y en el análisis de los resultados obtenidos.

### 5.4.1 Funcionamiento de la regulación

Tal como ya se ha comentado, el algoritmo debe corregir el SOC basándose en la estimación de  $V_{bat}$ . El error introducido en el regulador proporcional es igual a la diferencia de voltaje entre la tensión real y la estimada. La salida del regulador proporcional es el incremento de SOC deseado. No obstante, es necesario analizar el comportamiento de la regulación, comprobando su comportamiento.

La regulación se basa en suponer que el estado de carga real se alcanzará en el momento que la tensión estimada coincida con la real. Esta suposición no es cierta, aunque la tensión en bornes es un buen indicador sobre el estado de carga de las baterías. Permite hacerse una idea del SOC cuando la batería está próxima a cargarse o descargarse. No es una estimación precisa y no es válida para determinar SOC intermedios, pero como ya se ha comentado, mediante la tensión se determina el punto a partir del cual no se puede extraer más energía de la batería (tensión de corte).

Previamente, en la figura 27 se muestra un breve esquema del modelo de la batería para facilitar el análisis de la regulación.

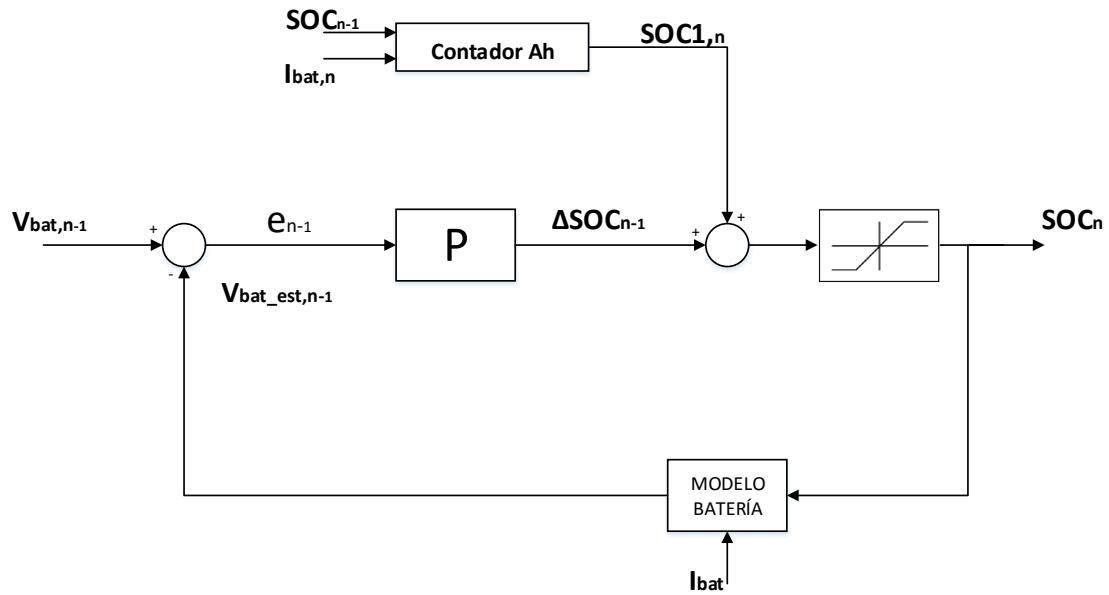


Figura 27. Diagrama de bloques del algoritmo propuesto

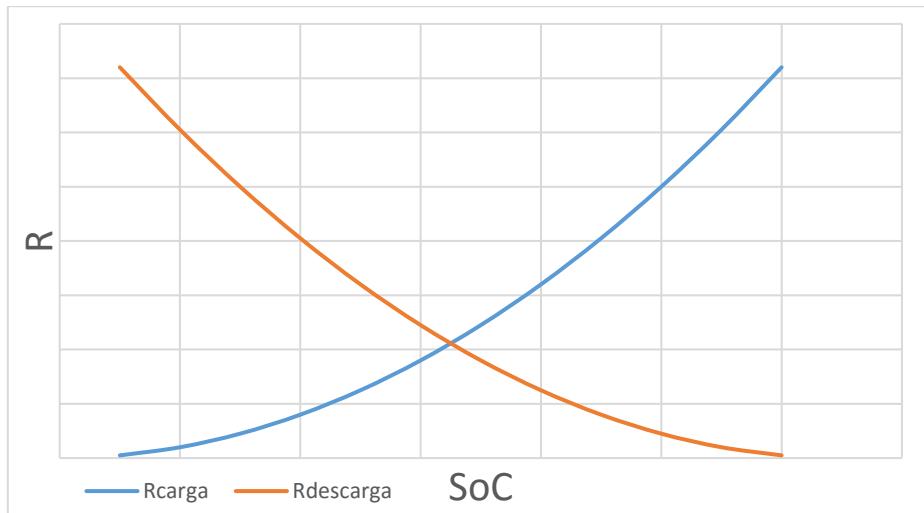
$$V_{oc} = 120 \cdot (2,1 - 0,1005 \cdot (1 - SOC))$$

$$V_{bat\ est} = V_{oc} - R \cdot I_{bat}$$

$$R \begin{cases} Si I_{bat} > 0 \rightarrow R = R_d \cdot \beta_d \\ Si I_{bat} < 0 \rightarrow R = R_c \cdot \beta_c \end{cases}$$

donde  $\beta_d$  toma valores [1-6] y  $\beta_c$  [1-2,5].

En la figura 28 se muestra la tendencia de la resistencia modelizada frente al estado de carga. Cuando la batería se encuentra en descarga la resistencia aumenta su valor conforme el estado de carga disminuye. Justamente lo contrario ocurre en carga, donde la resistencia aumenta conforme el SOC va creciendo.

Figura 28. Tendencia de  $R$  frente al  $SoC$

Una vez repasado el modelo, los casos posibles que se pueden dar durante la regulación se muestran en el siguiente esquema:

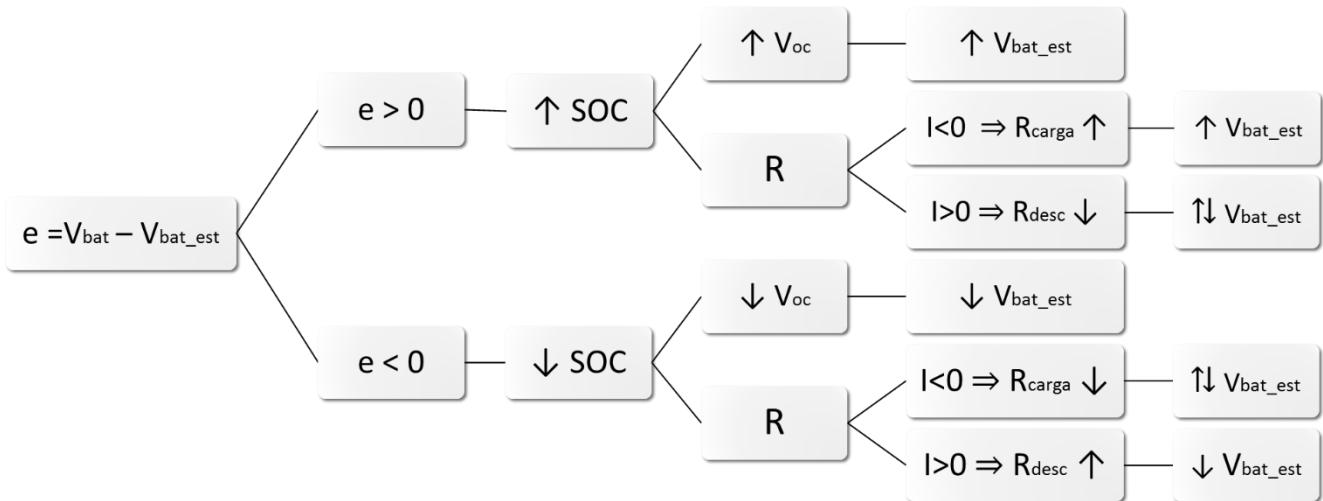


Figura 29. Esquema funcionamiento de la regulación

### CASO $e > 0$

En caso de que el error sea positivo, implica que la tensión estimada se encuentra por debajo del valor real y por tanto, debe subir. Para poder subir la tensión el estado de carga debe aumentar.

Consecuencias de subir el estado de carga:

$V_{oc}$  depende proporcionalmente del SOC, por tanto  $V_{oc}$  aumenta, contribuyendo a subir la tensión estimada.

A la hora de analizar la resistencia se presentan 2 situaciones:

Si la batería se encuentra en carga no hay problemas, la resistencia aumenta conforme aumenta el SOC y la tensión estimada sube (Recordar que en carga la corriente  $I_{bat} < 0$ , por lo que la caída de tensión de la resistencia contribuye a aumentar la tensión estimada).

En cambio, si el sistema se encuentra en descarga, la resistencia disminuye al aumentar el SOC, contribuyendo a una menor caída de tensión, lo cual es positivo para el sistema. El problema aparece con altos valores de corriente. Por un lado, el contador de coulomb disminuye el estado de carga, puesto que se encuentra en estado de descarga. En cambio, el error es positivo, por lo que el incremento de SOC aumenta el SOC. A altos valores de corriente el  $\Delta SOC$  no es suficiente y el SOC disminuye, disminuyendo la tensión estimada.

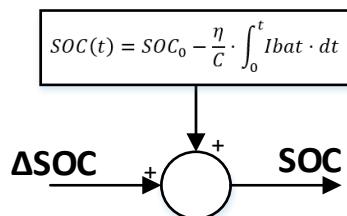


Figura 30. Esquema 2

No obstante, el estado de carga disminuye en menor proporción, por lo que contribuye a favor del sistema.

### CASO e<0

A continuación se analiza el caso restante. Si el error es negativo implica que la tensión estimada se encuentra por encima de la real y por tanto debe bajar. Para poder bajar el estado de carga debe disminuir.

Si el SOC disminuye, Voc también, puesto que son directamente proporcionales.

En descarga resistencia aumenta conforme baja el SOC, aumentando la caída de tensión. Como resultado, la tensión estimada cae.

En carga, el contador de Coulombios funciona en contra del sistema, puesto que contribuye a aumentar la tensión estimada. Al igual que el caso anterior, puede ocurrir que el ΔSOC no sea suficiente y el estado de carga aumente, aunque comparándolo con el sistema sin regulación (solo el contador de Coulombios), aumentaría en menor proporción que este.

#### 5.4.2 Regulador proporcional

Una vez analizado el comportamiento del sistema ante las posibles situaciones que pueden darse, es necesario determinar el funcionamiento del regulador proporcional P.

La regulación es simple, el error obtenido en la comparación de la tensión real con la estimada es multiplicado por una constante  $K_p$ , obteniendo como salida  $\Delta SOC$ .

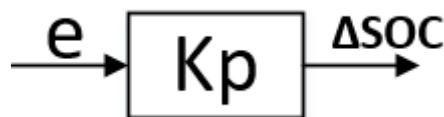


Figura 31. Regulador proporcional

$$\Delta SOC = K_p \cdot e \quad (32)$$

Por tanto el objetivo es el ajuste de  $K_p$ . Para ajustar  $K_p$  es necesario pensar cuánto se desea modificar el SOC en una hora. Para variar el SOC un tanto por ciento en una hora, se calcula el incremento de SOC necesario por segundo necesario.

Una vez conocido el  $\Delta SOC/s$ , es posible calcular  $K_p$ , pero se presenta el inconveniente de que el error no es conocido, y además es variable en el tiempo. Por ello se ha decidido establecer un error medio de 5 V.

Tras realizar varias pruebas con diferentes  $K_p$ , finalmente se ha optado por ajustar  $K_p$  para que  $\Delta SOC$  varíe un 20% en una hora. A continuación se determina su valor:

$$\Delta SOC = \frac{20\%}{1 \text{ hora}} \quad (33)$$

$$\frac{\Delta SOC}{s} = 5.56 \cdot 10^{-3} \%/s = 5.56 \cdot 10^{-5}/s \quad (34)$$

$$K_p = \frac{\Delta SOC/s}{e} = \frac{5.56 \cdot 10^{-5}}{5} = 1.11 \cdot 10^{-5} \quad (35)$$

A continuación se muestran los resultados. Si se desea más información acerca de las pruebas de  $K_p$ , en el apartado 4 del Anexo 1 se muestran el funcionamiento del algoritmo en otras semanas. En la figura 32 se muestran el estado de cara del algoritmo propuesto, del contador de Coulombios y del híbrido, la corriente de la batería y la tensión estimada y real.

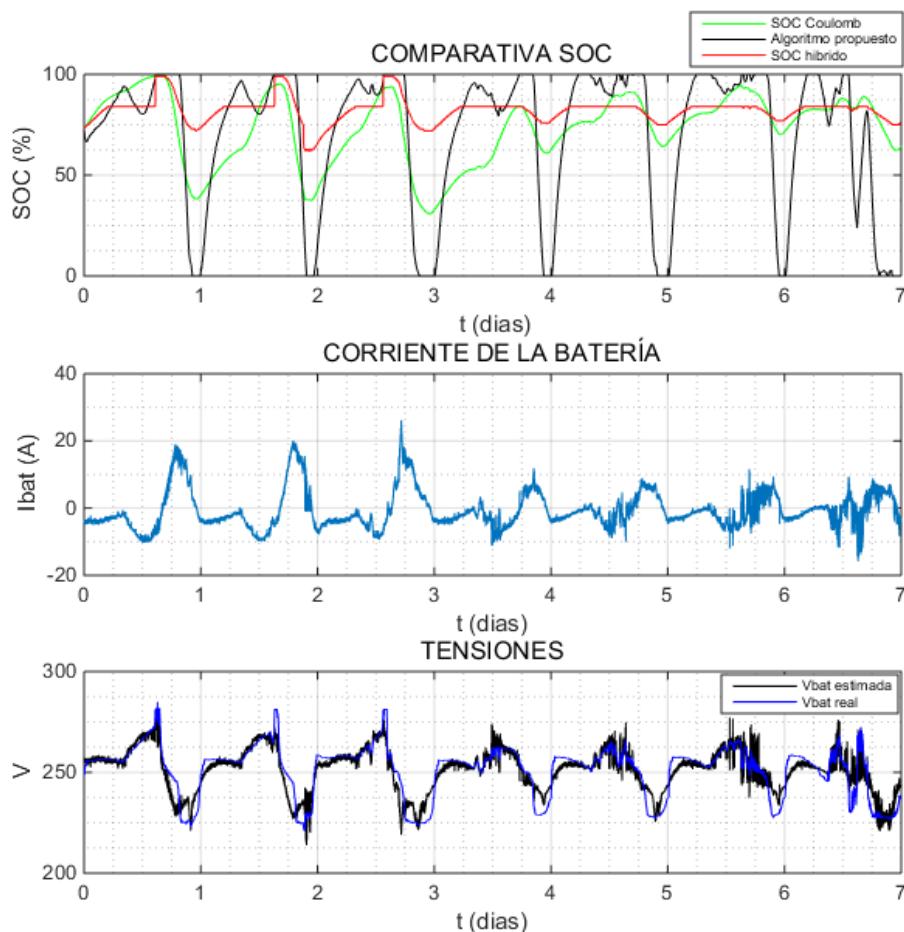


Figura 32. Prueba de  $K_p$  en datos del 06/09/2012

Puede comprobarse como la regulación funciona como se esperaba, ya que el objetivo de que la tensión estimada siga a la real se ha cumplido. No obstante, puede observarse como el algoritmo propuesto varia demasiado rápido, llegando a saturar repetidas veces, tanto al 100% como al 0%. La saturación es demasiado rápida puesto que tanto el contador Ah como la regulación avanzan en la misma dirección. Este aspecto no es para nada positivo para las estrategias de control de microrredes. Por ello, se ha decidido limitar la regulación, estableciendo una serie de condiciones:

1. Para evitar que el SOC llegue a cero demasiado rápido, se ha determinado que Kp sea cero cuando el estado de carga sea menor al 60% y además el error sea negativo. (En caso de que el error sea positivo no se limita, puesto que el objetivo es subir el SOC)
2. Se ha implementado una histéresis para el SOC entre el 80% y el 100%. Cuando el SOC sea igual al 100% se establece que Kp sea cero cuando el error sea positivo (El objetivo es evitar que el SOC sature). Esta limitación terminará cuando el SOC sea menor al 80% (fin de la histéresis).

En el apartado 3 del Anexo 1 se ha realizado un pseudocódigo donde se explica el funcionamiento del algoritmo completamente caracterizado.

#### 5.4.3 Resultados obtenidos

Una vez caracterizado completamente el algoritmo, se muestran los resultados obtenidos. Para ello, para cada semana se muestra un gráfico comparativo de los 3 estados de carga disponibles (algoritmo del híbrido, contador de Coulombios y propuesto), junto con la corriente la batería. El algoritmo del híbrido es el algoritmo que actualmente opera en la microrred, del cual sólo se conoce el estado de carga que proporciona y el algoritmo del contador de Coulombios se basa en utilizar exclusivamente el contador Ah. Puesto que no se conoce el estado de carga inicial, se ha supuesto que el SOC inicial lo proporciona el híbrido, puesto que facilita la comparativa entre métodos.

Además, se ha calculado la tensión estimada de los 3 algoritmos. Para su aproximación se ha utilizado el modelo de batería propuesto en este proyecto. Por último se ha calculado el error relativo cometido para los 3 algoritmos, así como el RMSE (error cuadrático medio) y el MAPE (error porcentual absoluto medio).

$$\text{Error relativo} = \frac{V_{\text{bat real}} - V_{\text{bat estimada}}}{V_{\text{bat teal}}} \quad (36)$$

El error cuadrático medio (RMSE) se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{t=0}^n e(t)^2} \quad (37)$$

donde:

e: error absoluto entre la tensión estimada y la real [V]

n: Periodo de tiempo de la muestra [s]

El error porcentual absoluto medio (MAPE) se define como:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^n \frac{|V_{\text{bat real}} - V_{\text{bat estimada}}|}{|V_{\text{bat teal}}|} \quad (38)$$

donde:

$V_{\text{bat real}}$ : Tensión de la batería en bornes [V]

$V_{\text{bat estimada}}$ : Tensión estimada por el algoritmo [V]

n: Periodo de tiempo de la muestra [s]

En la figura 33 se muestran los datos de tensión y corriente disponibles para la semana del 1 de marzo de 2012. Tras aplicar el algoritmo, en la figura 34 se muestra el SOC, la corriente, las tensiones estimadas y el error relativo cometido al estimar la tensión. El color verde hace referencia al contador de Coulombios, el negro al algoritmo propuesto y el rojo al algoritmo del híbrido de la microrred.

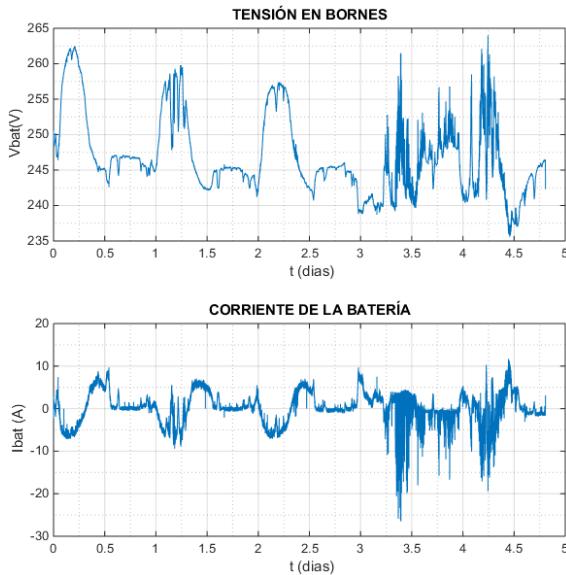


Figura 33. Tensión y corriente para los datos del 01/03/2012

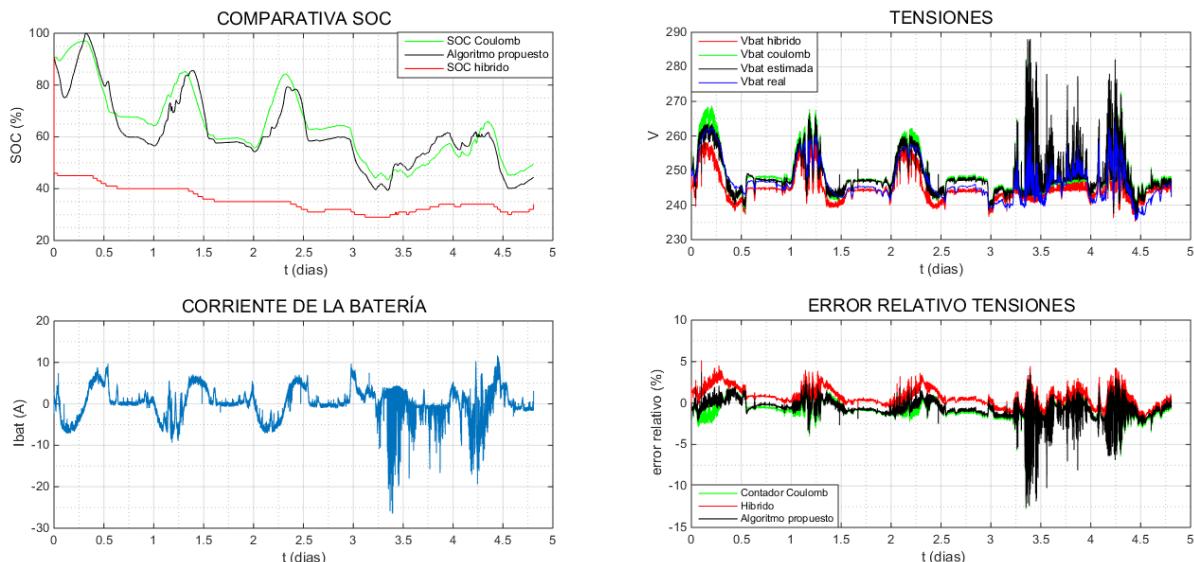


Figura 34. Resultados obtenidos en los datos 01/03/2012

Se aprecia una gran similitud entre el SOC del contador de Coulombios y el SOC propuesto, puesto que el error relativo de las tensiones es especialmente pequeño, obteniendo un RMSE de 2,66 V y un MAPE del 0,84%. La buena aproximación de  $V_{bat}$  hace que la regulación no intervenga demasiado.

A los pocos segundos de comenzar se observa como el SOC del híbrido desciende un 40%. Sin embargo, a los 4,5 días las diferencias en la estimación del SOC entre algoritmos se han reducido notablemente.

La tensión estimada se ve fuertemente influenciada por la corriente, puesto que tanto la caída de tensión en la resistencia depende fuertemente de la corriente y de  $\beta$ . Por ello, cuando el rizado de la corriente aumenta la tensión estimada se ve fuertemente afectada. El rizado de corriente se debe a la generación eólica.

Los siguientes datos a comentar aparecen en la figura 35, equivalentes a la semana del 6 de septiembre de 2012. Al igual que el caso anterior se muestran los datos disponibles de tensión y corriente:

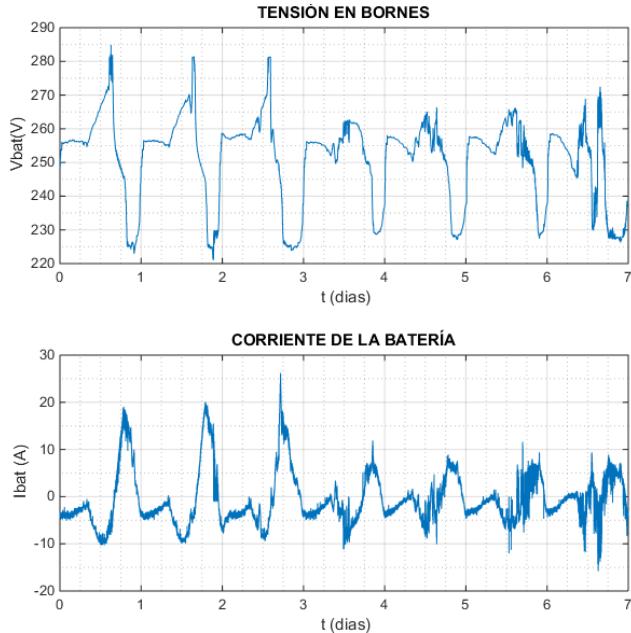


Figura 35. Tensión y corriente para los datos del 06/09/2012

En la figura 36 se muestran los resultados obtenidos. Atendiendo al estado de carga, el algoritmo del contador de Coulombios y el propuesto varían mucho más que el algoritmo del híbrido, dando a entender que la capacidad que emplea el algoritmo de la microrred es considerablemente mayor a los 100 Ah caracterizados en los ensayos de descarga.

Además, los 3 algoritmos alcanzan valores cercanos al 100% a la vez, con lo que parece que la estimación del SOC es correcta. En cuanto a la estimación de la tensión, RMSE obtenido es de 7,23 V y el MAPE del 2%, ambos inferiores a los obtenidos con los otros dos algoritmos (en el apartado 6.4.4 se encuentran las tablas 3 y 4, en las cuales se realiza una comparativa del RMSE y MAPE obtenido por cada algoritmo), pero siguen siendo peores resultados a los obtenidos en el 1 de marzo de 2012.

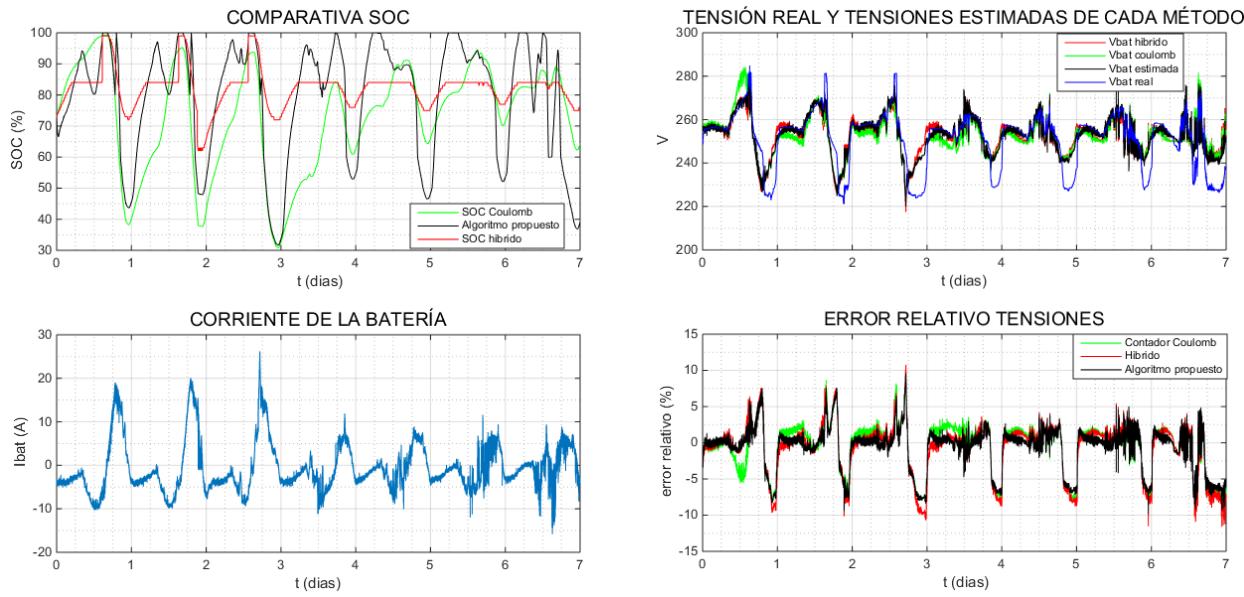


Figura 36. Resultados obtenidos en los datos 06/09/2012

El siguiente ensayo corresponde a la semana del 8 de marzo de 2012. De igual modo, se muestran la tensión y la corriente en la figura 37.

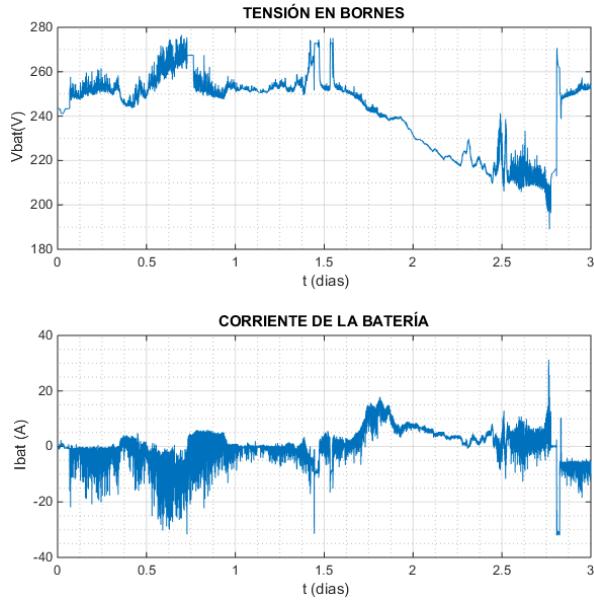


Figura 37. Tensión y corriente para los datos del 08/03/2012

Tras aplicar el algoritmo, se muestran en la figura 38 el SOC, corriente de la batería, tensión real y estimada y el error relativo de la tensión. Todo ello para los 3 algoritmos (híbrido, coulomb y propuesto).

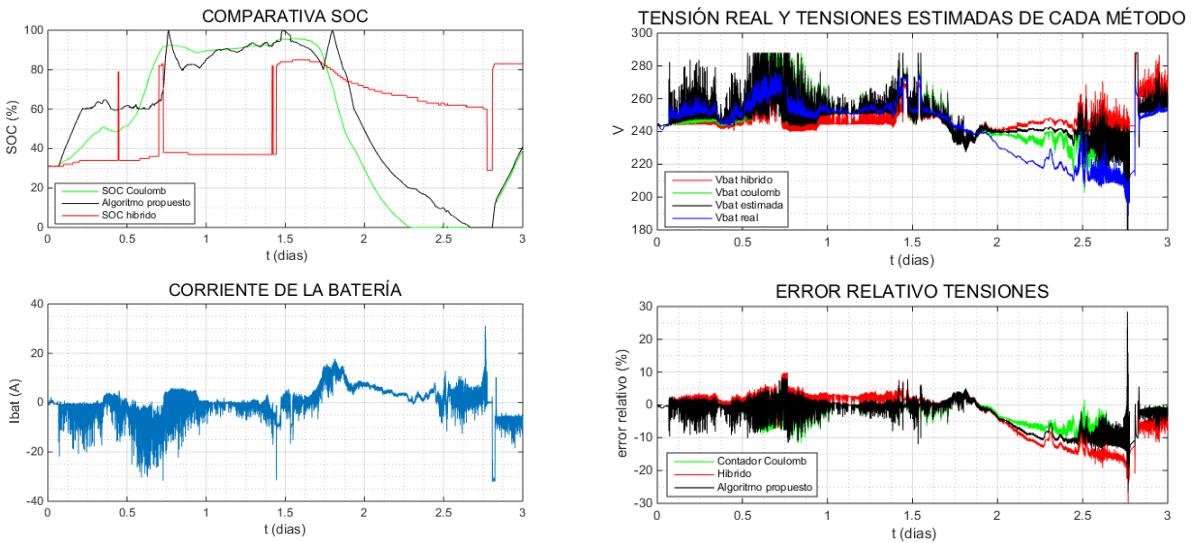


Figura 38. Resultados obtenidos en los datos 08/03/2012

Analizando el SOC se observa como el híbrido tiene problemas para determinar el SOC, puesto que se observan diferentes escalones a lo largo del tiempo. En cuanto al algoritmo propuesto, alcanza en varias ocasiones el 100%, mientras que los otros dos no. Además, destaca el hecho de que tanto Coulomb como el propuesto a los 2.5 días alcanzan el 0%. Por tanto, en este caso la estimación del SOC no parece acertada ya que según el híbrido si se puede seguir extrayendo energía ya que en ningún momento alcanza el 100% o el 0%.

En el caso de las tensiones, durante los primeros dos días el algoritmo sigue correctamente a la referencia, aunque con un excesivo rizado, llegando a alcanzarse los 288V de tensión máxima. Dicha tensión es la máxima que puede alcanzar el inversor conectado a baterías. A partir de los 2 días aparece un error permanente en las tensiones que hace que el SOC caiga rápidamente a cero. De hecho, el algoritmo llega a saturar, puesto que el error absoluto en la estimación supera 12V. Para entender esta saturación es necesario realizar un análisis a corto plazo.

Realizando un análisis para un corto periodo de tiempo, se ha llegado a la conclusión de que para que el algoritmo no sature el error debe ser menor a 12V, puesto que en cortos periodos de tiempo la resistencia puede tomarse como constante, y  $\beta$  depende de la corriente, la cual no es controlable. Por tanto, la capacidad de regulación queda fuertemente influenciada por la tensión de circuito abierto, cuya variación máxima es de 12V. (252V para un SOC igual al 100% y 240V para el 0%).

El siguiente ensayo se muestra en la figura 39, donde se muestran la tensión y corriente correspondientes a la semana del 13 de septiembre de 2012.

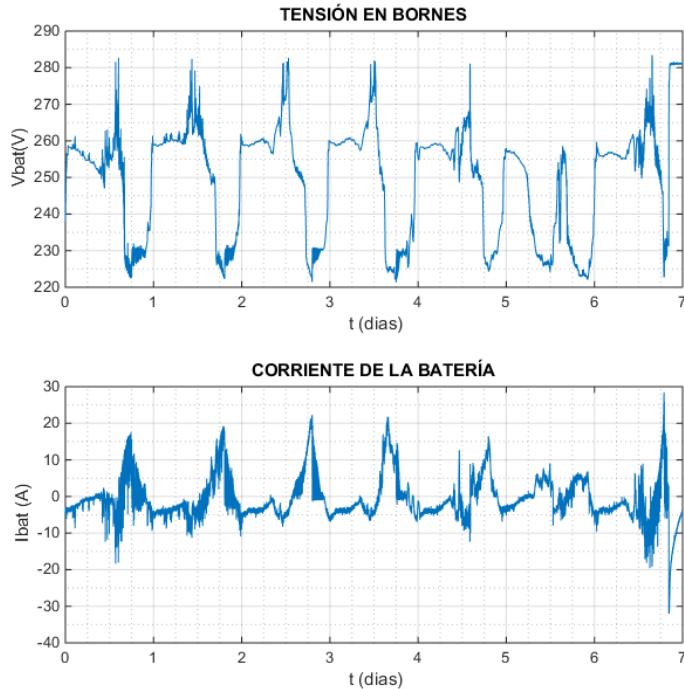


Figura 39. Tensión y corriente para los datos del 13/09/2012

Tras aplicar el algoritmo en el ensayo anterior, en la figura 40 se muestran los resultados obtenidos.

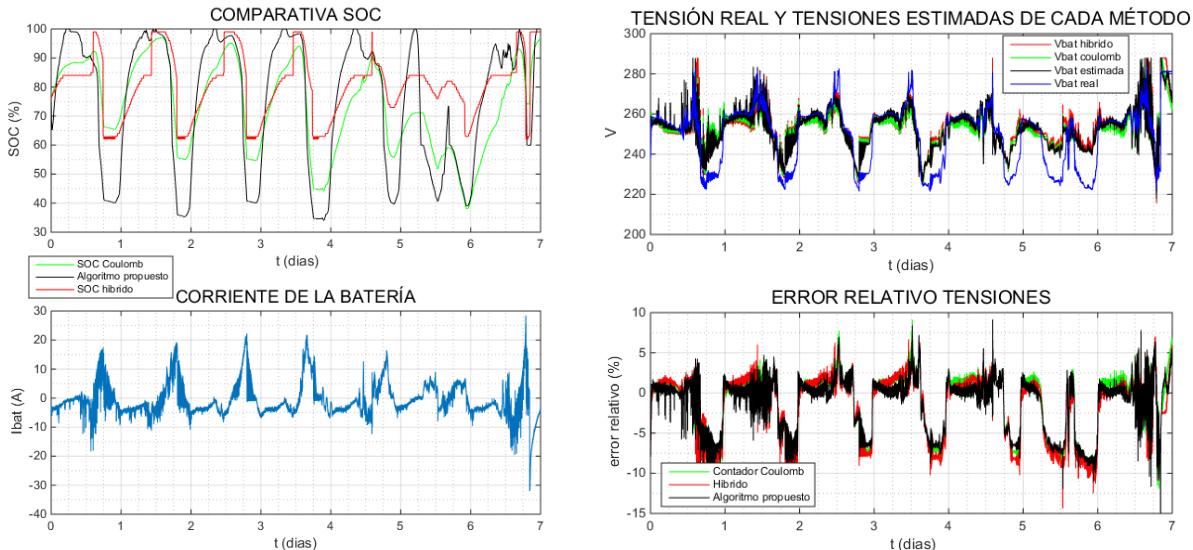


Figura 40. Resultados obtenidos en los datos 13/09/2012

El SOC del algoritmo propuesto alcanza varias veces el 100%, pero le acompañan tanto el contador de Coulombios como el híbrido, por lo que parece que la estimación es correcta. Se sigue observando como el propuesto fluctúa más en el tiempo que el resto, principalmente debido a la regulación, donde  $K_p$  debe corregir un 20% en una hora.

En la estimación de la tensión puede observarse en los días 0,8, 1,8 y 2,8 como la tensión real describe una trayectoria con forma de campana. Sin embargo, la tensión estimada no sigue esta trayectoria de campana, principalmente debido a que en el modelo no se ha tenido en cuenta la respuesta dinámica (la cual supondría la inclusión de condensadores en el modelo).

El error relativo es más acusado en descarga que en carga, siendo en carga en torno al 2% y en descarga del 6%. Por esa razón la estimación en carga es más precisa que en descarga, aunque en descarga se alcanzan intensidades de corriente mayores.

El resto de ensayos se encuentran en el apartado 5 del Anexo 1.

#### 5.4.4 Conclusiones

En la siguiente tabla se muestra una comparativa del RMSE obtenido en los datos semanales anteriores:

DATOS	ALGORITMO PROPUESTO (V)	ALGORITMO DE COULOMB (V)	ALGORITMO DEL HÍBRIDO (V)
01/03/2012	2,66	2,98	3,25
06/09/2012	7,23	8,17	8,39
08/03/2012	11,2	9,72	15,43
13/09/2012	8,32	9,28	9,71
23/08/2012	9,58	9,68	10,92
30/08/2012	6,66	7,81	8,21
03/08/2012	8,48	8,86	9,87
<b>Media</b>	<b>7,16</b>	<b>7,60</b>	<b>8,64</b>

Tabla 3. RMSE obtenidos en la estimación de Vbat

Del mismo modo en la tabla 4 se muestra una comparativa del MAPE obtenido en los datos semanales anteriores:

DATOS	ALGORITMO PROPUESTO (%)	ALGORITMO DE COULOMB (%)	ALGORITMO DEL HÍBRIDO (%)
01/03/2012	0,84	1	0,99
06/09/2012	2,02	2,56	2,4
08/03/2012	3,34	2,92	4,95
13/09/2012	2,47	2,98	3
23/08/2012	2,88	3,11	3,38
30/08/2012	1,82	2,43	2,49
03/08/2012	2,48	2,86	2,86
<b>Media</b>	<b>2,10</b>	<b>2,42</b>	<b>2,62</b>

Tabla 4. MAPE obtenidos en la estimación de Vbat

Se ha realizado una media del error cuadrático medio, el cual se encuentra cercano al 7.16V, mejorando con respecto a la estimación del híbrido (8.64V). Un error de 7.16V supone un MAPE de 2.1%. En definitiva, la tensión estimada sigue correctamente a la real, con errores del 2%.

Por el contrario, se ha de tener mucho cuidado con estos resultados, puesto que en el análisis a corto plazo realizado se ha llegado a la conclusión de que para que el algoritmo no sature el error debe ser menor a 12V, debido a que la capacidad de regulación queda fuertemente influenciada por la tensión de circuito abierto, cuya variación máxima es de 12V.

En resumen, el algoritmo si es capaz de reducir el error de tensión durante la mayor parte del tiempo, aunque para reducir 7.16V el SOC debe variar un 60%.

Mediante las limitaciones en la regulación se ha conseguido evitar que el estado de carga baje hasta cero rápidamente y se mantenga durante largos períodos de tiempo (horas) con el SOC al 100%. Además, cuando se ha observado cómo al 100% los otros 2 algoritmos alcanzaban valores muy altos de SOC, por lo que no ha habido una pérdida de energía. Sin embargo, limitar fuertemente la regulación tiene sus desventajas, como que puede operar únicamente con el contador Ah durante varias horas, con la pérdida de precisión que supone.

El SOC calculado no refleja la energía almacenada en la batería, puesto que no se trata del SOC real, sino de un SOC útil para las estrategias de regulación. Para explicar el SOC útil se definen el LOE y el SOF. El LOE es el nivel de energía disponible en la batería. Informa en qué manera puede extraerse esta energía. El SOF equivale al estado de funcionamiento, es decir, da información de la energía disponible. El SOC calculado es una mezcla de estos dos conceptos. Por un lado da información de la energía disponible, pero por otro lado también es un indicador de la energía que puede extraerse en un determinado momento, este parámetro fuertemente influenciado por la corriente. En descarga, a mayores corrientes la tensión baja e indica que no puede extraerse tanta energía).

A modo de conclusión, los resultados son plenamente positivos, obteniendo un estado de carga útil para las estrategias de la microrred.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO EN LA MICRORRED

Ya se ha comprobado el funcionamiento del algoritmo con los datos disponibles. No obstante, se va a dar un paso más y se va implementar el algoritmo propuesto en la microrred para comprobar en tiempo real su funcionamiento. En la figura 41 se muestra la interfaz de control de la microrred, donde se observa los diferentes elementos que la forman. A continuación se muestran las principales características de la microrred:

1. Aerogenerador de 6 kW de la empresa Bornay.
2. Módulos fotovoltaicos de 4 kWp (BP 85).
3. Baterías de plomo-ácido selladas de la empresa FIAMM (120 vasos conectados en serie de 2 V y 300 Ah cada uno, obteniendo 240 V y 300 Ah en total).
4. Batería de pilas de hidrógeno de 4.8 kW (en total).
5. 5 supercondensadores de 83 Faradios y 48 V cada uno.
6. En cuanto al consumo de la microrred, corresponde al de una vivienda unifamiliar.

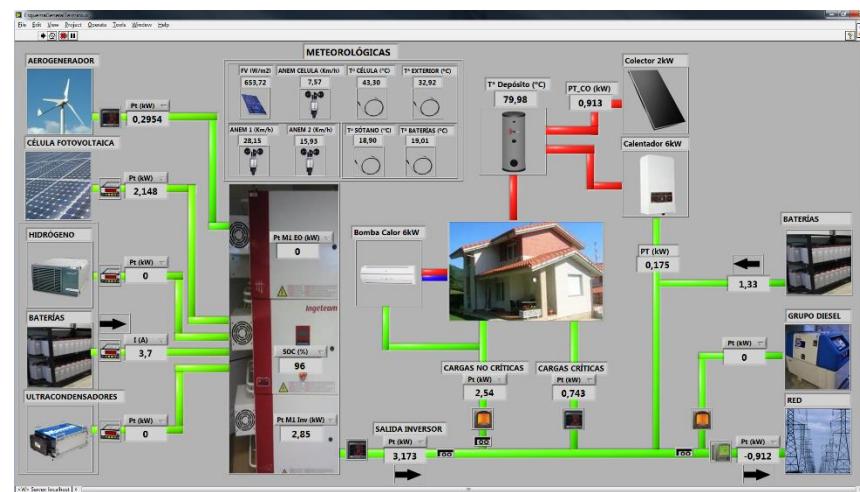


Figura 41. Interfaz de control de la microrred

Para ello se ha implementado el algoritmo en Labview, puesto que es el programa utilizado por la microrred para el control de esta. Labview es un programa que utiliza símbolos gráficos en lugar de lenguaje textual para describir acciones de programación. En la figura 42 se muestra el programa diseñado en Labview.

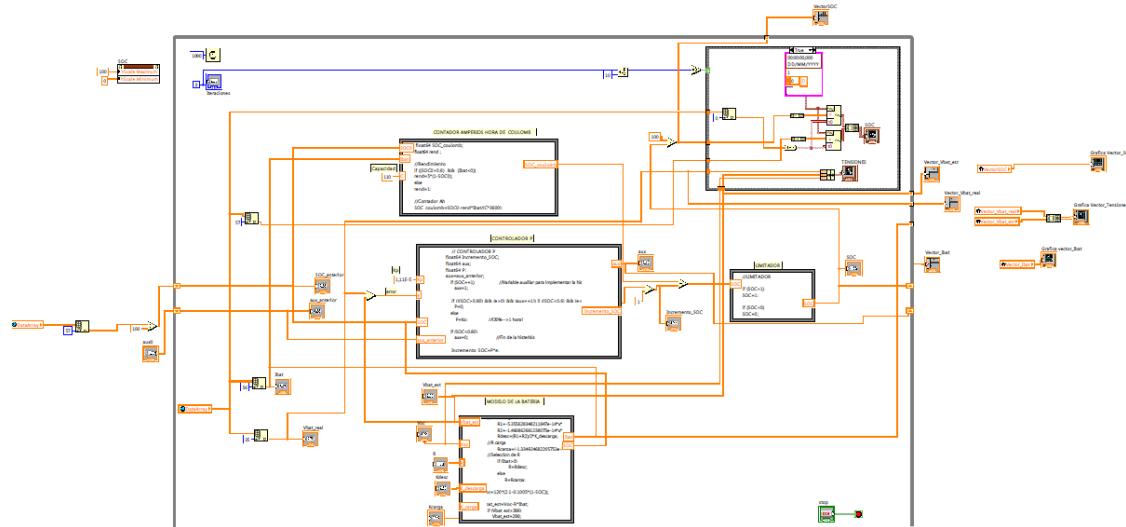


Figura 42. Implementación en Labview

Los datos son tomados cada segundo, en la figura 43 se muestra un gráfico realizado en Labview que muestra en la gráfica superior la tensión real, estimada y de circuito abierto, y en la gráfica inferior el estado de carga del híbrido y del algoritmo propuesto en tiempo real.

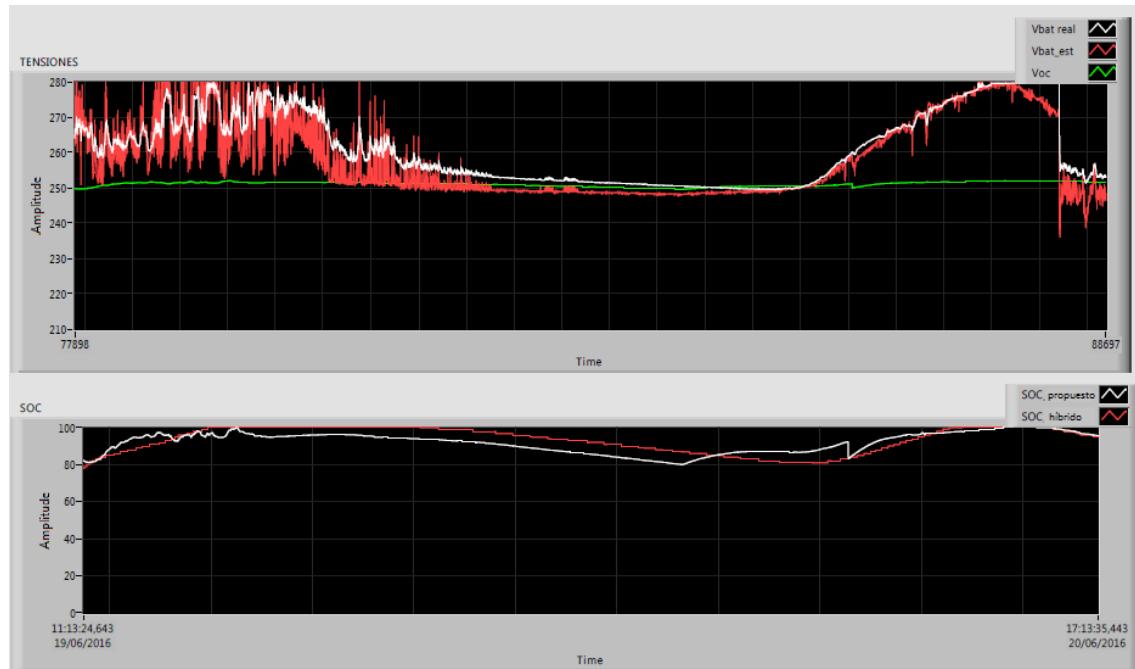


Figura 43. Gráfico en tiempo real de las tensiones y del SOC

El algoritmo ha sido testeado durante una semana y a continuación se muestran los resultados obtenidos. En la figura 44 se muestra el estado de carga, la corriente y las tensiones para los primeros 2,5 días.

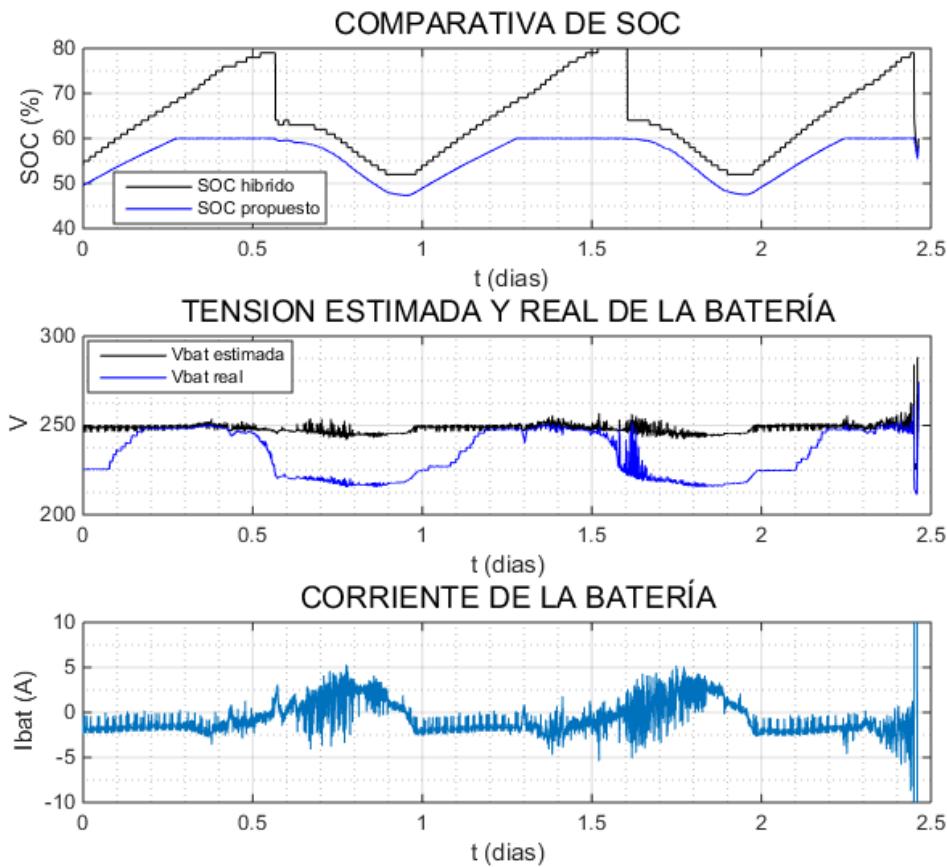


Figura 44. Funcionamiento del algoritmo en la microrred

Puede observarse como la estimación de la tensión no funciona correctamente, especialmente en descarga, donde el error supera los 20 V. Por tanto, el SOC hallado no es fiable. Además, cabe destacar que actualmente la capacidad de las baterías ha disminuido considerablemente, puesto que la variación del SOC del híbrido es mayor a la del algoritmo propuesto, a diferencia del apartado anterior, donde ocurría lo contrario.

No obstante, no puede tomarse el SOC del híbrido como referencia, puesto que se desconoce el método de estimación empleado. Por ello, puede intuirse que el banco de baterías se encuentra próximo a descargarse, ya que la tensión se encuentra en torno a 230 V en descarga y 250 V en carga. El control de la microrred deja de extraer energía de la batería cuando la tensión baja de los 218 V.

Otro punto a destacar es que con respecto a 2012, la resistencia ha aumentado considerablemente. Para corrientes de descarga inferiores a 5 amperios la caída de tensión es considerablemente mayor llegando incluso a caer 30 V. Es razonable el hecho que la resistencia haya aumentado desde 2012, debido a que el SOH ha empeorado.

En la tabla 5 se muestran el RMSE y el MAPE obtenidos durante los días de funcionamiento en la microrred. El RMSE supera los 12 V de capacidad de regulación, por lo que la regulación es incapaz de reducir el error a cero, y por tanto satura.

	ALGORITMO PROPUESTO
RMSE	18,53V
MAPE	6,45%

Tabla 5. RMSE y MAPE obtenidos tras implantar el algoritmo en la microrred

Se ha optado por realizar una carga completa de las baterías para comprobar el funcionamiento del algoritmo cuando SOC inicial es el 100%. Además, una vez cargadas las baterías, se han desconectado de la microrred durante 8 horas para medir la tensión de circuito abierto. La tensión obtenida en circuito abierto ha sido de 257,6 V, 5,6 V por encima de lo esperado. Por tanto, la tensión en circuito abierto debe ser revisada y recalculada de nuevo.

Tras la medida de Voc, el algoritmo estuvo operando en la microrred durante varios días. En la figura 45 se muestran los resultados obtenidos para el estado de carga, la corriente y la tensión estimada:

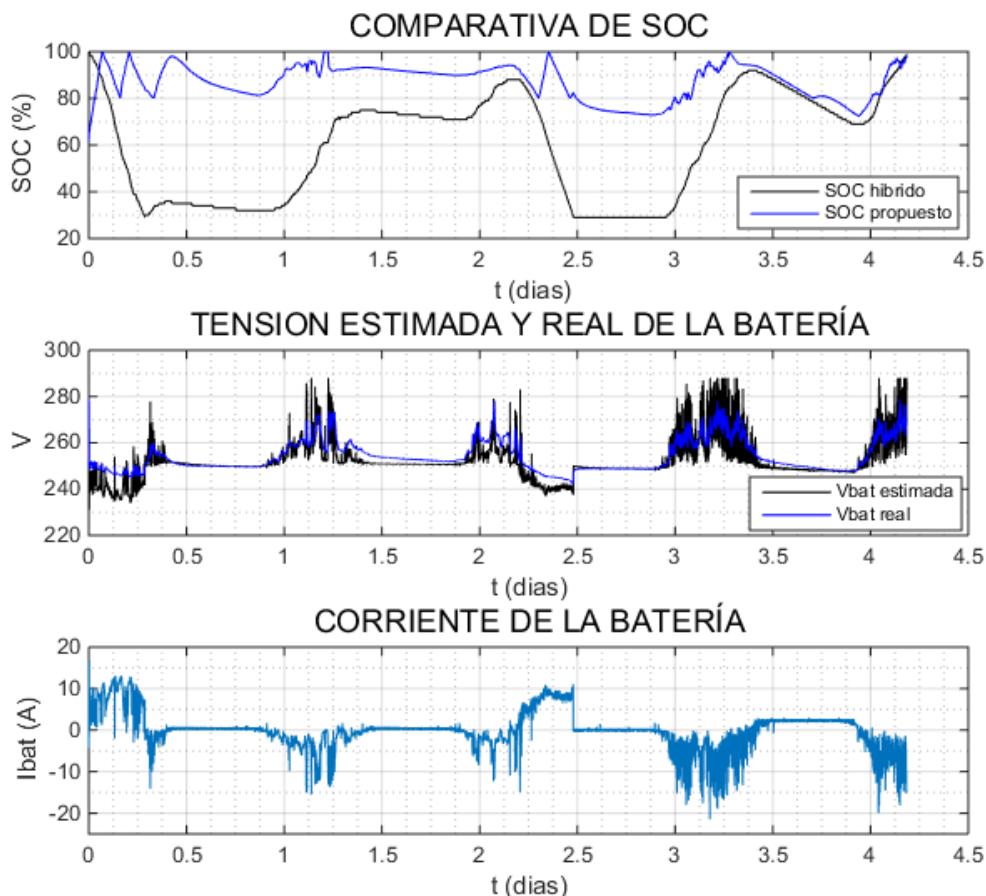


Figura 45. Funcionamiento del algoritmo en la microrred una vez cargadas completamente las baterías.

Con respecto a la tensión estimada, los resultados son más positivos que los obtenidos en la figura 44, se observa como la tensión sigue correctamente a la tensión real, tanto en carga como en descarga. En la tabla 6 se muestra como el RMSE y el MAPE mejoran notablemente con respecto a los datos anteriores. En este caso, el algoritmo es capaz de reducir el error de tensión sin llegar a saturar.

	ALGORITMO PROPUESTO
RMSE	4,08 V
MAPE	1,11%

Tabla 6. RMSE y MAPE obtenidos una vez cargadas las baterías de la microrred

En lo que respecta al estado de carga, durante la mayor parte del tiempo se encuentra entre el 80% y el 100%, que coincide con el tramo de la histéresis implementada. Tampoco

puede considerarse una buena estimación, ya que durante gran parte del tiempo únicamente se encuentra funcionando el contador de coulombios.

A modo de conclusión, el algoritmo no funciona correctamente en la microrred, puesto que la calidad de la estimación depende fuertemente del estado de carga, por lo que es necesario un recálculo de parámetros para obtener una estimación válida.

## 7. CONCLUSIONES FINALES Y LÍNEAS FUTURAS

La determinación del estado de carga de unas baterías es una materia en constante evolución y mejora. Una buena estimación del SOC supone una mejora de eficiencia y eficacia en las estrategias de gestión energética en microrredes, así como en coches eléctricos, telefonía móvil, sistemas de telecomunicaciones y otras muchas aplicaciones en las que sea necesario almacenamiento. Sin embargo, a día de hoy no se ha dado con una metodología eficaz, práctica y fácil de implementar, y por ello se sigue investigando.

En este trabajo de fin de grado se ha caracterizado, diseñado y validado experimentalmente un algoritmo que determine el estado de carga de unas baterías de plomo-ácido. Para ello, el método de estimación empleado ha consistido en implementar el contador de amperios hora de Coulomb, combinado con una etapa de regulación en la que, a partir de la estimación de la tensión en bornes de la batería, se corregía los desvíos de SOC propios del contador Ah.

El algoritmo propuesto ha sido caracterizado mediante datos de 2012, en los cuales se han obtenido resultado positivos tanto en la estimación del SOC como en la estimación de la tensión, obteniendo un RMSE del 7,16 V y un MAPE del 2,1%. También se ha visto como el algoritmo tiene problemas en la estimación cuando la diferencia entre la tensión real y la estimada es mayor a 12 V, puesto que la capacidad de regulación principal de la tensión depende de la tensión de circuito abierto. La tensión de circuito abierto varía linealmente entre 252 V (cuando es SOC se encuentra al 100%) y 240 V (al 0%).

Al implementar el algoritmo en la microrred los resultados no han sido los esperados, obteniendo serios problemas de regulación, sobre todo cuando la batería se encuentra próxima a descargarse. No obstante, con estados de carga altos la estimación mejora considerablemente. Además, se ha observado como durante gran parte del tiempo la regulación estaba limitada, funcionando únicamente el contador Ah. En definitiva, el algoritmo pierde fiabilidad con el tiempo por lo que es necesario un recálculo de parámetros periódico para asegurar una estimación correcta. A parte del recálculo de parámetros, se proponen unas líneas futuras a aplicar en el algoritmo para mejorar la estimación.

1. **Capacidad instantánea:** Se ha visto como la energía extraíble de la batería varía en función de la corriente, por lo que una futura mejora sería calcular una capacidad instantánea en función de la corriente. Además, el estado de salud de la batería influye notablemente en la capacidad disponible. Mediante una capacidad variable permitiría adaptar el modelo a la degradación temporal. En definitiva, se propone realizar un recálculo de parámetros en tiempo real, obteniendo un algoritmo que se adapta al SOH de la batería.
2. **Mejora del modelo de la batería:** El modelo empleado para la estimación de la tensión no tiene en cuenta la respuesta dinámica del sistema. Tampoco tiene en cuenta los efectos capacitivos de esta. Se ha comentado en el apartado 3.4 que las pérdidas en la batería más importantes son las óhmicas, las de activación y por concentración. Estas dos últimas tienen dependencia logarítmica con la corriente. Sin embargo, en el modelo las pérdidas han sido modelizadas mediante una resistencia, por ello, se propone como mejora la modelización de estas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. San Martín, Integración de energías renovables y almacenamiento energético en microrredes eléctricas, Pamplona: Tesis Doctoral, Universidad Pública de Navarra, 2013.
- [2] F. Codecà, «On battery State of Charge estimation: a new mixed algorithm.,» *IEEE*, vol. 04, nº 1, p. 6, 2008.
- [3] K. B. Jana Kalawoun, «From a novel classification of the battery state of charge estimators,» *Elsevier*, nº 279, p. 13, 2015.
- [4] M. Coleman, «State of charge determination from EMF voltage Estimation Using Impedance, terminal voltage, and current for lead acid and lithium ion batteries,» *IEEE*, vol. 54, nº 5, p. 8, 2007.
- [5] S. R. Danny Montenegro, «AnEstimation Method of State of Charge and Lifetime for Lead-Acid Batteries in Smart Grid Scenario,» *IEEE*, p. 6, 2015.
- [6] A. A. Mahmud, «Performance study of lead acid baterry in a solar car under different traffic and weather conditions,» Bangladesh, 2014.
- [7] C. H. L. Ligeng Guo, «The SOC estimation of battery based on the method of improved Ampere-hour and Kalman filter,» 2015.
- [8] D. F. Alayeto, «Circuito para la medición de la carga y la salud de baterías. Trabajo Fin de Carrera,» Universidad Politecnica de Cataluña, 2011.
- [9] M. Á. C. Valdez, Determinación del estado de carga de baterías plomo-ácido utilizando redes neuronales, Cuernavaca, MOR, Noviembre 2004.
- [10] C. D. B. Mellado, «Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido Kalman,» Tesis doctoral, Universidad De Chile, 2013.

# Anexo 1

Trabajo Fin de Grado

“Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido:  
diseño y validación experimental”

## ÍNDICE

1. RESUMEN .....	3
2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA.....	3
2.1 ENSAYOS DE DESCARGA.....	3
2.2 RESISTENCIA INSTANTÁNEA.....	7
3. PSEUDOCÓDIGO .....	8
4. DETERMINACIÓN DE K <sub>p</sub> .....	10
5. ALGORITMO FINAL .....	13

## 1. RESUMEN

En el presente anexo se encuentra información complementaria a la memoria.

## 2. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA

### 2.1 ENSAYOS DE DESCARGA

En la tabla 1 se muestra la información más relevante de los estados de carga disponibles.

Nº ensayo	Fecha	$I_{descarga}$
Ensayo 1	17-jul-12	29,5 A
Ensayo 2	18-jul-12	29,5 A
Ensayo 3	22-mar-12	46 A
Ensayo 4	23-mar-12	64 A

Tabla 1. Ensayos de descarga

Todos los ensayos fueron realizados en 2012, y los ensayos 1 y 2 han sido realizados a corriente nominal.

### ENSAYO 1

En la figura 1 se muestran el estado de carga, tensión de circuito abierto, la tensión de la batería, la corriente y la resistencia frente al tiempo.

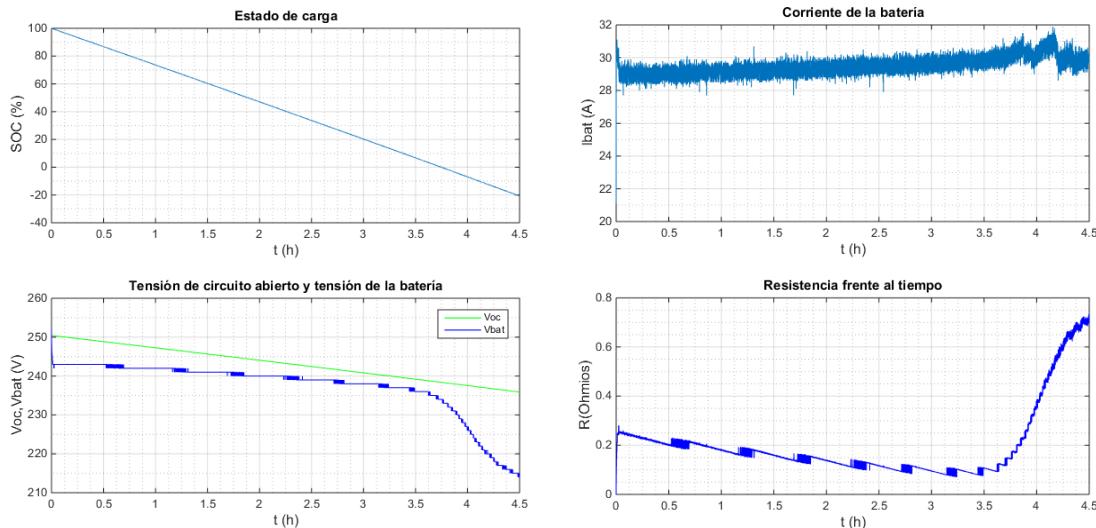


Figura 1. Ensayo descarga 1

La corriente del ensayo es de 29,5 A, que aproximadamente coincide con la corriente nominal de la batería.

El final del ensayo fue determinado la tensión de la batería ( $V_{bat}$ ). Cuando la tensión alcanzó los 217 V se dejó de extraer energía de la batería. Recordar que la tensión de corte no es sencilla de determinar y depende del criterio de parada elegido. Puede observarse como, en la gráfica de la resistencia frente al tiempo, al principio la resistencia se encuentra en torno a  $0,2\Omega$ , y a partir de las 3,5 horas esta comienza a incrementarse hasta los  $0,6\Omega$ . Concordando con lo visto anteriormente de que, cuando la batería se encuentra próxima a descargarse las pérdidas aumentan. En la figura 2 se representa la evolución de la resistencia frente al estado de carga.

## Anexo 1

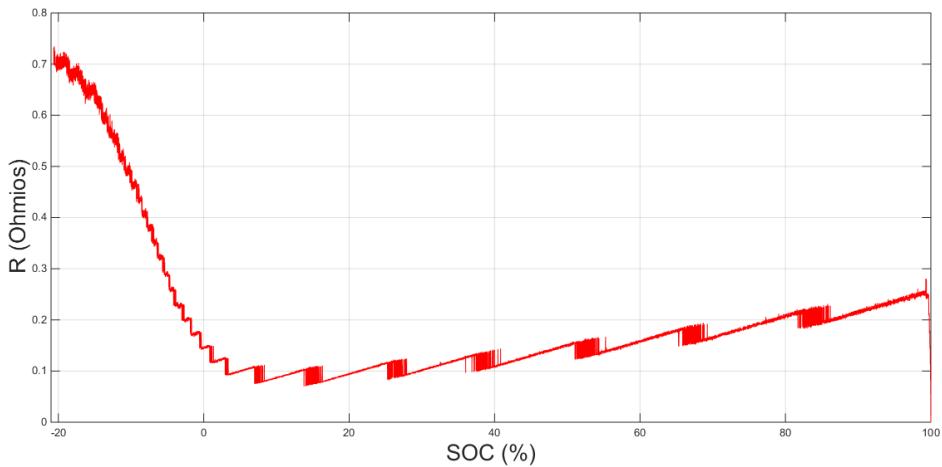


Figura 2. Resistencia obtenida en el ensayo descarga 1 frente al SOC

Llama la atención el hecho de que se alcancen SOC negativos, cuando es físicamente imposible. Es debido a que se ha tomado como referencia la capacidad nominal del ensayo 2 (110 Ah). Sin embargo, la capacidad obtenida en el ensayo 2 es de 130 Ah. Al poder extraer más energía que la marcada por el ensayo 2 se obtienen valores de resistencias en estado de cargas negativos.

## ENSAYO 3

El siguiente ensayo corresponde a una corriente de descarga de 46 amperios. En la figura 3 se muestra el estado de carga, la tensión de la batería y de circuito abierto, la corriente y la resistencia frente al tiempo.

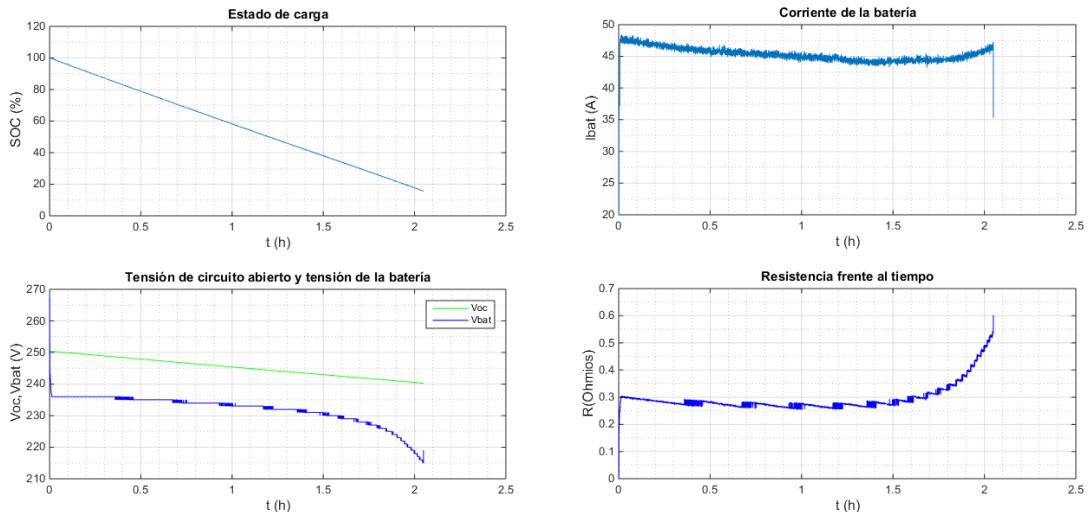


Figura 3. Ensayo descarga 3

El ensayo termina a las 2 horas, mientras que el ensayo anterior terminó tras 4 horas y media. A mayor corriente mayores pérdidas, y por ello el tiempo del ensayo se reduce. Las pérdidas también son reflejadas en el valor de la resistencia, que durante las primeras 1,5 horas se mantiene aproximadamente a 0,3 Ω. A partir de la hora y media aumenta hasta 0,8 Ω debido a que a valores bajos de SOC las pérdidas son mayores. En la gráfica de la tensión, la tensión de la batería disminuye más rápidamente conforme el estado de carga va decreciendo. Reflejando la no linealidad entre estos parámetros. Además, la tensión inicial es de 236 V, mientras que en el ensayo 1 es de 242 V. Analizando el modelo Thevenin empleado en la estimación, este

resultado es totalmente coherente. A mayor corriente, mayor caída de tensión en la resistencia y por tanto, la tensión en bornes disminuye.

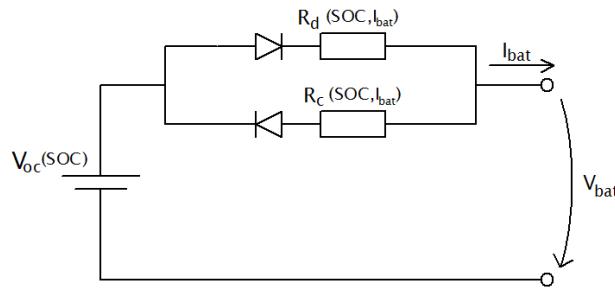


Figura 4. Modelo Thevenin elegido para la estimación de  $V_{bat}$ .

En la figura 5 se reprenda la resistencia del ensayo 3 frente al estado de carga:

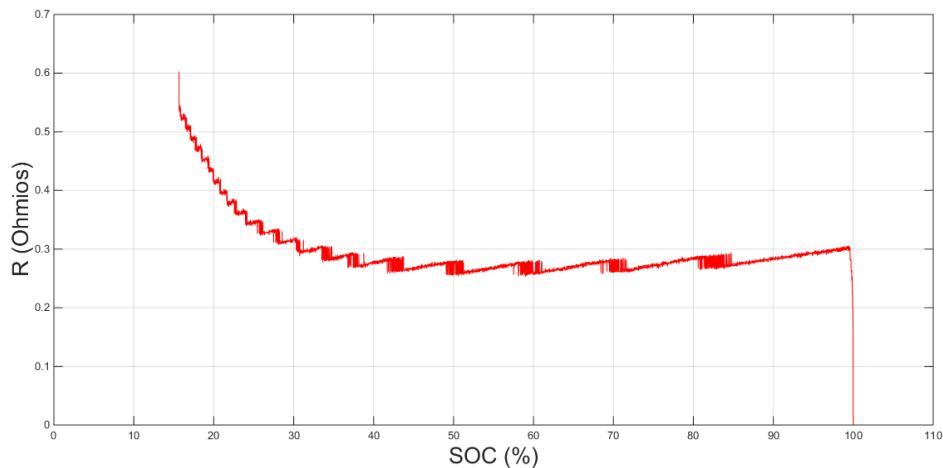


Figura 5. Resistencia obtenida en el ensayo descarga 3 frente al SOC

A diferencia del ensayo 1, en el ensayo 3 no se obtienen valores para estados de carga próximos a cero. La capacidad obtenida en este ensayo es de 91,5 Ah, 20 Ah menos que la tomada como referencia (110 Ah). El origen del problema es suponer que la capacidad de la batería no varía en función de la corriente. Conforme mayor es la corriente mayores son las pérdidas y por tanto menor es la capacidad disponible. Por ello, como líneas futuras se propone otorgar a la capacidad dependencia con la corriente.

#### **ENSAYO 4**

El último ensayo corresponde a una corriente de 64 amperios. Al igual que en los ensayos anteriores, en la figura 6 se muestra la evolución temporal del estado de carga, las tensiones, la corriente y la resistencia.

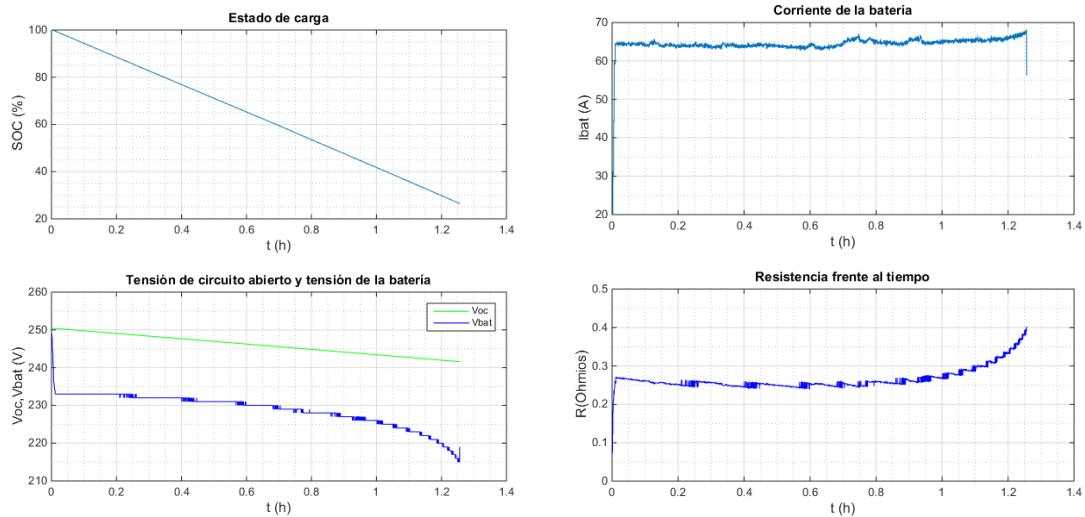


Figura 6. Ensayo descarga 4

Como era de esperar, el ensayo termina en un menor tiempo que los otros ensayos, puesto que la corriente es más alta que los anteriores. En la gráfica de la resistencia frente al tiempo se observa como la tendencia de  $R$  es menos acusada que en otros ensayos, variando entre  $0,25 \Omega$  y  $0,4 \Omega$ .

En la figura 7 se muestra la resistencia obtenida frente al estado de carga, donde al igual que en el ensayo 3, no existen valores de resistencia para estados de carga bajos.

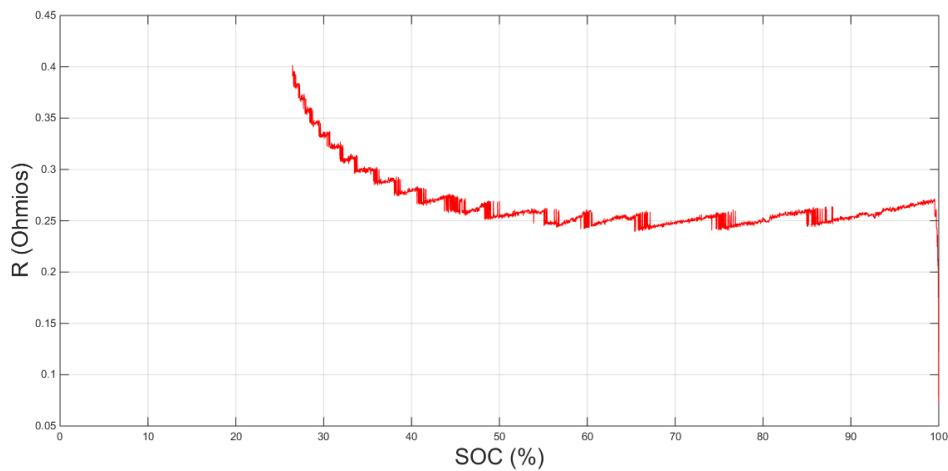


Figura 7. Resistencia obtenida en el ensayo descarga 3 frente al SOC

## 2.2 RESISTENCIA INSTANTÁNEA

En el presente apartado se encuentran otro ensayo realizado para la obtención de la resistencia instantánea.

En la figura 8 se representa la tensión y la corriente para la semana del 6 de septiembre de 2012, y en la figura 9 se ha aplicado el algoritmo para calcular el estado de carga y la resistencia instantánea.

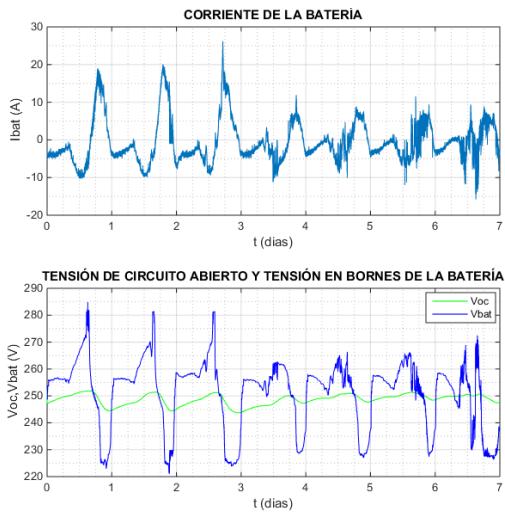


Figura 8. Tensión y corriente para los datos del 06/09/2012

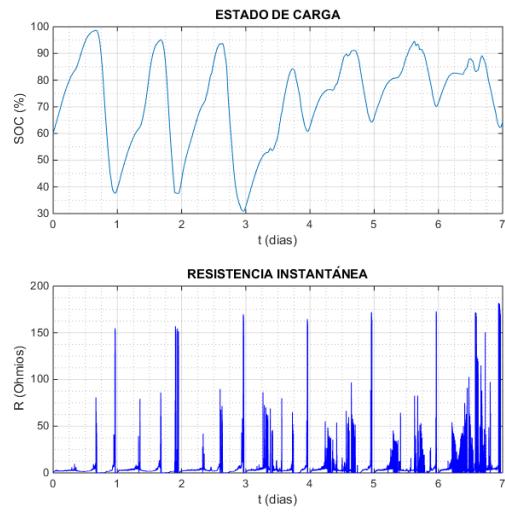


Figura 9. Resistencia instantánea frente a bajas corrientes

Puede observarse que el rango de resistencias es muy extenso, llegándose a alcanzarse resistencias superiores a los  $150\ \Omega$ . Como ya se ha comentado en la memoria, en el cálculo de la resistencia instantánea en el denominador se encuentra la corriente de la batería, por tanto, a muy bajas corrientes la resistencia se dispara. En la figura 10 y 11 se ha representado la resistencia en función de la corriente. Cuanto más se aproxima la corriente a cero mayor valores alcanza la R.

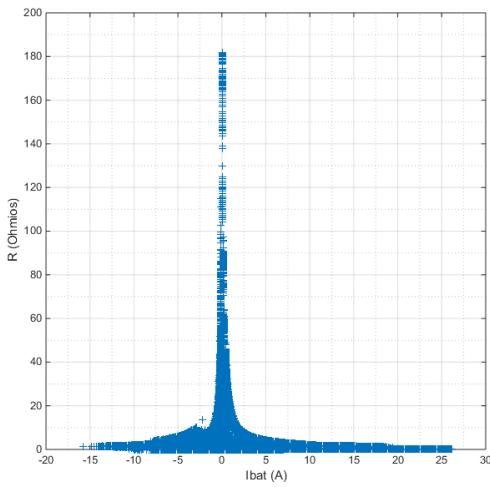


Figura 10. Resistencia instantánea en función de la corriente para los datos del 06/09/2012

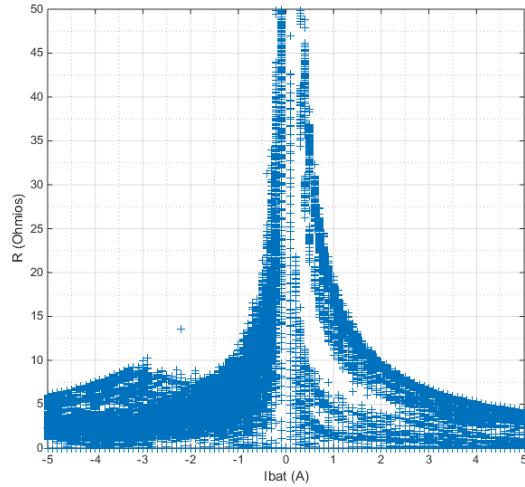


Figura 11. Resistencia instantánea frente a bajas corrientes

### 3. PSEUDOCÓDIGO

El pseudocódigo (o falso lenguaje) es una descripción de alto nivel compacta e informal del principio operativo de un programa informático u otro algoritmo. Está diseñado para la lectura humana en lugar de la lectura mediante máquina, y con independencia de cualquier otro lenguaje de programación.

A modo facilitar la compresión del funcionamiento del algoritmo, se ha decidido elaborar un pseudocódigo:

#### %% DEFINICIÓN DE VARIABLES

SOC	Estado de carga (Expresado de 0 a 1).
Ibat	Corriente de la batería [A].
Vbat	Tensión en bornes de la batería [V].
Voc	Tensión de circuito abierto [V].
Vbat_estimada	Tensión estimada por el algoritmo [V].
t	Instante de tiempo expresado en segundos.
rend_bat	Rendimiento de la batería.
C	Capacidad nominal de la batería [Ah].
$\beta_c$	Factor de corrección de la resistencia en carga.
$\beta_d$	Factor de corrección de la resistencia en descarga.
R	Resistencia de la batería.
e	Error absoluto cometido en la estimación de la tensión [V].
Kp	Constante del regulador proporcional.
Incremento_SOC	Incremento de SOC proveniente de la etapa de regulación.
$R_c$	Resistencia obtenida en el ensayo de carga.
$R_d$	Resistencia obtenida en los ensayos de descarga.

-----INICIO DE PROGRAMA-----

#### %% CALCULO DEL SOC

```
SOC(t)=SOC(t-1)-rend_bat/(C·3600) ·Ibat(t)+Incremento_SOC(t-1);
% Restricciones Físicas
Si SOC(t)<0 limitar a cero;
Si SOC(t)>1 limitar a 1;
```

#### %% ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO

```
Voc(t)=120 ·(2,1-0,1005 ·(1-SOC(t)));
```

#### %% ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA

```
En caso de que Ibat(t)<0
 $\beta_c=-0,72947 \cdot Ibat(t)+0,81;$ 
Si  $\beta_c>2,5$  entonces limitar a 2,5;
Si  $\beta_c<1$  entonces limitar a 1;
R(t)=  $\beta_c \cdot R_c$ 
```

```
En caso de que Ibat(t)>0
 $\beta_d=1,0221 \cdot Ibat(t)+1,1087$ 
Si  $\beta_d>6$  limitar a 6
Si  $\beta_d<1$  limitar a 1
R(t)=  $\beta_d \cdot R_d$ 
```

%% ESTIMACIÓN DE LA TENSIÓN DE LA BATERÍA

Vbat\_estimada(t)=Voc(t)-R(t) · Ibat(t);  
 Si Vbat\_estimada(t)>288 voltios, limitar a 288V, puesto que es lo máximo permitido por el inversor

%% RENDIMIENTO DE LA BATERÍA

Si SOC(t)>0,8 y además Ibat(t)<0 entonces  
 rend\_bat=-5 · SOC(t)+5;  
 Para el resto de casos  
 rend\_bat=1;

%% REGULADOR PROPORCIONAL

e(t)=Vbat(t)-Vbat\_est(t);  
 Si SOC(t)=1 entonces comienza la histéresis  
 Si SOC(t)>0,80 y además e(t)>0 entonces  
 Kp=0;  
 Para el resto de casos  
 Kp=1,11 · 10<sup>-5</sup>;  
 Si SOC(t)<0,80 entonces termina la histéresis  
 Si SOC(t)<0,6 y además e(t)<0 entonces  
 Kp=0;  
 Para el resto de casos  
 Kp=1,11 · 10<sup>-5</sup>;

%% INCREMENTO DE SOC NECESARIO

Incremento\_SOC(t)=Kp · e(t);

-----FIN DE PROGRAMA-----

#### 4. DETERMINACIÓN DE K<sub>P</sub>

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos con una  $K_p=1,11 \cdot 10^{-5}$  pero sin ningún tipo de limitación en la regulación.

En la figura 12 se muestra el funcionamiento de la regulación para la semana del 1 de marzo de 2012. Para ello se muestran 3 gráficas, en la primera se muestran estado de carga para los 3 algoritmos (híbrido, coulombios y propuesto), en la segunda la corriente de la batería y en la tercera la tensión estimada por el algoritmo propio junto con la tensión en bornes.

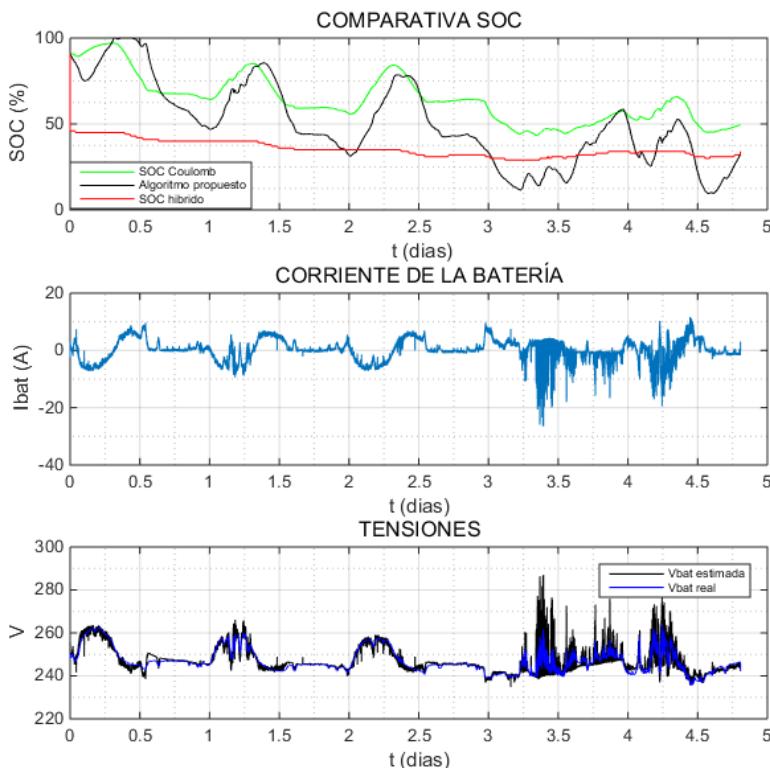


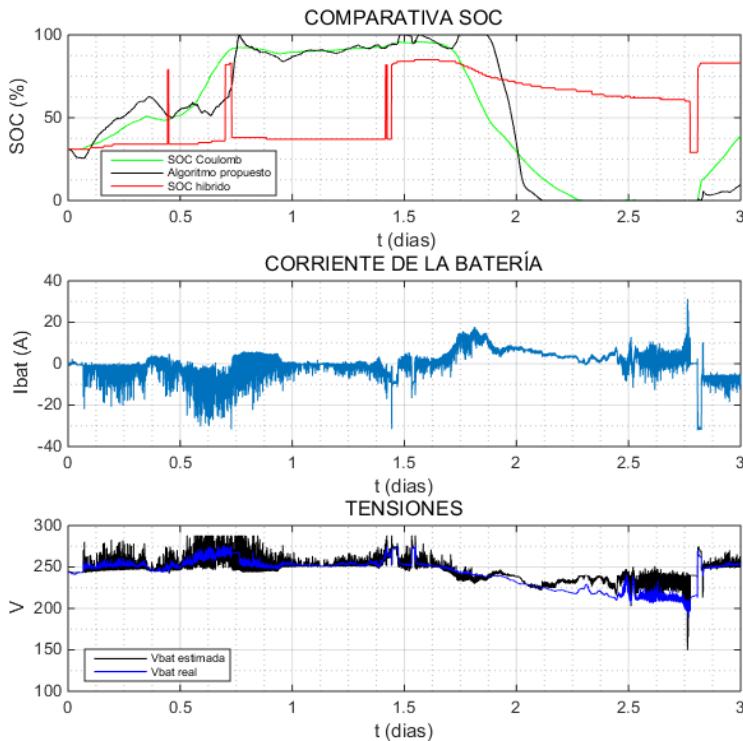
Figura 12. Prueba de  $K_p$  en datos 01/03/2012

Este ensayo destaca por la buena aproximación de la tensión estimada, viéndose reflejada en el SOC, puesto que las diferencias entre el contador de coulomb y el algoritmo propuesto son pequeñas.

También puede observarse como al comienzo del ensayo el híbrido da un escalón que hace disminuir su SOC un 40%. Tras 4 días de funcionamiento el estado de carga del algoritmo propuesto y el híbrido son muy parecidos, por lo que todo parece indicar que la regulación funciona correctamente.

En el instante de tiempo igual a 0,4 días el SOC del algoritmo propuesto alcanza el 100% durante varias horas mientras que el híbrido indica que se puede seguir extrayendo energía. Esta situación conviene evitarla a toda costa.

El siguiente ensayo a mostrar corresponde a la semana del 8 de marzo de 2012. En la figura 28 se muestra el estado de carga, la corriente y la tensión estimada y real.

Figura 13. Prueba de  $K_p$  en datos 08/03/2012

Analizando el estado de carga del algoritmo propuesto, se observa que presenta varios inconvenientes. El primero y más importante es el hecho de que entre el segundo y el tercer día el estado de carga permanece a cero, siendo tremadamente negativo para la estrategia de regulación. Además para los instantes de tiempo 0,7, 1,5 y 1,8 el SOC permanece al 100% durante horas. En definitiva, conviene limitar la regulación para evitar estos casos.

Analizando la tensión estimada, hasta el segundo día la estimación es correcta y sigue correctamente a la referencia. Sin embargo, a partir del segundo día aparece un error permanente que provoca que el estado de carga se mantenga a cero durante horas.

En la figura 29 y 30 se muestran los datos correspondientes a 2 ensayos diferentes, correspondientes a las semanas del 13 de septiembre y 23 de agosto de 2012 respectivamente. Se ha decidido analizarlos a la vez debido a sus similitudes. Al igual que los casos anteriores, se muestran el estado de carga, la corriente y las tensiones.

## Anexo 1

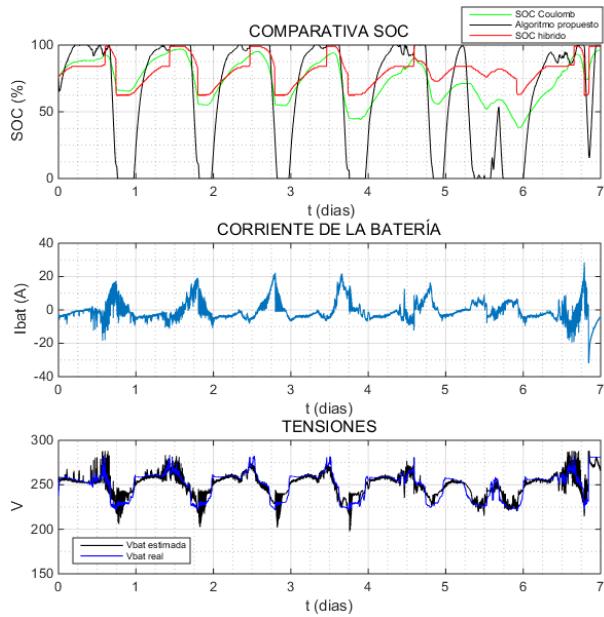


Figura 14. Prueba de  $K_p$  en datos 13/09/2012

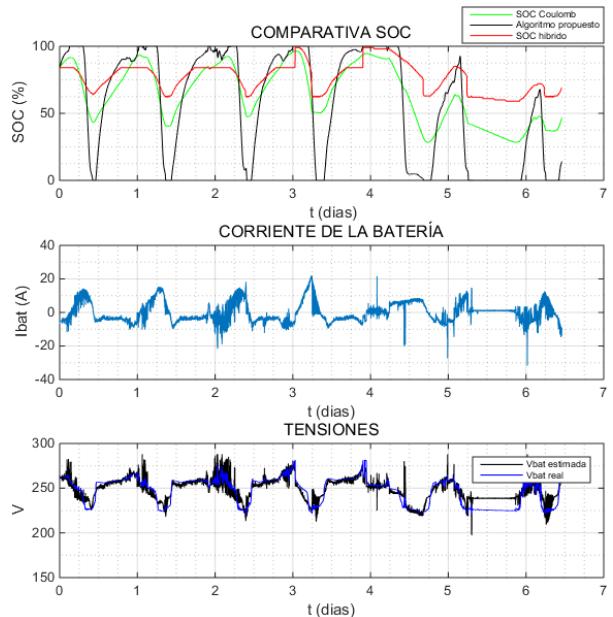


Figura 15. Prueba de  $K_p$  en datos 23/08/2012

En ambos ensayos la tensión estimada sigue correctamente a la referencia. Sin embargo, el SOC estimado varía demasiado rápido, saturando al 100% y al 0% en numerosas ocasiones durante y en un tiempo demasiado largo. Por otro lado, la variación de coulomb y del híbrido mucho menor. Definitivamente, podemos concluir que la regulación es excesiva y debe limitarse.

Por último, se muestran los datos del 30 de agosto y 3 de septiembre de 2012 en las figuras 16 y 17.

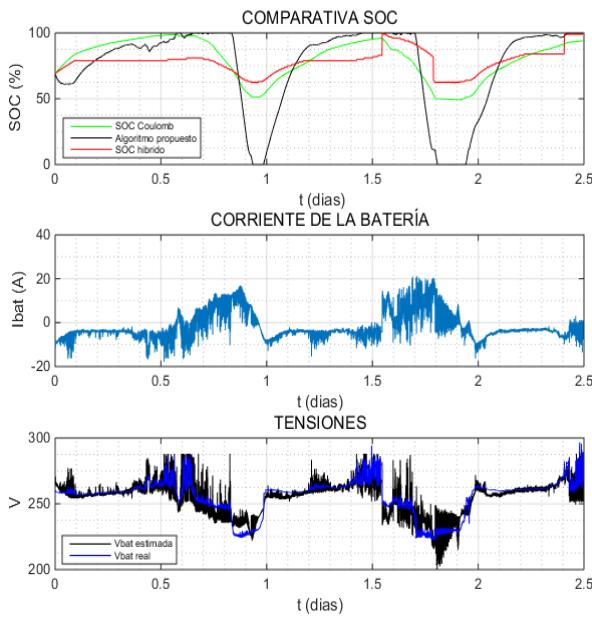


Figura 16. Prueba de  $K_p$  en datos 30/08/2012

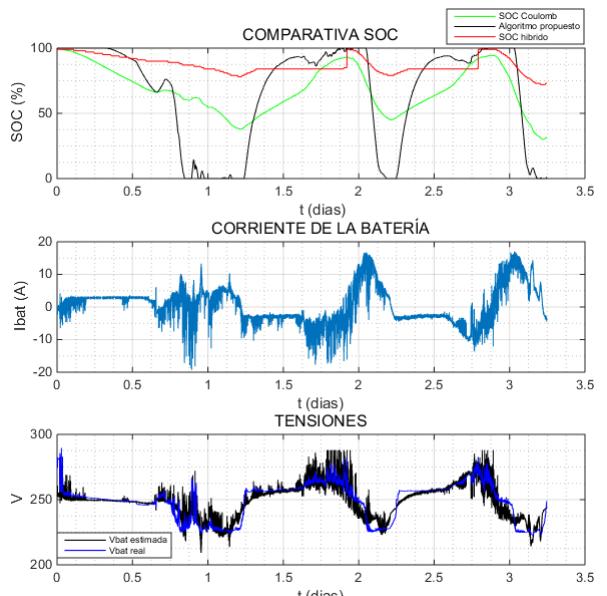


Figura 17. Prueba de  $K_p$  en datos 03/09/2012

Vuelven a repetirse los problemas anteriores, a pesar que la estimación de  $V_{bat}$  es correcta, el SOC satura repetidas veces, por lo que es necesario limitar para optimizar los resultados, obteniendo un SOC útil para las estrategias de regulación.

## 5. ALGORITMO FINAL

En el apartado 4 se muestran el resto de ensayos realizados para analizar el funcionamiento del algoritmo una vez caracterizado completamente. En la figura 18 se muestra la tensión y la corriente a lo largo de la semana del 23 de agosto de 2012.

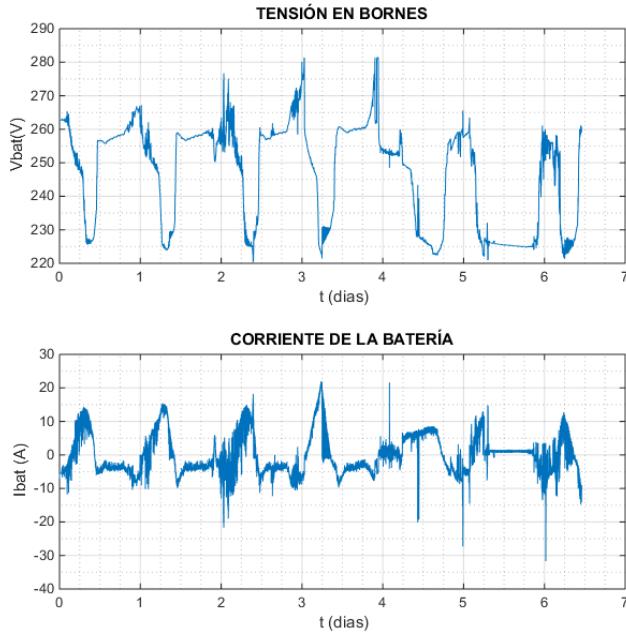


Figura 18. Tensión y corriente para los datos del 23/08/2012

Tras aplicar el algoritmo sobre la figura 18, en la figura 19 se muestra una comparativa entre el estado de carga obtenidos por los 3 algoritmos (Coulomb, híbrido y propuesto), junto con la corriente, la tensión estimada de cada uno de ellos y el error relativo cometido en la estimación de la tensión en bornes.

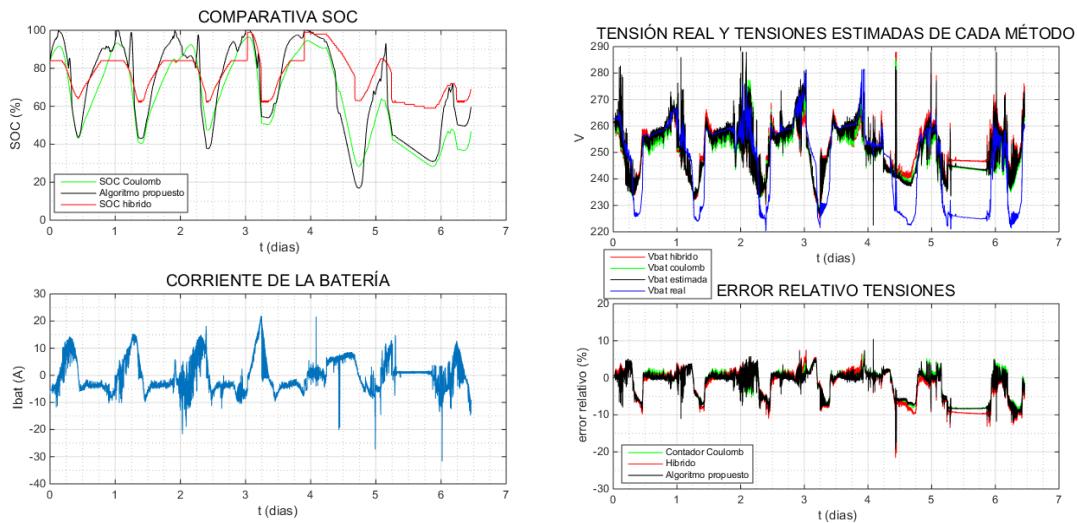


Figura 19. Resultados obtenidos en los datos 23/08/2012

El SOC propuesto (línea negra) alcanza el 100% a los 0,3, 1 y 1,8 días, mientras que el híbrido indica que puede seguirse extrayendo corriente. Al igual que en los ensayos anteriores, el híbrido opera con una capacidad estimada mayor a los 110 Ah puesto que varía mucho menos en el tiempo.

## Anexo 1

No obstante, en los días 3,1 y 3,8 los 3 algoritmos se encuentran muy próximos al 100%. Además se observa como el híbrido da un escalón repentino, intuyendo que las estimaciones que realizaba anteriormente no eran del todo correctas. Por ello, el SOC propuesto es correcto.

Por último, entre los días 5 y 6 se observa que la tensión estimada eses mucho mayor a la real, provocando un error permanente de más de medio día de duración. Sin embargo, se ha limitado la regulación cuando el SOC sea menor al 60% y el error negativo, por ello el estado de carga no llega a cero rápidamente. Lo cual demuestra el acierto en las restricciones en la regulación.

El siguiente ensayo corresponde a la semana del 30 de agosto de 2012. Se muestran los datos de tensión y corriente en la figura 20.

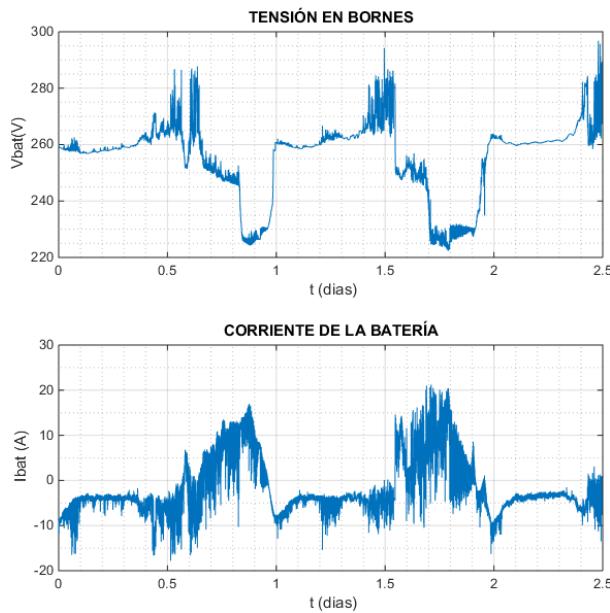


Figura 20. Tensión y corriente para los datos del 30/08/2012

En la figura 21 se muestran los resultados tras aplicar el algoritmo. En concreto, se muestra una comparativa del estado de carga, de las tensiones y del error relativo cometido en la tensión estimada entre el algoritmo del híbrido, el de Coulombios y el propuesto.

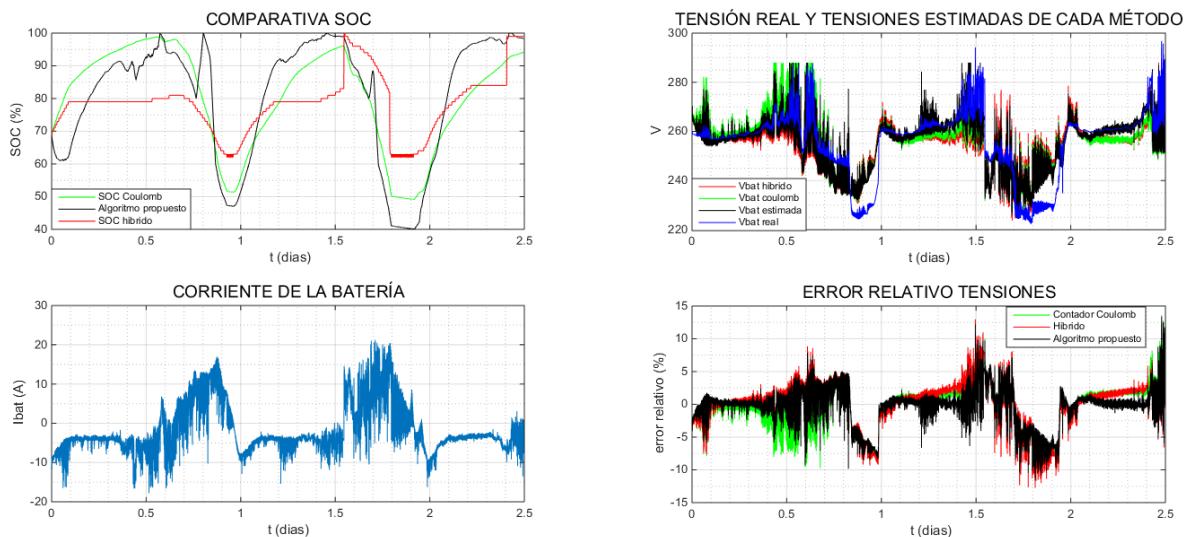


Figura 21. Resultados obtenidos en los datos 30/08/2012

Analizando el error relativo, se aprecia como en carga la estimación es más precisa que en descarga, principalmente debido a que en descarga se dan mayores corrientes. En los días igual a 0,8 y 1,8 se observa como la tensión real describe una trayectoria con forma de campana, mientras que la tensión estimada no. En el modelo de la batería no se ha incluido ni la respuesta dinámica (Siendo necesaria la inclusión de condensadores) ni la inercia del sistema, por lo que la tensión estimada no es capaz de seguir la trayectoria.

En el instante igual a 0,8 días se observa como el SOC propuesto aumenta del 80% al 100% rápidamente, mientras que el contador de Coulombios disminuye, puesto que el sistema se encuentra descargando. El incremento de SOC predomina sobre el contador de Coulomb y provoca que el estado de carga aumente a pesar de que el sistema se encuentre en descarga.

En los instantes igual a 1,6 y 2,4 días ambos SOC alcanzan simultáneamente el 100%, por lo que todo parece intuir que la estimación es correcta.

Por último, se va a analizar el ensayo de la semana del 3 de septiembre de 2012.

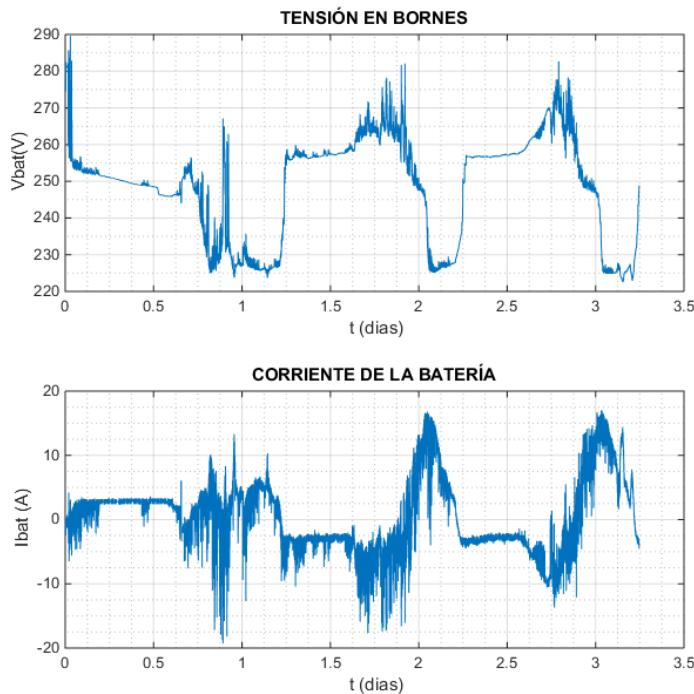


Figura 22. Tensión y corriente para los datos del 03/09/2012

En la figura 22 se muestra la tensión y corriente disponible, que son los datos de entrada disponibles para la estimación del estado de carga. Se ha aplicado el algoritmo y en la figura 38 se muestran los resultados.

## Anexo 1

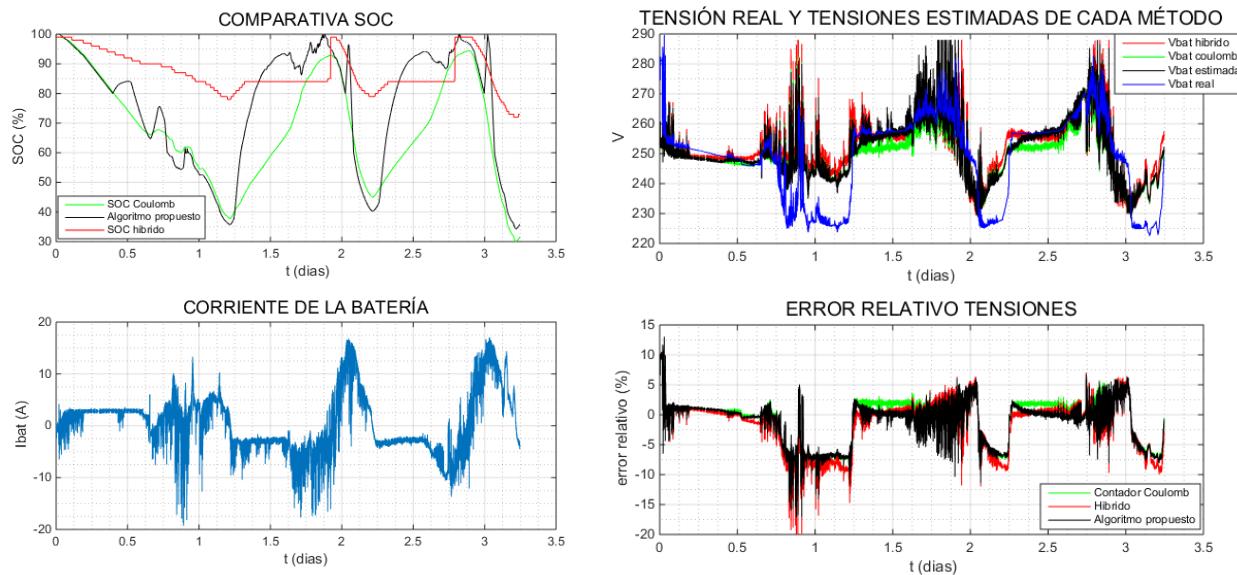


Figura 23. Resultados obtenidos en los datos 03/09/2012

Al igual que en el ensayo anterior, el error relativo en descarga es mayor al conseguido en carga. En cuanto el estado de carga, los resultados son positivos. En ningún momento se alcanza la descarga completa y cuando el SOC es igual al 100% le acompaña tanto el híbrido como el contador de Coulombios.