

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

Viabilidad técnica de baterías de segunda vida de vehículos eléctricos en aplicaciones de movilidad eléctrica: análisis y validación experimental



Máster Universitario en Energías Renovables: Generación Eléctrica

Trabajo Fin de Máster

Alumno: Juan José Molina Alcalá

Tutoras: Elisa Braco Sola e Idoia San Martín Biurrun

Pamplona, 12 de septiembre de 2021

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Proyecto Fin de Máster
Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica

Viabilidad técnica de baterías de segunda vida de vehículos eléctricos en aplicaciones de movilidad eléctrica: análisis y validación experimental

Alumno:

Juan José Molina Alcalá

Tutora:

Elisa Braco Sola

Personal Investigador Predoctoral en Formación

Tutora:

Idoia San Martín Biurrun

Profesor Contratado Doctor

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer la ayuda y la confianza que he recibido por parte de mis tutoras Elisa Braco e Idoia San Martín, sin ellas este Trabajo no hubiera sido posible. Nos hemos estado reuniendo todas las semanas para realizar un buen seguimiento y eso ha hecho que esté muy motivado. Me han guiado y me han solucionado todos los problemas y dudas que he tenido.

A Meña, que siempre ha confiado en mí, hasta en los momentos en los que yo no lo hacía.

A mis hermanos, porque con su ejemplo de superación.

A mis padres, por haber permitido que estudiase el máster. Siempre me han apoyado, siempre me han ayudado y siempre han estado detrás para proporcionarme cualquier cosa que necesitara. Me han enseñado que, con constancia, esfuerzo y paciencia, se consiguen grandes cosas.

RESUMEN

En este Trabajo se va a comprobar la viabilidad técnica de una batería de segunda vida en dos situaciones diferentes. Por un lado, se ha analizado la posibilidad de utilizar una batería en una estación de carga de una línea de autobús urbano eléctrico y pionera situada en Pamplona. Por otro lado, se ha estudiado el comportamiento de una batería para una aplicación de autoconsumo residencial.

Para un estudio completo, se ha dividido el Trabajo en dos fases, una fase de simulación en donde se pretende estudiar y analizar la potencia, la intensidad, el trasiego de energía, etc. de la batería ante las dos situaciones que se acaban de comentar y, posteriormente, cuando se sepa cómo evoluciona la batería en cada situación, se llevará a cabo el estudio en un entorno experimental para ver cómo evoluciona la batería, si es fiable o no el modelo de simulación y para obtener unos resultados experimentales que sirvan para lograr unas conclusiones férreas que indiquen si realmente es viable técnicamente una batería de segunda vida.

En el Trabajo se han estudiado una celda nueva y una celda de segunda vida y, además, una batería de segunda vida de BeePlanet y una batería relativamente nueva de la marca LG. Todo ello para poder comprobar las diferencias que existen entre una celda/batería nueva con respecto a una celda/batería de segunda vida.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO	1
2. METODOLOGÍA Y MATERIAL.....	3
3. CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES DE LAS CELDAS Y LAS BATERÍAS	7
4. ESTRATEGIA DE MOVILIDAD.....	12
4.1. Principio de la estrategia de movilidad	12
4.2. Simulación.....	14
4.3. Resultados de simulación.....	16
5. ESTRATEGIA DE AUTOCONSUMO	29
5.1. Principio de la estrategia de autoconsumo, simulación y resultados.....	29
6. EXPERIMENTACIÓN	35
6.1. Ciclador	35
6.2. Microrred.....	47
6.2.1. Estrategia de autoconsumo.....	47
6.2.2. Estrategia de movilidad.....	53
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	62
8. BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO I	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: datos experimentales de la celda FL.....	8
Tabla 3-2: datos experimentales de la celda SL.....	8
Tabla 3-3: datos experimentales de la batería BeePlanet.....	8
Tabla 3-4: datos experimentales de la batería LG.....	9
Tabla 3-5: degradación de la celda SL para DOD del 20 %	9
Tabla 3-6: degradación de la celda SL para DOD del 50 %	10
Tabla 3-7: degradación de la celda FL para DOD del 20 %	10
Tabla 3-8: degradación de la celda FL para DOD del 50 %	11
Tabla 4-1: características principales del sistema con una celda FL.....	21
Tabla 4-2: resultados de la simulación durante los tres meses de la celda FL	22
Tabla 4-3: características principales del sistema con una celda SL.....	23
Tabla 4-4: resultados de la simulación durante los tres meses de la celda SL	23
Tabla 4-5: características principales del sistema con la batería LG.....	26
Tabla 4-6: resultados de la simulación durante los tres meses de la batería LG	26
Tabla 4-7: características principales del sistema con la batería BeePlanet.....	28
Tabla 4-8: resultados de la simulación durante los tres meses de la batería BeePlanet	28
Tabla 5-1: principales resultados de las celdas FL y SL.....	32
Tabla 5-2: principales resultados de la batería LG y BeePlanet.....	32
Tabla 6-1: resultados de la estrategia de movilidad para la celda FL con duración de un mes...	41
Tabla 6-2: resultados de la estrategia de movilidad para la celda SL con duración de un mes...	42
Tabla 6-3: resultados de la estrategia de autoconsumo para la celda SL y FL.....	46
Tabla 6-4: resultados de la estrategia de autoconsumo para la batería BeePlanet	49
Tabla 6-5: resultados de la estrategia de autoconsumo para la batería LG	52
Tabla 6-6: características de la batería LG.....	52
Tabla 6-7: características de la batería BeePlanet.....	53
Tabla 6-8: resultados principales de la microrred y de la simulación para la batería BeePlanet de la estrategia de movilidad.....	58
Tabla 6-9: resultados principales de la microrred y de la simulación para la batería LG de la estrategia de movilidad.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: situación de los tipos de vehículos en circulación en la Unión Europea en el año 2020. Fuente ACEA	1
Figura 2-1: resumen de la metodología del Trabajo.....	4
Figura 2-2: esquema de la microrred.....	5
Figura 2-3: interfaz del ordenador principal del ciclador.....	6
Figura 3-1: ensayo de las celdas FL y SL.	7
Figura 4-1: estación de carga del autobús de la línea 9.....	12
Figura 4-2: resumen de la estrategia de movilidad.....	14
Figura 4-3: modelo eléctrico de la simulación	14
Figura 4-4: implementación del modelo eléctrico en matlab	15
Figura 4-5: modelo eléctrico con valores para diferente SOC + modelo de degradación en donde se diferencia el nº de EFC para dos DOD distintas	16
Figura 4-6: potencia de la batería en la semana donde se alcanza el SOC mínimo (semana 5)..	17
Figura 4-7: SOC de la batería en la semana donde se alcanza el SOC mínimo (semana 5)	17
Figura 4-8: Comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales	18
Figura 4-9: potencia del autobús, SOC e intensidad de la celda FL.....	19
Figura 4-10: comparación del SOC en condiciones reales y en condiciones ideales.....	20
Figura 4-11: comprobación de la intensidad de descarga	20
Figura 4-12: Comprobación del funcionamiento del sistema a partir de los parámetros principales	21
Figura 4-13: comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales para LG	24
Figura 4-14: intensidad para el día 37 según la simulación para LG	24
Figura 4-15: potencia de la batería, potencia de la red, potencia del autobús y SOC para la batería LG.....	25
Figura 4-16: comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales para BeePlanet.....	27
Figura 4-17: intensidad para el día 37 según la simulación para BeePlanet	27
Figura 5-1: resumen de la estrategia de autoconsumo residencial	30
Figura 5-2: resultados de la primera semana de la batería LG	33
Figura 5-3: SOC de la batería LG durante los primeros días de abril	34
Figura 6-1: programación de la estrategia de movilidad de forma manual.....	36
Figura 6-2: ciclado de la celda FL obtenido por simulación y el que se programará en el ciclador para el sábado.....	37
Figura 6-3: ciclado ampliado de la celda FL obtenido por simulación y el que se programará en el ciclador	38
Figura 6-4: SOC de la celda FL para el lunes según el ciclador y según simulación para la celda FL	39
Figura 6-5: comparación entre la intensidad obtenida por simulación, obtenida según el ciclador y la que se pretendía programar en el ciclador para la celda FL	39
Figura 6-6: SOC de la celda FL para el lunes según el ciclador y según simulación para la celda SL	40
Figura 6-7: comparación entre la intensidad obtenida por simulación, obtenida según el ciclador y la que se pretendía programar en el ciclador para la celda SL	40
Figura 6-8: intensidad que se pretende programar en el ciclador y la obtenida por simulación. Las descargas corresponden con el .txt y las cargas se introducen de forma manual	44
Figura 6-9: programación para la estrategia de autoconsumo en el ciclador	44
Figura 6-10: intensidad de simulación, intensidad que se pretende programar en el ciclador e intensidad que se da en el ciclador	45

Figura 6-11: SOC que la celda FL consigue en simulación y la que consigue en el ciclador el martes	45
Figura 6-12: SOC que la celda FL consigue en simulación y la que consigue en el ciclador el jueves.....	46
Figura 6-13: potencia de carga-descarga de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días.....	48
Figura 6-14: SOC de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días	48
Figura 6-15: intensidad de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días	49
Figura 6-16: potencia de carga-descarga de la batería LG en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días	50
Figura 6-17: funcionamiento de la batería LG en los 8 primeros días	51
Figura 6-18: SOC de la batería LG en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días ..	51
Figura 6-19: potencia de simulación y potencia en la microrred de la batería BeePlanet.....	54
Figura 6-20: SOC de la batería BeePlanet en la microrred y en simulación	55
Figura 6-21: SOC de la batería BeePlanet entre las 09:00 y las 12:00 del lunes	55
Figura 6-22: potencia de la batería BeePlanet entre las 07:00 y las 12:00 del lunes.....	56
Figura 6-23: SOC de la batería BeePlanet tras aplicar fillgaps	56
Figura 6-24: potencia de la batería BeePlanet tras aplicar fillgaps	57
Figura 6-25: tensión de la batería BeePlanet el lunes	57
Figura 6-26: intensidad de la batería BeePlanet el lunes.....	58
Figura 6-27: potencia de la batería LG.....	59
Figura 6-28: SOC de la batería LG	59
Figura 6-29: intensidad de la batería LG.....	60
Figura 6-30: tensión de la batería LG.....	60
Figura A-1: datasheet de la batería BeePlanet.....	66
Figura A-2: datasheet de la batería LG	67

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Actualmente se están desarrollando una serie de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de los automóviles en al menos un 55 % de aquí a 2030 en comparación con los niveles del año 1990 [1]. Las medidas de los gobiernos de la UE han hecho que la venta de vehículos eléctricos aumentase un 262.8% en el año 2020 con respecto al 2019 [2] .

En 2020 el 10.5% de los vehículos que se vendieron eran eléctricos, frente al 11.9% y el 75.5% vehículos híbridos y combustibles convencionales, respectivamente. El 2.1% restante corresponde con combustibles alternativos [2]. En la Figura 1-1 se puede ver la situación actual de los vehículos que estuvieron en circulación en el año 2020 en la Unión Europea.

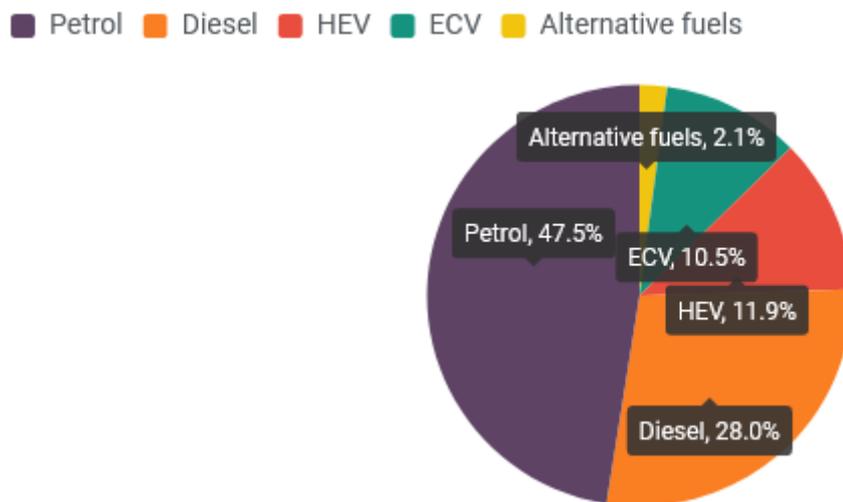


Figura 1-1: situación de los tipos de vehículos en circulación en la Unión Europea en el año 2020. Fuente ACEA

Tras el evidente crecimiento del número de vehículos eléctricos en circulación, se debe pensar en qué va a suceder con las baterías cuando éstas lleguen al final de su vida útil, situación que se da cuando su capacidad se reduce en un 20 %. Actualmente esas baterías o bien se llevan a vertederos, o se reciclan para obtener la materia prima. Sin embargo, esas baterías tienen un 80 % de su capacidad inicial, esto implica que pueden ser explotadas en unas circunstancias menos exigentes que las que requiere un coche eléctrico de forma que se amortice más la inversión inicial puesto que se alargará su vida útil.

En el presente Trabajo se van a estudiar dos estrategias de reciclado muy concretas:

- Carga rápida del autobús de la línea 9 de Pamplona: el autobús de la línea 9 de Pamplona tiene un punto de carga en el Aulario, para cargar el autobús se necesitan potencias en torno a los 250 kW. En este Trabajo se estudiará si es viable la utilización de una batería de segunda vida para disminuir la potencia que suministra la red eléctrica [3].
- Autoconsumo residencial: se trata de un sistema basado en el “Peak Shaving” combinado con el “Energy shift”. Consiste en almacenar energía en horas valle

para utilizarla en horas pico, reduciendo la potencia contratada y el coste mensual de la electricidad. El sistema cuenta con una instalación fotovoltaica que cargará la batería cuando tengamos energía sobrante (consumo inferior a la producción) [4].

Lo que se pretende con el estudio de las dos estrategias es conocer el comportamiento de una batería, tanto nueva como de segunda vida, ante diferentes ciclados. El hecho de que se estudie una batería nueva y otra de segunda vida permitirá ver sus diferencias para poder compararlas y, de este modo, obtener unas conclusiones coherentes puesto que se necesita saber “con respecto a qué es bueno o no el comportamiento de una batería de segunda vida”.

2. METODOLOGÍA Y MATERIAL

En este Trabajo se han desarrollado varias herramientas para poder simular las estrategias y analizar los datos experimentales, además, se cuenta con el material del laboratorio de Energías Renovables de la UPNA para poder validar los resultados que se han obtenido en simulación. Por ello, es importante dedicar un capítulo para conocer la metodología que se ha seguido y el material del que se dispone.

En la parte teórica del Trabajo se implementará un modelo eléctrico y un modelo de degradación que permita simular el comportamiento de una batería de una forma realista. El objetivo es conocer, a priori, cómo se va a degradar la batería (cuánto disminuye su capacidad y cuánto aumenta su resistencia) ante dos estrategias con ciclados completamente diferentes y el comportamiento de la misma.

Las herramientas que se han desarrollado han sido dos, una para cada estrategia. Dichas herramientas son capaces de predecir la degradación y el comportamiento de la batería a partir de unos datos de entrada: tensión en circuito abierto y resistencia interna para diferentes estados de carga y degradación de una celda en función del número de ciclos completos equivalentes para diferentes profundidades de descarga.

Las simulaciones que se han llevado a cabo son para dos celdas diferentes, una de primera vida y otra de segunda vida, ambas con distinta capacidad. También se ha simulado el comportamiento de dos baterías, una batería de primera vida de la marca LG, y otra batería de segunda vida de BeePlanet.

No se dispone de los datos de degradación de las baterías BeePlanet y LG, pero sí de su resistencia interna y de su tensión en circuito abierto, suficiente para obtener un modelo eléctrico fiable.

La segunda parte del Trabajo consiste en una fase de experimentación. Se ha llevado a cabo tras una comprobación exhaustiva de los datos de simulación. Esta fase cuenta con dos herramientas fundamentales: la microrred y el ciclador.

En la Figura 2-1 se puede ver la metodología seguida en el Trabajo:

1. Se simulan las estrategias de forma ideal y, posteriormente, se obtienen los datos de las celdas FL y SL (primera y segunda vida) y de las baterías BeePlanet y LG. Los datos se obtienen a partir de un ensayo, en el caso de las celdas el ensayo se realiza en el ciclador, las baterías se han ensayado en la microrred. Los datos obtenidos son: resistencia interna, tensión de circuito abierto y degradación de las celdas (disminución de la capacidad y aumento de la resistencia interna).
2. Se programa el modelo de eléctrico en ambas estrategias y, en el caso de las celdas, también se programa el modelo de degradación.
3. Se analizan los datos a conciencia de que no ha habido errores en la programación. En este punto se sabe cómo se comportan las celdas y las baterías.

4. Se programan las estrategias en el ciclador, en donde se estudiarán las celdas FL y SL. La programación de las baterías BeePlanet y LG se llevará a cabo en la microrred.

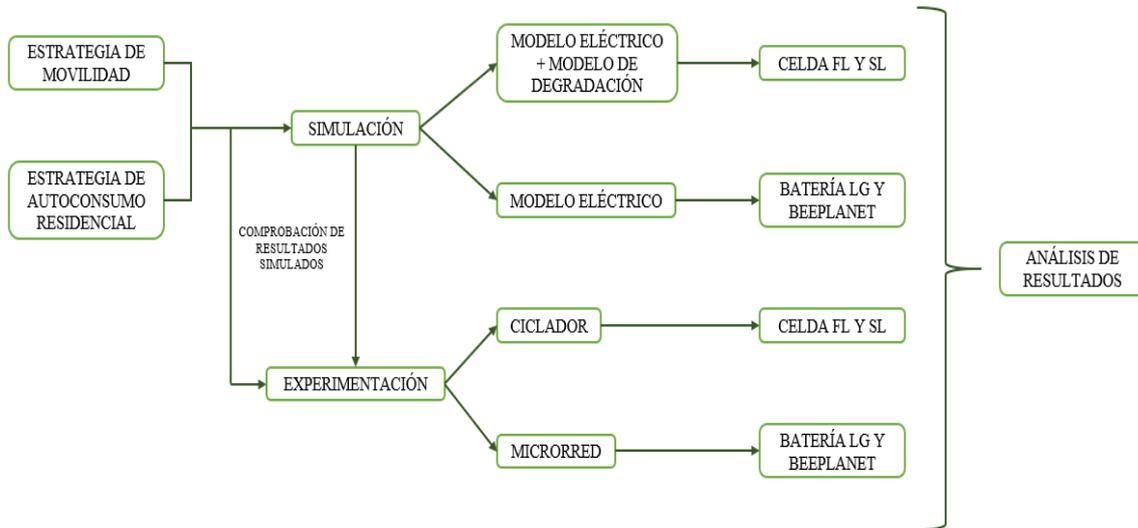


Figura 2-1: resumen de la metodología del Trabajo

Microrred

La microrred es un entorno real situado en la UPNA cuyo fin es la experimentación de cualquier estrategia en donde se estudian diferentes aspectos relacionados con las energías renovables.

Los componentes de la microrred son los siguientes:

- Paneles fotovoltaicos que constituyen una potencia total de 3.6 kWp.
- Inversor para los paneles fotovoltaicos.
- Dos inversores para las baterías cuya corriente máxima de 50 A.
- Dos baterías, una de la marca LG y otra de la marca BeePlanet. Véase ANEXO I para analizar el datasheet de cada batería.
- Cargas críticas compuestas por una bombilla de baja potencia.
- Ordenador que interactúa con la microrred. Será donde se programen las estrategias y de donde se extraerán los datos y resultados objeto de análisis.
- Ordenador de control. Éste está conectado directamente con la microrred, sirve de puente entre el ordenador en donde se programarán las estrategias y la microrred.

De los componentes de la microrred, el campo fotovoltaico, así como las cargas críticas y el inversor que pasa de corriente continua a alternas, no se utilizarán puesto que el

consumo y la energía fotovoltaica son emulados en base a datos medidos previamente en la microrred para poder comparar escenarios similares.

El esquema de la microrred se puede apreciar en la Figura 2-2.

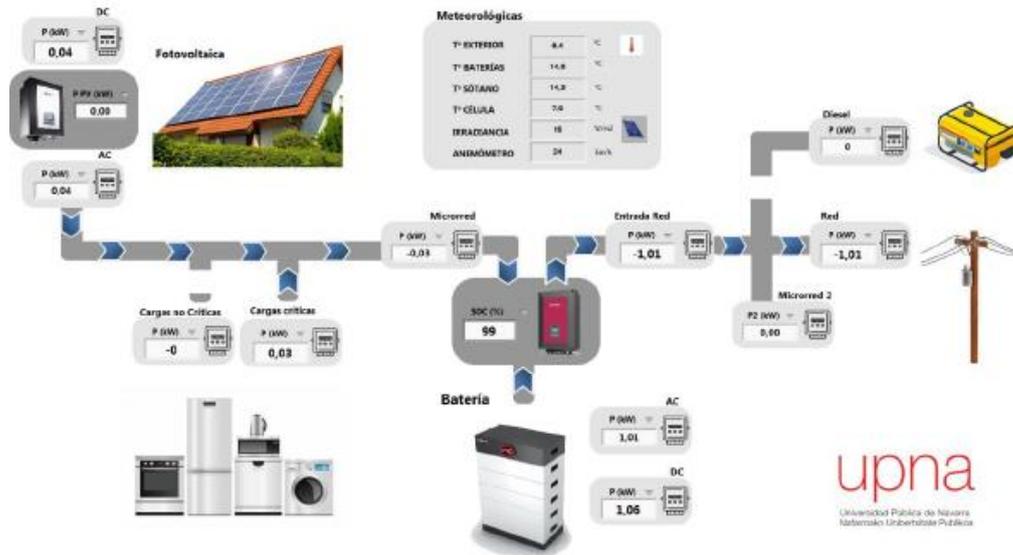


Figura 2-2: esquema de la microrred

Ciclador

El ciclador es un sistema cuyo entorno de trabajo se reduce al estudio íntegro de celdas de batería, se trata de un sistema con una metodología completamente diferente a la microrred. La principal diferencia con respecto a la microrred es que aquí no se puede programar la estrategia en lazo cerrado.

Los componentes principales del ciclador son:

- Celdas de baterías.
- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) desde donde se controlan las celdas (intensidad de carga y descarga, se descargan los datos, se programan las estrategias, etc.).
- Ordenador principal que lanza las estrategias y el perfil que las celdas van a seguir.

En la Figura 2-3 se puede ver la interfaz del ordenador desde donde se controlan las celdas.



Figura 2-3: interfaz del ordenador principal del ciclador

El ciclador consta de un conjunto de canales, en cada canal se puede poner una celda. La corriente máxima de carga-descarga no podrá ser superior a 50 A y la tensión en bornes de la celda estará dentro del rango 2.5 y 4.15 V.

Los canales pueden en paralelo para conseguir una intensidad de 100 A si la estrategia de estudio lo requiere. La estrategia de movilidad requerirá que cada celda tenga dos canales puesto que las corrientes de descarga serán de 70 A y 90 A.

3. CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES DE LAS CELDAS Y LAS BATERÍAS

Este capítulo pretende seguir un orden coherente con el Trabajo y, aunque se trata de una parte experimental (el Capítulo 6 trata sobre la fase experimental del Trabajo) es importante conocer los datos de partida con los que se ha realizado la simulación de cada estrategia (Capítulo 4 y Capítulo 5). Destacar que, la fase de simulación se desarrolló antes que la fase experimental, pero conforme el Trabajo fue avanzando, la fase de simulación ha tenido que ser actualizada.

Se trata de un capítulo en donde se indican cómo se han obtenido las características de las celdas FL y SL y las baterías BeePlanet y LG.

Para conocer la capacidad, la tensión de circuito abierto y la resistencia interna de las celdas y las baterías, éstas se deben ensayar. Las celdas y las baterías se han ensayado según la Figura 3-1: tres ciclos a 1/3 C, 3 ciclos a 0.5 C con rest de una hora, 5 ciclos a 1/3 C y una descarga a 0.5 C con rest al 90 %, al 70 %, al 50 %, al 30 % y al 10 %.

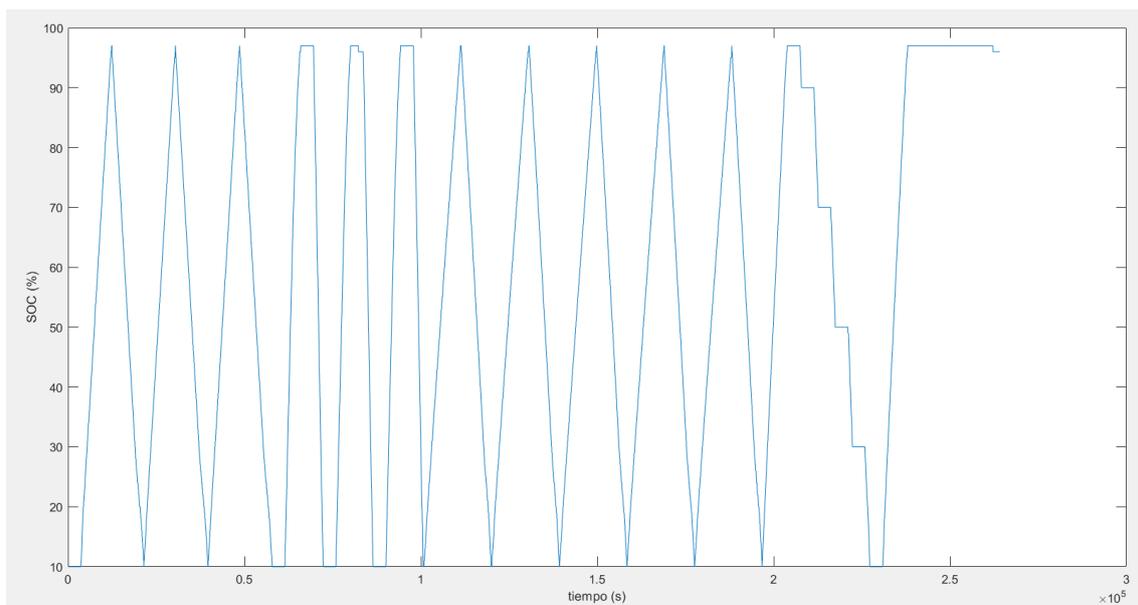


Figura 3-1: ensayo de las celdas FL y SL.

Tras el ensayo realizado para las dos celdas y las dos baterías, los resultados de las celdas FL y SL fueron los que aparecen en la Tabla 3-1 y en la Tabla 3-2 respectivamente, los datos de ensayo de las baterías BeePlanet y LG se pueden apreciar en la Tabla 3-3 y en la Tabla 3-4. Estos datos no se corresponden con los datasheet que se encuentran en ANEXO I puesto que han estado sometidas a numerosos ciclados con anterioridad.

La celda FL y la celda SL tienen una capacidad de 58.22 Ah y 45.75 Ah, respectivamente. Por otro lado, la batería BeePlanet tiene una capacidad energética de 3361 Wh, que es superior a la capacidad energética de la batería LG (2232 Wh).

Tabla 3-1: datos experimentales de la celda FL

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	1.8	1.36	1.31	1.33	1.37	1.57
Tensión de circuito abierto (V)	4.14	4.09	4	3.93	3.83	3.64
Capacidad (Ah)	58.22					
Tensión nominal (V)	3.75					

Tabla 3-2: datos experimentales de la celda SL

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	6.8	1.83	1.82	1.85	1.86	2.11
Tensión de circuito abierto (V)	4.14	4.05	4	3.93	3.81	3.58
Capacidad (Ah)	45.75					
Tensión nominal (V)	3.75					

Tabla 3-3: datos experimentales de la batería BeePlanet

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	196.07	91.57	84.41	92.92	89.78	88.05
Tensión de circuito abierto (V)	98.1	94.2	92.8	91.1	88.2	81.6
Capacidad (Ah)	37.08					
Capacidad energética (Wh)	3361					

Tabla 3-4: datos experimentales de la batería LG

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	196.1	10.04	9.6	9.17	8.09	11.20
Tensión de circuito abierto (V)	57.7	55.8	53.5	51.4	50.1	48.7
Capacidad (Ah)	44.54					
Capacidad energética (Wh)	2232					

La resistencia interna de la batería LG cuando el SOC es del 100 % no es realista, por lo que se descartará para la simulación.

Las resistencias de la batería BeePlanet es mayor que la de la batería LG y, del mismo modo, la celda SL tiene resistencias superiores a la de FL, esto se debe a que son celdas y baterías de segunda vida. Es decir, celdas/baterías más envejecidas.

Para el Trabajo no se dispone de los datos de degradación de las baterías BeePlanet y LG, aunque se tenga el datasheet de las baterías, no se sabe cuántos EFC (ciclos completos equivalentes) han realizado con anterioridad. Sin embargo, sí se conoce cuánto disminuye la capacidad y cuánto aumenta la resistencia interna con respecto a EFC de las celdas SL y FL. Los datos de degradación de los que se dispone son para un DOD (profundidad de descarga) del 20 % y para el 50 % para ambas celdas. El ciclado se ha llevado a cabo a una temperatura de 45 °C.

Tabla 3-5: degradación de la celda SL para DOD del 20 %

EFC	C (%)	R (%)
0	100	100
223.9	87.7	113.58
478.7	70	149.77
984.1	50	215.53

Tabla 3-6: degradación de la celda SL para DOD del 50 %

EFC	C (%)	R (%)
0	100	100
110	99.6	103.07
220.3	98.5	99.43
302.9	98	104.71
413	96.7	106.93
495.6	95.8	105.86
605.5	95	106.47
715.1	93.2	107.05
798	92.1	109.76

Tabla 3-7: degradación de la celda FL para DOD del 20 %

EFC	C (%)	R (%)
0	100	100
168.7	95.8	101.31
450.8	91	105.77
686.4	86.9	109.65

Tabla 3-8: degradación de la celda FL para DOD del 50 %

EFC	C (%)	R (%)
0	100	100
93.7	93.4	100.4
246.9	89.3	106.6
500	83.6	115.8
746.9	79.3	129

4. ESTRATEGIA DE MOVILIDAD

En este capítulo se detallará en qué consiste la estrategia de movilidad. Se describirá cómo se ha programado en Matlab y cuáles son los datos de partida (celdas, baterías y perfil de ciclado). Por último, se mostrarán y analizarán los resultados que se han obtenido por simulación.

4.1. Principio de la estrategia de movilidad

En el Aulario de la UPNA (Universidad Pública de Navarra) hay una estación de carga para autobuses. En ese punto de carga se necesitan potencias muy altas para cargar los autobuses (en torno a 250 kW). Se pretende disminuir la potencia que la red suministra al autobús de la línea 9 desde 250 kW a 74 kW utilizando una batería de segunda vida.

En la Figura 4-1 se observa el balance de potencias y los componentes principales de la estación de carga.

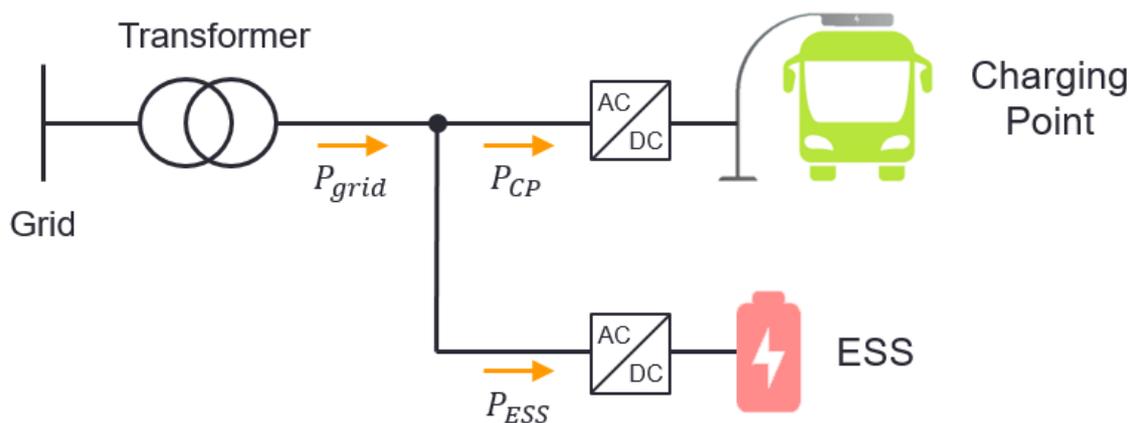


Figura 4-1: estación de carga del autobús de la línea 9

El balance de potencias es el que aparece en la Ecuación 1.

$$P_{CP} = P_{grid} + P_{ESS} \quad (1)$$

Donde

P_{CP} : Potencia de carga del autobús.

P_{grid} : Potencia de la red.

P_{ESS} : Potencia de carga-descarga de la batería de segunda vida.

A continuación se explica en qué consiste la estrategia de movilidad.

1. Cuando el autobús esté cargando necesitará una potencia de 250 kW, de los cuales 176 kW los suministra la batería y 74 kW procederán de la red.
2. Cuando el autobús se cargue la batería se cargará a una potencia tal que no pueda ser superior a la potencia máxima de red, 74 kW. Es decir, se conoce el estado de carga (en adelante SOC) de la batería, de modo que se sabe cuánta energía necesita hasta cargarse al 100 %. Si conocemos el tiempo que hay entre autobuses se puede calcular a qué potencia se tiene que cargar la batería hasta cargarse al 100 % antes de que venga el siguiente autobús (Ecuación 2), sin embargo, si la potencia a la que se debe cargar la batería es superior al límite máximo de la red la batería se cargará a 74 kW, en ningún momento la red puede superar ese límite. Si por el contrario la batería tiene un SOC alto tras marcharse el autobús y necesita, por ejemplo, 50 kW para cargarse antes de que venga el siguiente autobús, la red cargará la batería a 50 kW y no al límite superior.

$$\frac{E_{bat,ref} - E_{bat,i}}{t_{prox.carga}} = P_{grid} = P_{ESS} \quad (2)$$

Donde

$E_{bat,ref}$: es la energía total de la batería, es decir, la energía de la batería cuando ésta tiene un SOC = 100 %.

$E_{bat,i}$: la energía que tiene la batería tras marcharse el autobús.

$t_{prox.carga}$: el tiempo que hay entre el autobús que se acaba de ir y el próximo.

3. Cuando ha pasado el último autobús del día, la batería deberá cargarse al 100 % antes de las 24:00 de ese día.

En la Figura 4-2 se puede ver un organigrama con el resumen de la estrategia, la secuencia sería la siguiente: si hay autobús se aplicará el balance de potencia de la Ecuación 1, si no hay autobús hay que calcular el tiempo que tardará el próximo autobús y con este tiempo calcular la potencia a la que la batería se tiene que cargar (Ecuación 2), si la potencia resultante es superior a 74 kW, la batería se cargará a 74 kW, si es inferior, la batería se cargará a dicha potencia. Subrayar que, si la potencia a la que se va a cargar la batería es inferior a 74 kW, puede ser por dos situaciones diferentes, porque sea el último autobús y por tanto hay mucho tiempo hasta las 24:00 (por ejemplo, dos horas) o porque la batería tiene un SOC alto y necesita cargarse a poca potencia para cargarse por completo hasta que venga el próximo autobús.

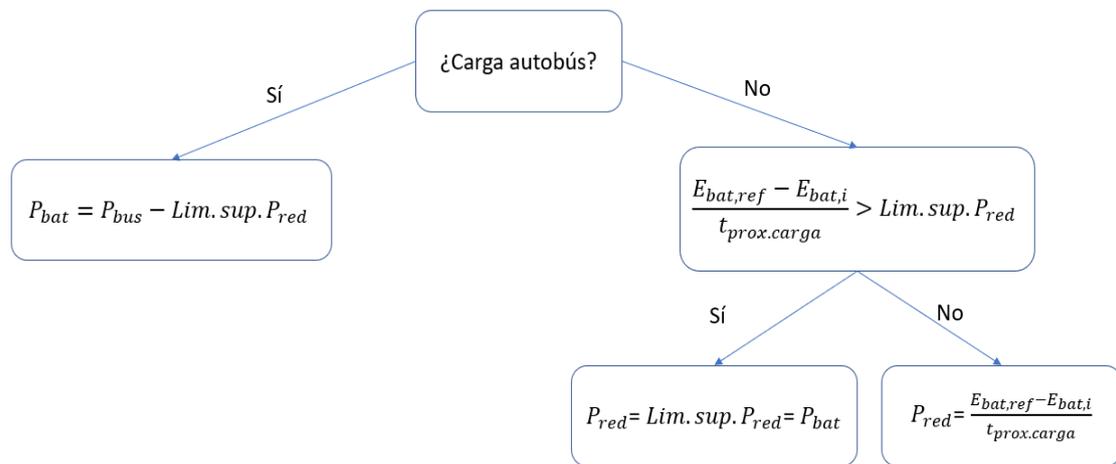


Figura 4-2: resumen de la estrategia de movilidad

4.2. Simulación

Los ensayos resultan de vital importancia puesto que los resultados de capacidad, resistencia interna y tensión de circuito abierto son imprescindibles para la programación del modelo eléctrico y el modelo de degradación.

Para la simulación de una celda o batería se pueden utilizar numerosos modelos, en función de su complicidad la simulación puede ser más o menos realista. Para el Trabajo se ha utilizado el modelo eléctrico de Figura 4-3.

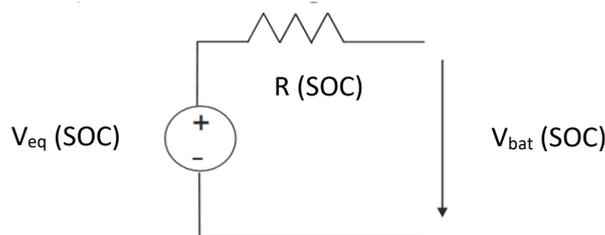


Figura 4-3: modelo eléctrico de la simulación

Los parámetros que aparecen en Figura 4-3 son:

V_{eq} : tensión de circuito abierto de la celda o de la batería.

R : resistencia interna de la batería o de la celda.

V_{bat} : tensión en bornes de la batería o de la celda.

Para la programación de la estrategia se ha utilizado el organigrama de la Figura 4-2, el balance de potencia de la Ecuación 1, el modelo eléctrico de la Figura 4-3, un modelo de degradación que a continuación se detallará y los datos experimentales obtenidos en los ensayos (Capítulo 3).

El modelo de degradación se ha implementado en la simulación de las celdas FL y SL, para dos profundidades de descarga diferentes.

En la simulación, que se ha realizado en Matlab, el modelo de degradación se actualizará cada día, es decir, cada día se obtiene el número de EFC que ha realizado la celda y, a partir de los datos de degradación en función del número de EFC se obtiene cuánto ha aumentado la resistencia y cuánto ha disminuido la capacidad. Por tanto, cada día se recalculan la resistencia y la capacidad a partir de los datos experimentales y del número de EFC.

El esquema (Figura 4-4), representa el funcionamiento del modelo eléctrico implementado:

1. Antes que nada, se deben leer los datos del Capítulo 3 para acudir a éstos (resistencia y tensión de circuito abierto para cada SOC).
2. Se debe calcular el tiempo que hay entre autobuses para poder obtener la potencia a la que debe cargar la batería.
3. Implementamos el modelo eléctrico según Figura 4-3 aplicando la Ley de Ohm.
4. Se calcula la energía y el SOC utilizando el organigrama de la Figura 4-2, la Ecuación 1.
5. Con el nuevo SOC volvemos al paso 3.

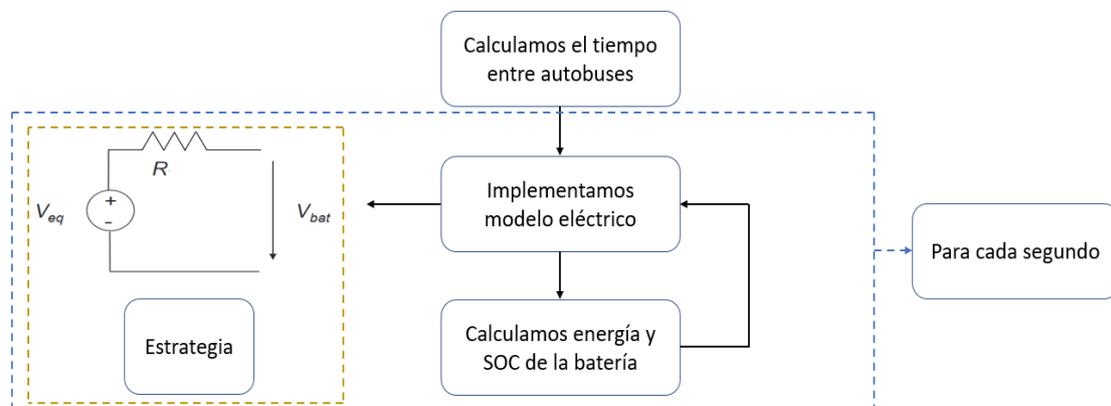


Figura 4-4: implementación del modelo eléctrico en matlab

Tras la implementación del modelo eléctrico se ha programado el modelo de degradación (Figura 4-5), su funcionamiento es:

1. Cada día se cuenta el número de EFC con la ayuda del comando *rainflowUPNA*, con este comando se cuenta el número de ciclos para cada DOD y, posteriormente, se obtiene el número de EFC de cada DOD.

- Como hay dos conjuntos de datos, uno para DOD del 20 % y otro para DOD del 50 %, sumaremos el número de EFC cuyo DOD es menor al 50 % por un lado y el número de EFC superior cuyo DOD es mayor al 50 % para, posteriormente, obtener la degradación de la batería a partir de los datos experimentales. Hay que hacer hincapié en este procedimiento porque la degradación es diferente para cada DOD.
- Una vez que se ha obtenido cuánto se ha degradado la celda en ese día para los dos conjuntos de EFC, se suman entre ellos (y al acumulado de los días anteriores) y se recalculan la capacidad y la resistencia. Los nuevos valores se actualizarán para que el modelo eléctrico realice los nuevos cálculos.

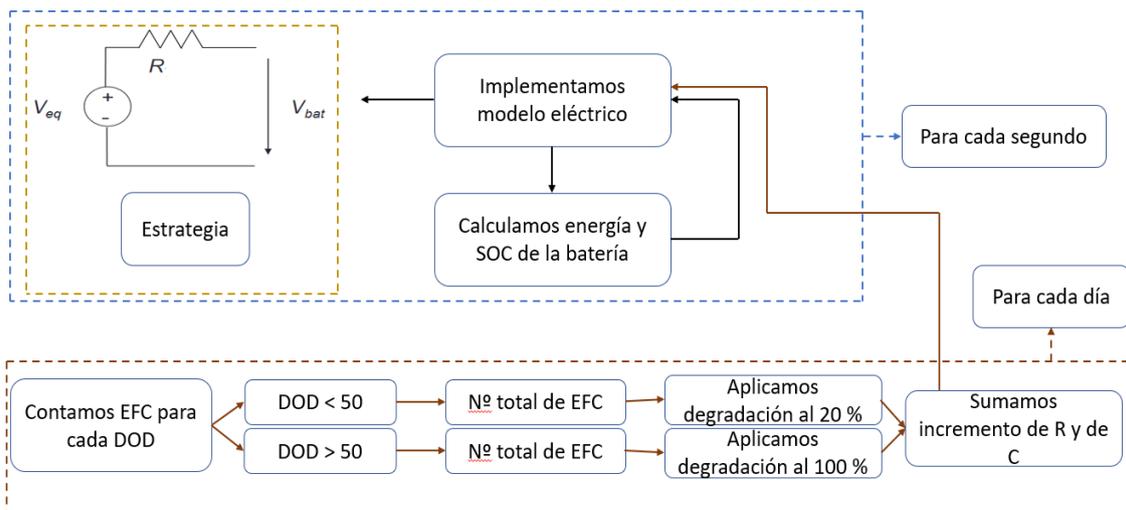


Figura 4-5: modelo eléctrico con valores para diferente SOC + modelo de degradación en donde se diferencia el nº de EFC para dos DOD distintas

4.3. Resultados de simulación

Para la simulación se dispone del perfil de carga y descarga del autobús durante un período de tres meses. La batería que se pretende utilizar tiene una capacidad energética de 80 kWh y deberá ser capaz de descargarse en torno a potencias de 140 kW.

En la Figura 4-6 se ve la potencia de la batería en la semana 5 (semana en donde se alcanza el SOC mínimo del 11 %), que es de 60 kW en carga y de 140 kW en descarga, en la Figura 4-7 se aprecia el SOC para dicha semana [3].

A priori se puede decir que según este dimensionamiento (batería con capacidad de 80 kWh) se cumple con el objetivo. El problema es que en estos datos no se ha tenido en cuenta la ni la degradación de la batería ni la resistencia interna, en este capítulo se verá cómo afectan estos dos parámetros.

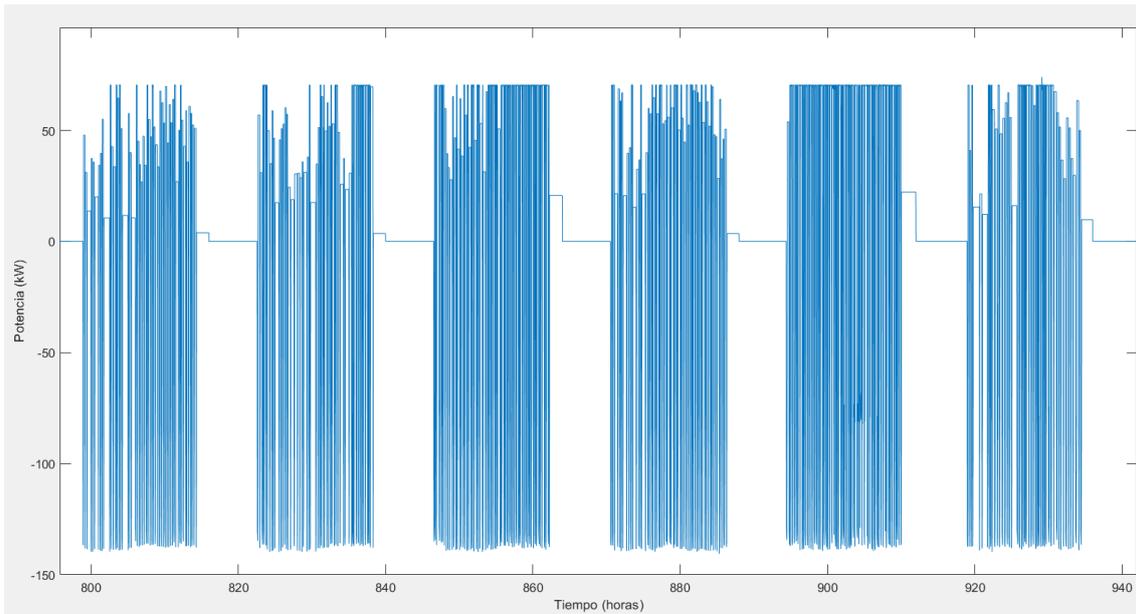


Figura 4-6: potencia de la batería en la semana donde se alcanza el SOC mínimo (semana 5)

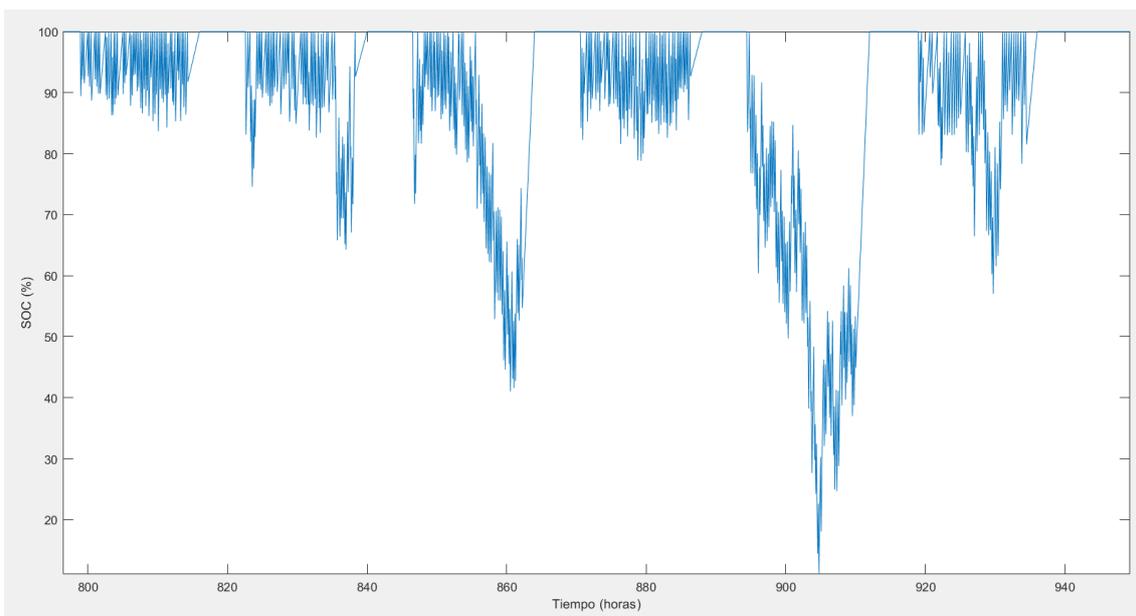


Figura 4-7: SOC de la batería en la semana donde se alcanza el SOC mínimo (semana 5)

En primer lugar, se analizarán las celdas FL y SL y, posteriormente, las baterías LG y BeePlanet.

Celda FL

Antes que nada, hay que tener claro que los resultados hay que esclarlos a las condiciones de celda. Esto significa que debemos pasar de un sistema en donde la capacidad de la batería es de 80 kWh a un sistema en donde hay una celda con una capacidad de 218 Wh, para ello se ha calculado un factor (Ecuación 3) que multiplicará a los datos de entrada (potencia real del autobús y potencia superior de la red).

$$factor = \frac{Capacidad\ energética_{celda\ Fl}}{Capacidad\ energética_{batería\ bus}} = \frac{218 \cdot 10^{-3} kWh}{80 kWh} = 0.0027 \quad (3)$$

En la Figura 4-7 se aprecia que el SOC mínimo es del 11 %, si introducimos el modelo de degradación y el modelo eléctrico lo que se produce es un cambio muy notorio con respecto a las condiciones ideales por dos razones: la celda experimentará una degradación que hará que su capacidad disminuya debido al gran número de EFC que realiza y por otro lado, aunque el rendimiento de Faraday esté entre el 99 % y el 97 % (dependiendo de la corriente), cada día la resistencia interna consume un 30 % de la capacidad energética de la batería (entre 50 Wh y 70 Wh cada día) y, conforme dicha resistencia aumenta debido a la ya nombrada degradación, la energía perdida (tanto en carga como en descarga) aumentará.

En la Figura 4-8 se ve la gran diferencia que hay el día 37 entre el SOC para condiciones ideales y el SOC para condiciones reales.

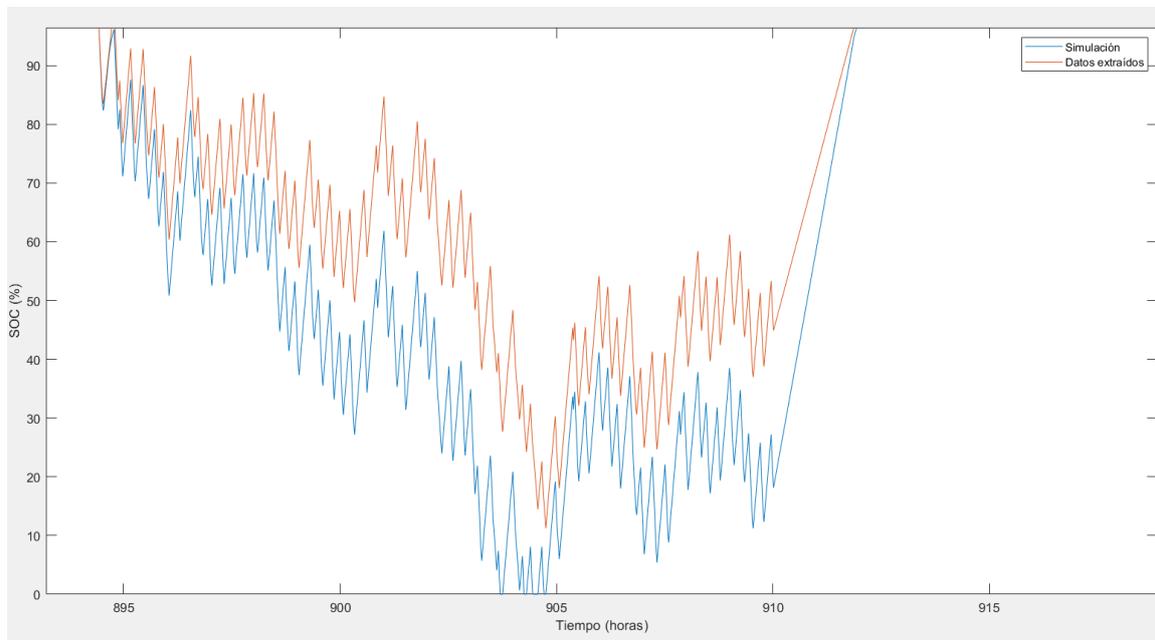


Figura 4-8: Comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales

Es interesante ver la intensidad que vamos a tener en nuestro sistema (Figura 4-11). Se comprueba que tenemos unas corrientes de descarga muy altas como para llevarlo a la experimentación puesto que en cada canal del ciclador, como máximo, podemos tener una intensidad de 50 A por canal. Destacar que el pico de intensidad es de 147 A, este pico se debe a que la tensión de la celda es muy bajo (recordar que el SOC también lo es).

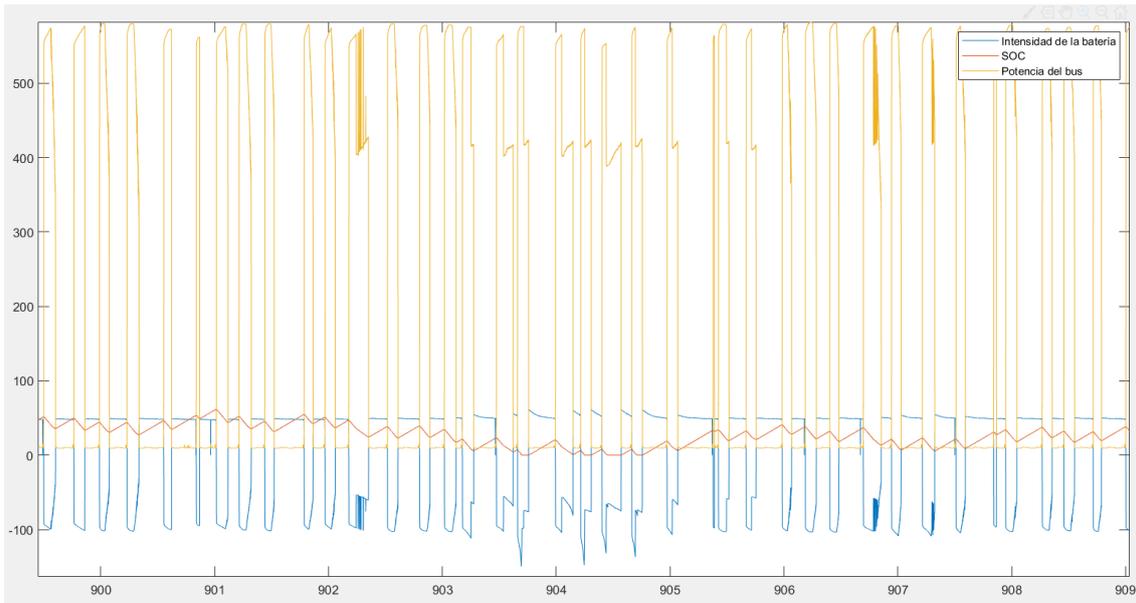


Figura 4-9: potencia del autobús, SOC e intensidad de la celda FL

De la Figura 4-8 podemos concluir que una batería real, en las condiciones que tenemos, no es suficiente para cumplir con el objetivo. Se aprecia que hay momentos en los que el SOC, en este caso de la celda FL, es 0. Esto se traduce en que el autobús se irá sin cargarse puesto que la batería que debe complementarse con la red se ha descargado por completo y no se suministrará la potencia necesaria para la carga del autobús. Esto ha ocurrido también con la celda SL y con las baterías BeePlanet y LG. La solución más inmediata es aumentar la potencia superior de la red haciendo que en ningún momento la celda baje del 10 %. Además, al descargar tanto la celda tendremos picos de corriente muy significativos (Figura 4-9). Por tanto, debemos aumentar la potencia superior de red de tal forma que asegure una corriente de descarga por debajo de los 100 A en todo momento para poder llevarlo al entorno experimental que se va a utilizar.

Para aumentar la potencia de la red multiplicaremos la potencia superior de red (74 kW) por un factor, dicho factor se ha calculado mediante simulación, es decir, se ha multiplicado por numerosos factores hasta encontrar el factor mínimo que hace que en ningún momento exista una corriente mayor a 100 A. Dicho factor es 1.15. De esta forma lo que tenemos son dos factores, uno que multiplicará a la potencia superior de red y a la potencia del autobús para escalar el sistema real a un sistema más pequeño para poder llevarlo posteriormente a la experimentación, y otro factor que multiplica solamente a la potencia superior de red.

En la Figura 4-10 se comprueba que aumentando la potencia de red el SOC de la celda no descenderá tanto y, como consecuencia, no habrá picos de corriente que puedan dañar el cicladoreo o la microrred (en donde la intensidad máxima también es de 50 A).

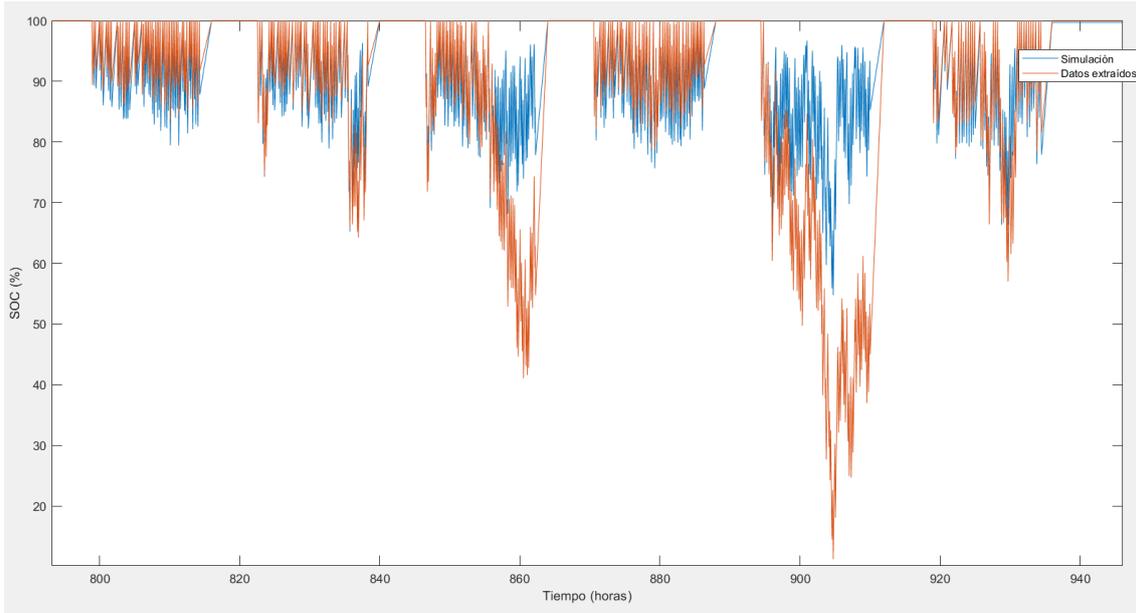


Figura 4-10: comparación del SOC en condiciones reales y en condiciones ideales

Aplicando el nuevo factor de 1.15 se ha asegurado el sistema, aunque se haya cambiado la estrategia original. En la Figura 4-11 se aprecia que la intensidad de descarga no llega nunca a los 100 A. Se ha puesto este límite porque se ha decidido que se pondrán dos canales en paralelo de forma que la corriente máxima que se puede tener en el ciclador es de 100 A.

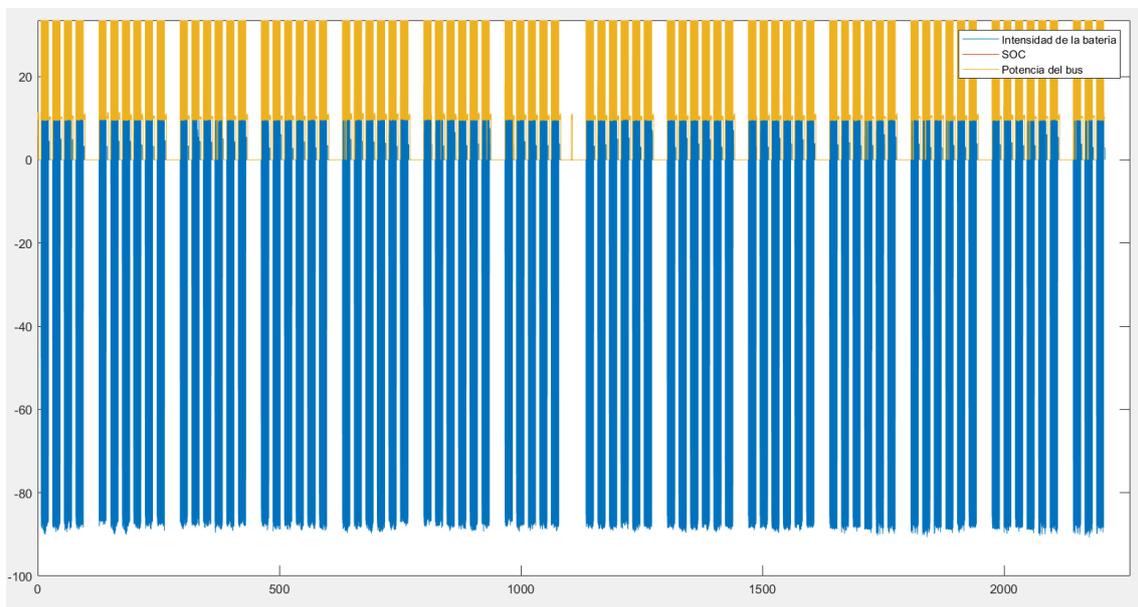


Figura 4-11: comprobación de la intensidad de descarga

En este punto ya tenemos definido totalmente el programa de simulación, no solo para la celda FL, sino para la celda SL y para las baterías LG y BeePlanet.

En la Tabla 4-1 quedan reflejadas las características básicas del sistema con una celda FL.

Tabla 4-1: características principales del sistema con una celda FL

Potencia superior de red (W)	232
Potencia del autobús (W)	574
Intensidad de descarga (A)	88

Queda comprobar el funcionamiento del programa y obtener los resultados más determinantes para poder obtener unas conclusiones consistentes. Dichos resultados son: trasiego de energía, energía consumida por la resistencia, número de EFC, variación de la capacidad y variación de la resistencia.

Para comprobar el funcionamiento de la simulación se ha escogido las últimas horas del sábado de la segunda semana de simulación. En la Figura 4-12 se pueden comprobar los siguientes puntos clave:

- El SOC disminuye y aumenta cuando se carga y cuando se descarga la batería.
- La suma de la potencia del autobús es la suma de la potencia de red y de la potencia de descarga de la batería.
- La celda sufre un descenso de potencia de carga en SOC altos debido a la tensión máxima (4.15 V).

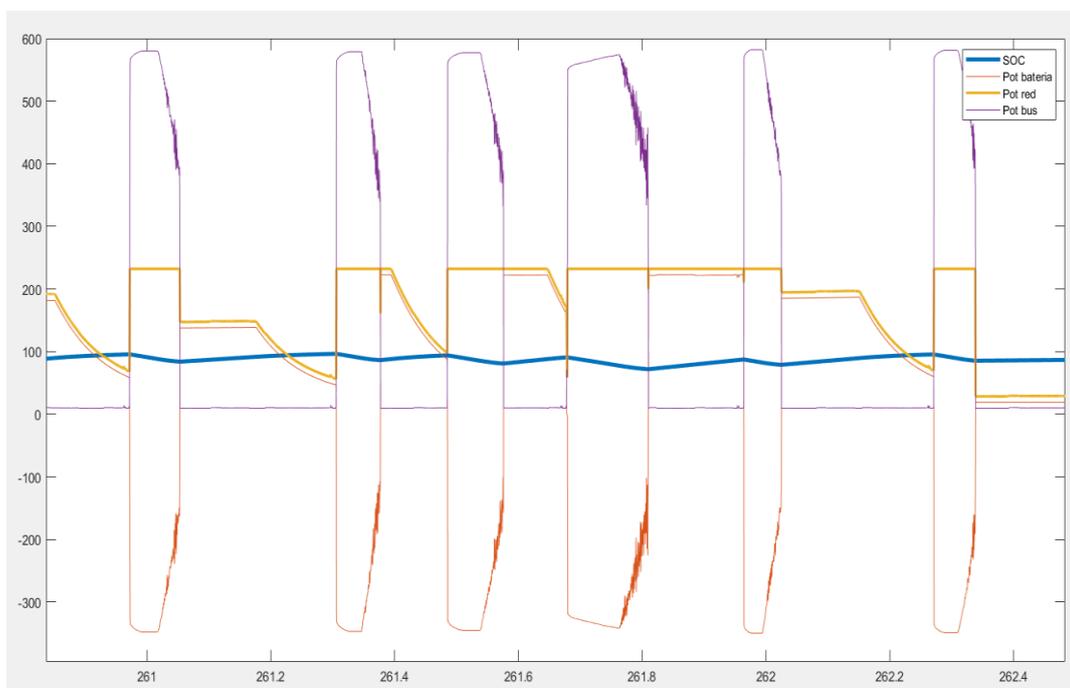


Figura 4-12: Comprobación del funcionamiento del sistema a partir de los parámetros principales

En la Tabla 4-2 se pueden ver los resultados más característicos de la simulación. Estos son, el trasiego de energía, la energía consumida por la resistencia, el número de EFC, el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad. Vemos que el trasiego de energía es elevado puesto que cada día se realizan cinco EFC. Debido al gran trasiego de energía, aunque la resistencia sea muy baja, la energía que consume la resistencia tanto en carga como en descarga es notoria y hay que tenerla en cuenta, es más, debido a la misma es imposible el funcionamiento del sistema con el dimensionamiento inicial. Con respecto a la degradación, tras los tres meses de funcionamiento la celda ha aumentado la resistencia un 3.72 %, lo que hace que las pérdidas vayan aumentando, así como el trasiego de energía puesto que en descarga la batería tendrá que aumentar su potencia para que el sistema tenga las mismas prestaciones. La capacidad ha disminuido un 8.5 % con respecto a su estado inicial.

La variación de la resistencia y la variación de la capacidad de la Tabla 4-2 son acumulativos.

Tabla 4-2: resultados de la simulación durante los tres meses de la celda FL

Mes	Trasiego de energía (kWh)	Energía consumida por la resistencia (kWh)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
1	71.17	1.42	165.65	0.49	-3
2	77.19	1.56	350.82	1.69	-5.43
3	79.65	1.63	548.68	3.72	-8.5

Celda SL

En este punto, como se acaba de indicar, ya tenemos el programa de simulación completo y diseñado para que funcione con cualquier modelo de celda-batería, sólo se necesitan la resistencia interna y la tensión en circuito abierto para diferente SOC y, si es posible, la degradación con respecto al número de EFC.

Hay que recordar que hay un total de cuatro modelos diferentes entre las celdas y las baterías y que el objetivo no es la visualización de gráficas donde se muestre el funcionamiento del sistema más allá de la comprobación y el entendimiento de la estrategia.

A continuación, se reflejarán los resultados más representativos con el fin de, posteriormente, compararlos y analizarlos junto con los resultados experimentales.

Dado que se ha comprobado el funcionamiento del sistema, sólo se han variado las entradas.

El factor inicial que hace que el sistema se acople a la celda SL ahora será menor puesto que la capacidad energética ha disminuido. Según la Ecuación 3, la Tabla 3-2 y la

capacidad de la batería del sistema inicial (una batería de 80 kWh) el factor es 0.0021. De nuevo, la potencia del autobús multiplica a este factor y la potencia superior de red, además, multiplica a un segundo factor (ya explicado con anterioridad) de 1.15.

Tabla 4-3: características principales del sistema con una celda SL

Potencia superior de red (W)	183
Potencia del autobús (W)	456
Intensidad de descarga (A)	68

En la Tabla 4-3 se comprueba que el sistema es menor que para el sistema de la celda FL.

Tabla 4-4: resultados de la simulación durante los tres meses de la celda SL

Mes	Trasiego de energía (kWh)	Energía consumida por la resistencia (kWh)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
1	61.74	1.42	175.48	5.92	-8.21
2	59.72	1.56	359.32	18.45	-17
3	58.55	1.63	552.12	42	-27

Al comparar los resultados de la Tabla 4-4 y la Tabla 4-3 se comprueba que:

- Al tener un sistema menor, el trasiego de energía será menor. Sin embargo, la celda SL tiene una capacidad del 22 % menor que la celda FL y la energía perdida es sólo un 2.8 % menor, esto indica que la resistencia no sólo es mayor en la celda de SL que la celda FL como ya se veía en el Capítulo 3, sino que, al ser mayor, el trasiego de la batería también aumentará.
- El número de EFC es ligeramente mayor en la celda SL que en la celda FL (se realizan 3.44 EFC más). Esto es porque la resistencia es mayor y porque aumenta en mayor medida.

Batería LG

Tanto la batería LG y BeePlanet serán puestas en marcha en la microrred. En estos dos casos no se ha multiplicado por 1.15 la potencia superior de la microrred, lo que en un futuro nos dará problemas con la batería de BeePlanet. Más adelante se explicará.

Es interesante mostrar un día tipo para visualizar los valores que la batería suele tener. El día que se visualizará será el día 37, que es el día en donde en condiciones ideales se alcanza el SOC mínimo. Véase la Figura 4-13 y la Figura 4-14 y la Figura 4-15.

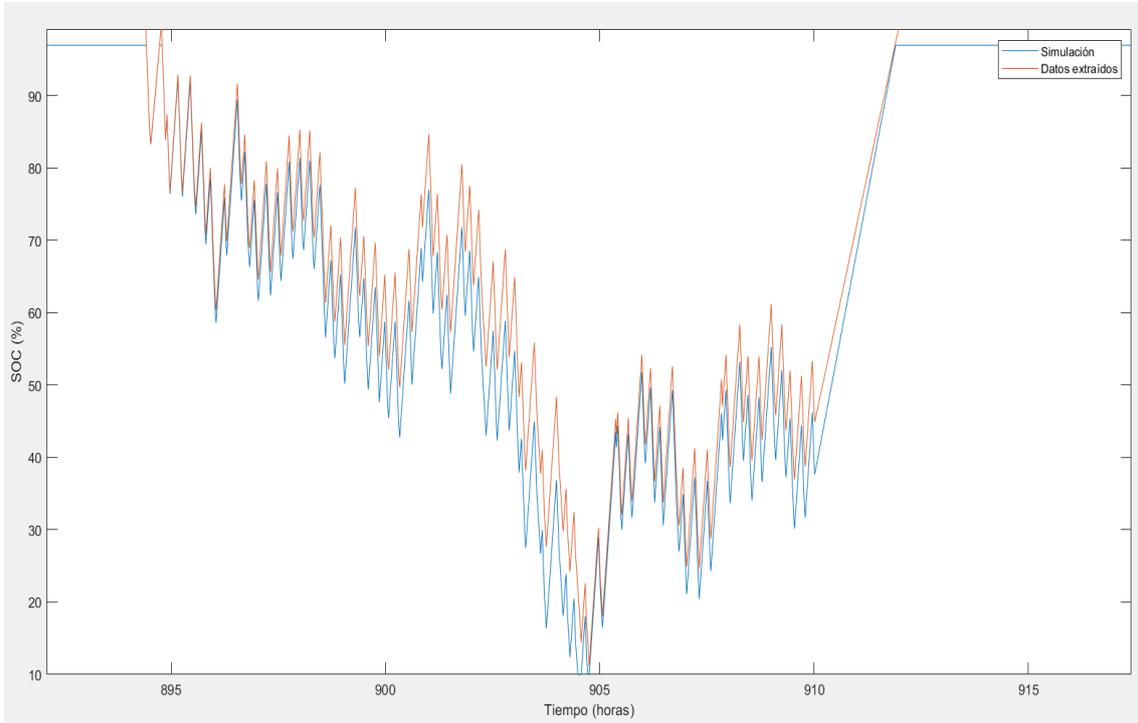


Figura 4-13: comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales para LG

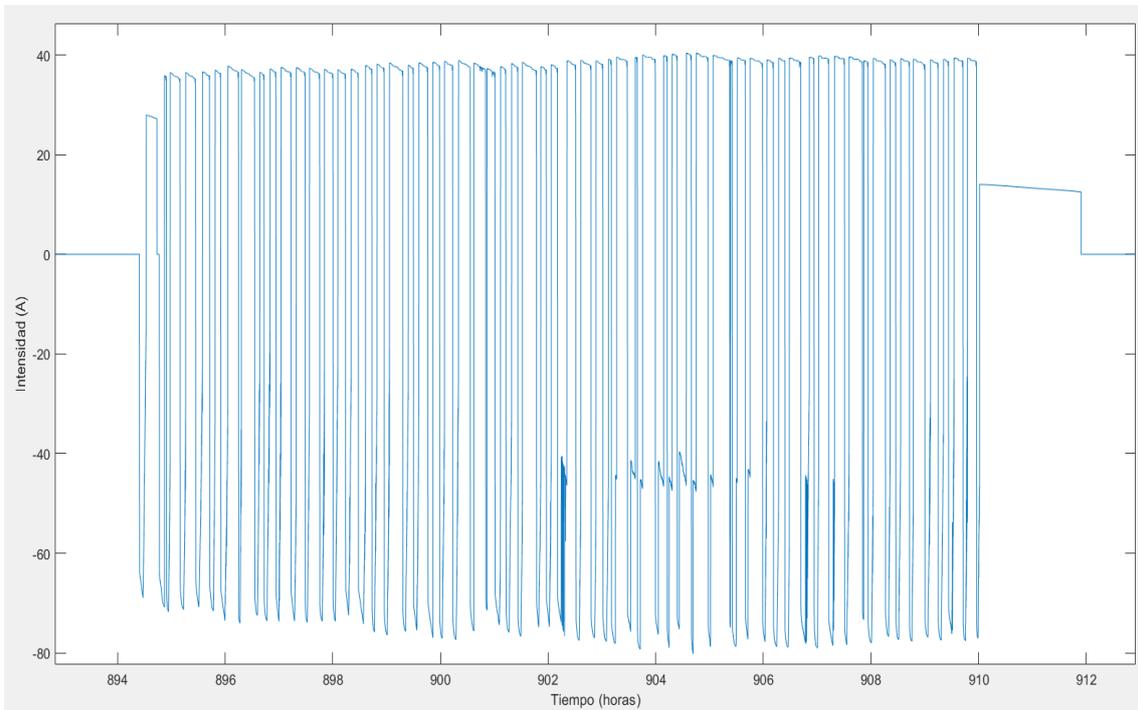


Figura 4-14: intensidad para el día 37 según la simulación para LG

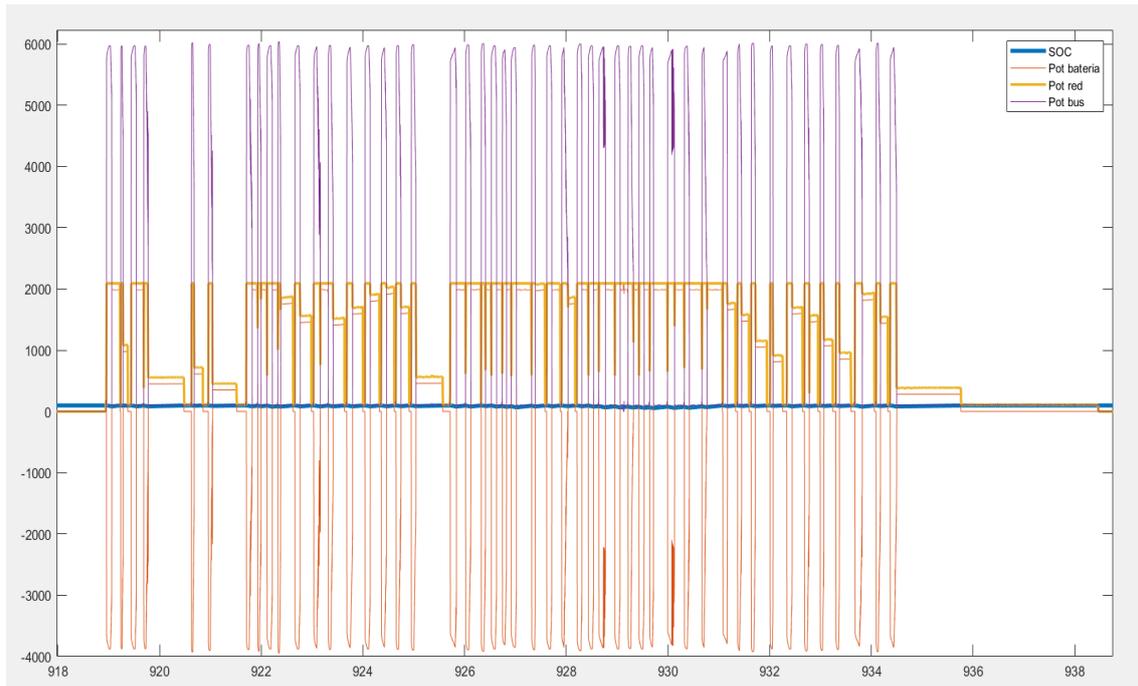


Figura 4-15: potencia de la batería, potencia de la red, potencia del autobús y SOC para la batería LG

De la Figura 4-13, la Figura 4-14 y la Figura 4-15 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Al igual que se comentó en el análisis de la celda FL, se necesita una potencia de red mayor que haga que la batería no se descargue tanto.
- El SOC mínimo de la batería es del 10 % y ese mínimo se alcanza en varias ocasiones, en este caso la batería no se descarga tanto como en la celda FL.
- Las descargas son mayores a las que el datasheet indica, la potencia de descarga es de 3.9 kW con una intensidad de 79 A. El datasheet avisa de que la potencia no debe ser superior a 71.4 A ni a 3 kW. Esto reafirma el hecho de que la estrategia es demasiado agresiva.

En este punto lo que se debería hacer es aumentar la potencia de red, no solo porque la batería no es apta para estas condiciones, sino porque la corriente máxima de los inversores es de 50 A.

En la Tabla 4-5 se puede apreciar las magnitudes del sistema, se puede comprobar que la intensidad de descarga de la batería es casi el doble que la máxima del datasheet (71.4 A), es decir, la batería está funcionando a 1.82 C. En la Tabla 4-6 se encuentran los resultados más característicos de la simulación, los datos de degradación no aparecen porque no se dispone de datos experimentales.

Tabla 4-5: características principales del sistema con la batería LG

Potencia superior de red (kW)	2.1
Potencia del autobús (kW)	6
Intensidad de descarga (A)	79

Tabla 4-6: resultados de la simulación durante los tres meses de la batería LG

Mes	Trasiego de energía (kWh)	Energía consumida por la resistencia (kWh)	Nº de EFC
1	824.6	6.98	188.23
2	762.47	6.86	372
3	783.65	7.25	571.05

Batería BeePlanet

Al igual que con la batería LG, se mostrarán las mismas gráficas y los mismos datos para poder comparar resultados.

El factor para escalar las potencias se calcula de la misma manera, como tenemos una batería con mayor capacidad, el factor será mayor (0.041 mientras que para la batería de LG era de 0.038).

Se comprueba que, como se había visto en el análisis de la celda FL, la resistencia juega un gran papel y la estrategia no es viable con el dimensionamiento actual, por tanto, habría que aumentar la potencia superior de red.

En la Figura 4-16 se puede ver cómo difiere el SOC si las condiciones fueran reales y teniendo en cuenta la resistencia interna de la batería BeePlanet. En la Figura 4-17 se aprecian las intensidades de carga-descarga que sufre la batería.

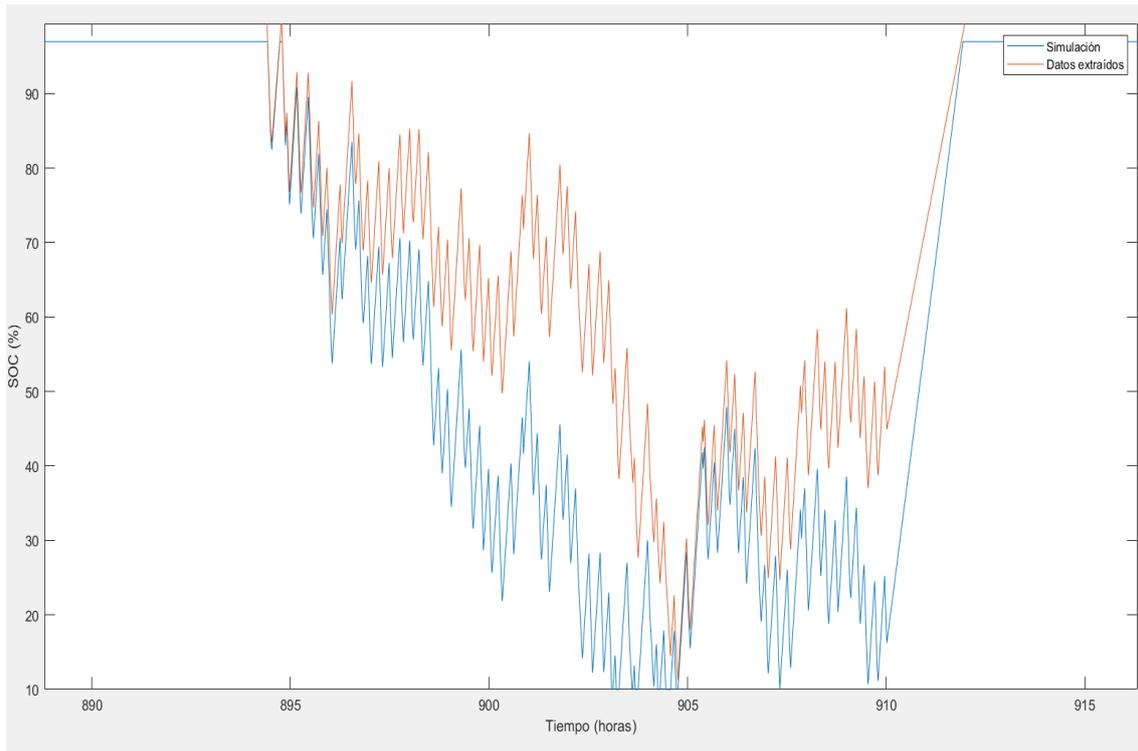


Figura 4-16: comparación del SOC entre condiciones reales y condiciones ideales para BeePlanet

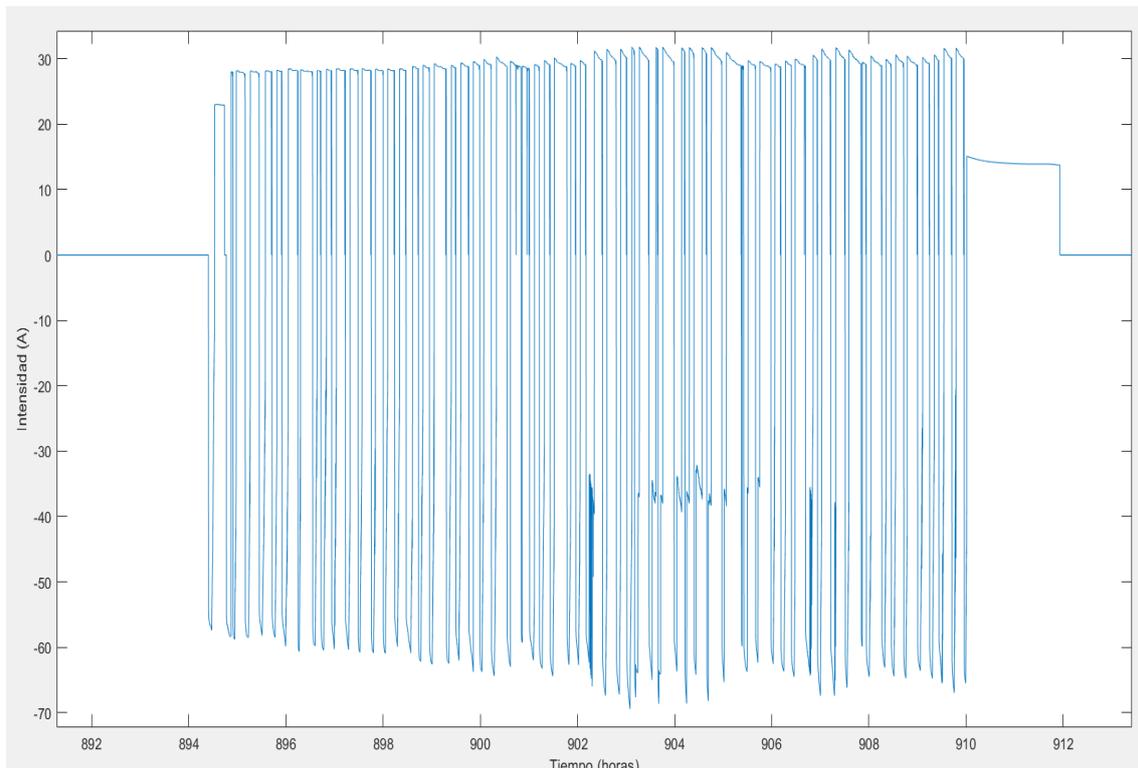


Figura 4-17: intensidad para el día 37 según la simulación para BeePlanet

Véase la Tabla 4-8 y la Tabla 4-7 para ver los resultados más representativos.

Tabla 4-7: características principales del sistema con la batería BeePlanet

Potencia superior de red (kW)	2.8
Potencia del autobús (kW)	8
Intensidad de descarga (A)	65

Tabla 4-8: resultados de la simulación durante los tres meses de la batería BeePlanet

Mes	Trasiego de energía (kWh)	Energía consumida por la resistencia (kWh)	Nº de EFC
1	1161.6	50.13	196
2	1087.2	47.65	388.5
3	1152.1	50.26	599

La intensidad de descarga de la batería BeePlanet es menor, aunque tenga una capacidad mayor y, por tanto, a priori se puede pensar que la intensidad debe ser mayor, sin embargo, tiene una tensión en bornes de la batería menor.

Al tratarse de una batería de segunda vida la energía consumida por la resistencia en carga-descarga es mucho mayor que la batería de LG y esto se traduce en un mayor trasiego.

Recalcar que hay dos celdas y dos baterías, además, en el Trabajo se analizan dos estrategias, el capítulo se centra en visualizar las condiciones que habrá en la experimentación y claro está, en explicar la estrategia de movilidad, así como resaltar los resultados más importantes que permitan obtener unas conclusiones férreas.

5. ESTRATEGIA DE AUTOCONSUMO

En el Trabajo Fin de Grado del compañero Álvaro Martín Castilla [4] se desarrolla esta estrategia, en su Trabajo se desarrollan las bases de la misma, el dimensionamiento del sistema y se recogen los datos procedentes del campo fotovoltaico de la microrred. No se justificarán los valores de dimensionamiento puesto que este Trabajo es una continuación, tampoco se va a entrar en detalle en el desarrollo de la estrategia puesto que en su Trabajo ya se han barajado todas las opciones.

En este capítulo, al igual que en el Capítulo 4, se presentarán los resultados tras incluir el modelo eléctrico y de degradación y se explicará, sin entrar en detalle, en la estrategia.

5.1. Principio de la estrategia de autoconsumo, simulación y resultados

La estrategia consiste en el autoconsumo residencial de una vivienda de cuatro personas en el norte de España. Se trata de una vivienda en donde el consumo tiene una distribución diferente a lo largo del día. El objetivo es comprobar que una batería de segunda vida es capaz de cumplir con las exigencias necesarias de forma que el consumo y la generación fotovoltaica se acoplen haciendo que se aproveche lo mejor posible la energía generada.

Para la estrategia se analizó una batería de segunda vida, en concreto la batería de BeePlanet que se lleva analizando hasta ahora.

El patrón de consumo de la vivienda es muy similar a lo largo del año, siendo los días más diferenciados con respecto a la semana los fines de semana o los días de vacaciones. A continuación, se analizan los consumos para un día aleatorio (en concreto el 12 de abril).

00:00-08:00h: la franja horaria desde medianoche hasta las ocho de la mañana corresponde con un valle dentro del consumo. Durante dicho valle, la potencia se mantiene en un valor constante que no sobrepasa el kilovatio excepto en pequeños picos de consumo que se dan periódicamente con una frecuencia aproximada de una hora [4].

08:00-09:30h: el primer pico de consumo del día se produce de ocho de la mañana a nueve y media, coincidiendo con la salida del sol. Normalmente los usuarios de una vivienda suelen comenzar a realizar labores que conllevan un gasto energético a partir de estas horas del día. Este pico supera ampliamente los 4 kW, llegando incluso a valores próximos a los 5 kW [4].

09:30-13:00h: el segundo valle del día se da entre las 09:30-10:00 y las 13:00h. Este valle depende en gran medida de los hábitos de los habitantes de la vivienda. En función del día de la semana o del tiempo que dediquen a sus tareas domésticas por la mañana, puede variar en mayor o menor medida [4].

13:00-14:00h: el pico de consumo dentro de esta franja se puede caracterizar por coincidir con las horas del día en las que normalmente se prepara la comida. Estas

acciones conllevan un consumo elevado de potencia como se ve reflejado en la Figura 4, de más de 6 kW [4].

14:00-19:00h: este valle se da durante las primeras horas de la tarde. Durante el mismo, el patrón que sigue la potencia es muy parecido al del valle correspondiente a la noche, manteniéndose la potencia en valores nunca superiores a 1 kW. Durante el mismo hay pequeños picos que no suponen un problema en ningún caso por ser de muy baja potencia [4].

19:00-21:30h: esta franja horaria coincide con la de mayor actividad de consumo de todo el día. No solo es el último pico del día y el de mayor duración, sino que también es el de mayor potencia demandada. En él se llegan a valores de potencia de más de 5 kW, dándose incluso picos de en torno a 8 kW. A partir de este pico, se vuelve a un valle que enlaza con la primera de las franjas horarias del día [4].

Con respecto a la generación fotovoltaica, se disponen de los datos filtrados y tratados de la microrred durante el año 2020. Dicha instalación tiene una potencia pico de 3.6 kW. El principal problema es que en muchas ocasiones durante el año tenemos estamos generando energía mientras el consumo es muy bajo, se trata de un sistema ineficiente.

Para tratar de solucionar el problema y acoplar la generación y el consumo de forma que se aproveche más la generación fotovoltaica se ha desarrollado una estrategia en donde la batería se cargará cuando la potencia fotovoltaica sea mayor al consumo. Cuando no haya una generación fotovoltaica que no sea capaz de cubrir el consumo entrará en juego la batería y, si la batería no es capaz de cubrir la demanda, la red se hará cargo del consumo. En la Figura 5-1 se puede ver cómo funciona la estrategia, posterior a la imagen se desarrolla cada una de sus características.

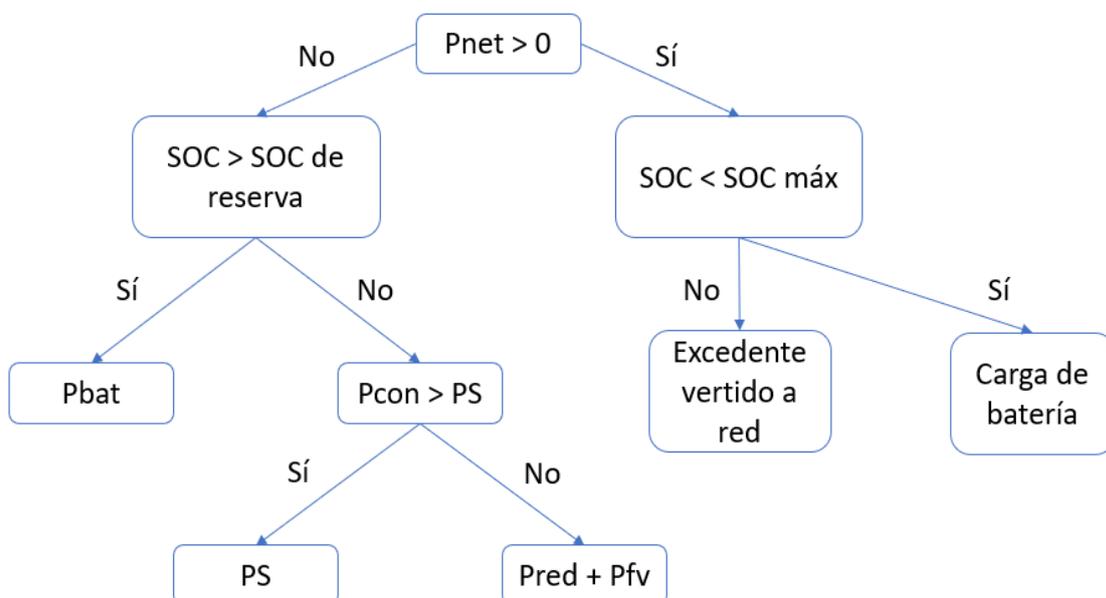


Figura 5-1: resumen de la estrategia de autoconsumo residencial

Donde

P_{net} : diferencia entre la potencia de generación instantánea del campo fotovoltaico y la potencia de consumo en ese momento.

SOC: estado de carga de la batería cuyo rango va desde 10 % hasta el 100 %.

SOC de reserva: aunque el SOC mínimo sea del 10 %, este sólo se podrá alcanzar en determinados momentos (cuando entre el juego el Peak Shaving). Se mantendrá en todo momento un SOC de reserva del 20 %.

P_{bat} : la potencia de la batería cuyo límite superior es de 4 kW, nunca podrá trabajar por encima de dicho valor (a excepción del Peak Shaving).

PS: Peak Shaving. Este concepto consiste en que cuando la potencia neta sea superior a un valor determinado (en este caso el valor es de 4 kW) dicho pico siempre se cubra con la batería si el SOC hay SOC de reserva. Es decir, el objetivo es que siempre haya un SOC de reserva del 20 %, de este modo, cuando haya picos muy elevados, la batería siempre podrá cubrirlos, evitando la contratación de una potencia muy elevada de la red.

Pred: la potencia de red que en caso de tener la batería cargada o una potencia neta mayor a 4 kW vendrá del campo fotovoltaico y será el excedente de energía.

P_{fv} : la potencia del campo fotovoltaico.

$SOC_{m\acute{a}x}$: SOC máximo de la batería del 100 %.

Excedente de energía: cuando el SOC sea del 100 % y haya generación fotovoltaica siempre habrá excedente de energía. Si la potencia neta es mayor a 4 kW (nunca se dará el caso puesto que la potencia pico de generación está en torno a 3.6 kW).

Carga de batería: si el SOC de la batería es menor al 100 % se cargará la batería. Es importante hacer hincapié en que la batería **siempre se va a cargar desde las 00:00 hasta las 05:00 de cada día**. Dicha energía la suministrará la red, se trata de horas en las que la electricidad es barata (con respecto al resto del día) y de este modo se asegura que durante las primeras horas de la mañana la batería será la que se encargará del consumo, que son horas pico (horas en donde la electricidad aumenta sus precios).

En conclusión, se trata de un balance de potencia en donde la demanda siempre será cubierta por la generación por el campo fotovoltaico, por la batería, por la red o por la suma de cualquier combinación de potencias.

La aportación del Trabajo al Trabajo de Álvaro es la incorporación del modelo eléctrico y el modelo de degradación (Figura 4-5) en el caso de la simulación para las celdas FL y las celdas SL y el modelo eléctrico en el caso de la batería de BeePlanet y LG (Figura 4-4) a su programa de simulación.

Como se hizo en el anterior capítulo, se presentarán los datos más característicos, que en esta estrategia serán otros: autoconsumo, excedente de energía, energía consumida, número de EFC y, en el caso de las celdas, su degradación en función del número de EFC.

Los cuatros sistemas diferentes han sido escalados, en un principio el sistema era para una batería con una capacidad energética de 4 kWh (la capacidad de la batería de BeePlanet si fuera nueva), sin embargo, la batería ya ha sido usada con anterioridad y como se mostró en el Capítulo 3, su capacidad ha disminuido.

En la Tabla 5-1 aparecen los resultados de las celdas FL y SL, en la Tabla 5-2 se encuentran los datos correspondientes con las baterías LG y BeePlanet.

Tabla 5-1: principales resultados de las celdas FL y SL

	Trasiego de energía (kWh)	Autoconsumo (%)	Energía consumida (kWh)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
Celda FL	134.02	50.96	156.75	454	2.84	-7.04
Celda SL	177.65	51.46	199.47	430	24.02	-25.4

Tabla 5-2: principales resultados de la batería LG y BeePlanet

	Trasiego de energía (MWh)	Autoconsumo (%)	Energía consumida (MWh)	Nº de EFC
Batería LG	2.18	62.75	2.56	480.6
Batería BeePlanet	3.25	62.14	3.81	481

De la Tabla 5-1 la conclusión más importante es que la degradación es mucho menor con respecto a la estrategia de movilidad, esto se debe a que el ciclado de la batería (el número de EFC) también lo es. La estrategia de autoconsumo tiene unos requerimientos mucho menores. Esto es evidente puesto que la estrategia de movilidad es extremadamente exigente porque durante el día la batería se carga y se descarga continuamente.

Por otro lado, el autoconsumo en baterías es superior al de las celdas, esto se debe principalmente a la resistencia interna de la batería y a las intensidades de carga-descarga. Las intensidades, aunque se tiene un sistema 10 veces mayor, no son 10 veces mayor y, por otro lado, la resistencia interna no aumenta del mismo modo que la capacidad. Dicho de otro modo, las pérdidas son menores (con respecto al propio sistema, no con respecto a un sistema más pequeño) y esto hace que el autoconsumo se incremente.

Se analizará la primera semana de abril de la batería LG para la comprobación de la simulación (Figura 5-2).

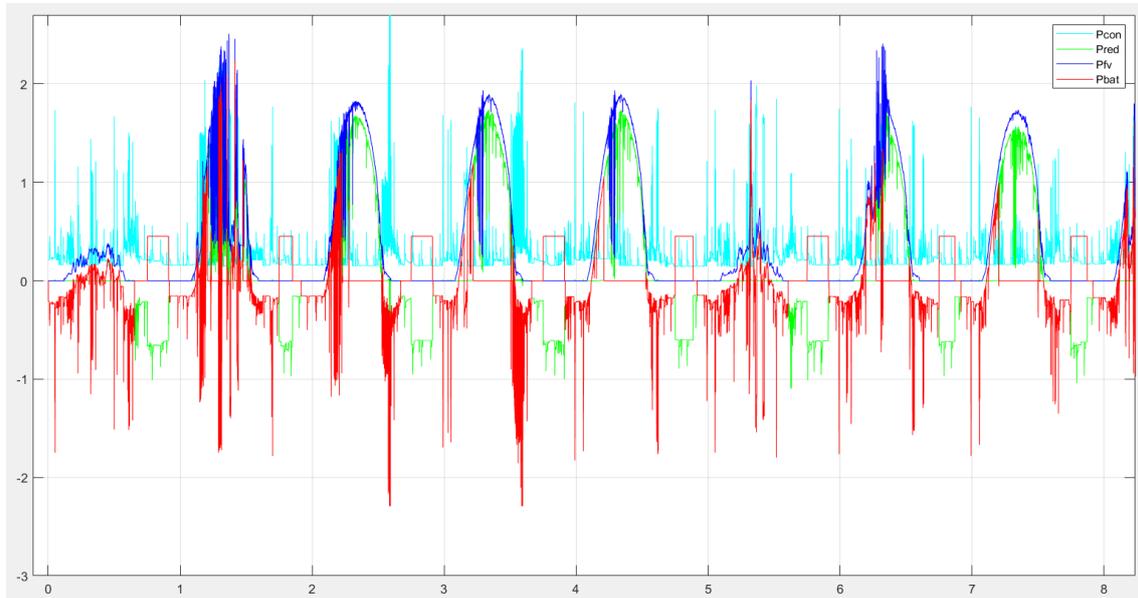


Figura 5-2: resultados de la primera semana de la batería LG

La batería LG, según los resultados de ensayo realizados en la microrred, tiene una capacidad energética de 2.297 kWh, sin embargo, el sistema está diseñado para una batería cuya capacidad sea de 4 kWh [4], por lo que hay que aplicar un factor de 0.5743. De este modo, la potencia máxima de la batería, en condiciones normales, será de 2.3 kW. El PS será de 2.3 kW siempre que se disponga del SOC de reserva.

De la Figura 5-2 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La generación fotovoltaica no está acoplada con el consumo, por eso hace falta una batería.
- En las horas nocturnas (00:00 - 05:00 h) la potencia de la batería es constante, se está cargando a partir de la potencia de red para dar potencia en las primeras horas de la mañana, donde la generación fotovoltaica es nula.
- La potencia de carga nunca supera el límite de la batería.
- Hay dos PS, se corresponden con horas en los que hay grandes picos de consumo. El objetivo es hacer que esos picos de consumo no sean suministrados por la red, sino por la batería.

En la Figura 5-3 se comprueba que el SOC de reserva es del 20 % y que siempre se alcanza al acabar el día para ser cargada tras las 00:00 horas. El SOC no alcanzará nunca el 100 % porque se ha puesto un límite superior del 97 % puesto que los inversores que controlan las baterías en la microrred tienen un protocolo que no permiten un SOC superior al 97 %.

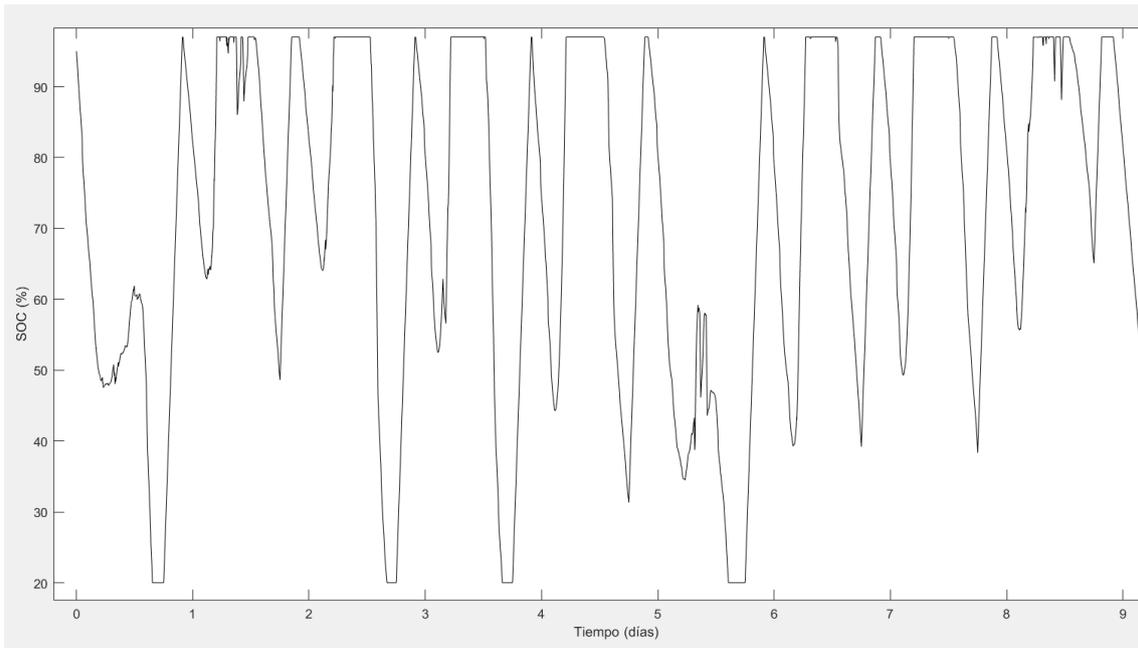


Figura 5-3: SOC de la batería LG durante los primeros días de abril

6. EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se tratará la segunda parte del Trabajo, la fase de experimentación. Hasta ahora se habían simulado dos estrategias diferentes para dos celdas y para dos baterías, con los resultados obtenidos (intensidad de carga-descarga, número de EFC, energía trasegada, etc.) se puede saber, a priori, lo que va a ocurrir en la realidad.

Como se ha descrito con anterioridad, el estudio de las celdas se llevará a cabo en el ciclador, cuya intensidad máxima es de 50 A, pero como cada celda cuenta con dos canales diferentes, el máximo es de 100 A.

Con respecto a las baterías BeePlanet y LG, éstas funcionarán en un entorno (la microrred) completamente diferente, no solo a niveles de potencia, sino de software.

6.1. Ciclador

El ciclador es un sistema que no permite una programación en lazo cerrado, y por tanto no se puede estudiar ninguna estrategia como se llevaba haciendo hasta ahora: en función de diferentes parámetros, concretamente la potencia de consumo y el SOC, la celda actúa de una forma u otra. En el ciclador, la intensidad de carga y descarga debe ser una entrada, independientemente de que la celda esté completamente descargada o cargada. Este hecho ha resultado crítico.

Estrategia de movilidad

En un principio lo que se quería era, al igual que en Matlab, a partir de unos datos de entrada (potencia del autobús menos la potencia superior de red) hacer que la celda se cargase y descargase en función del SOC, pero el ciclador no permite ningún tipo de programación.

En segundo lugar, se probó a partir de las intensidades de carga-descarga para cada segundo que se obtienen en simulación. Dichos datos son los más fiables que se tienen, puesto que la simulación intenta conocer el comportamiento de la celda en cualquier momento. Este método resultó fallido porque a las pocas horas se producía un desequilibrio: cuando el SOC era del 100 % se indica a la celda que siga cargando. También sucedía al revés, cuando la batería ya no se podía descargar más, se le exigía a la celda que se descargase puesto que así lo había calculado el programa de simulación. En cualquier caso, es normal que esto suceda, es prácticamente imposible adivinar el estado de la celda segundo a segundo.

Lo que sí se puede hacer en el ciclador es cargar y descargar la celda hasta un cierto límite, este límite es la tensión. Es decir, la celda cargará a 50 A durante 5 minutos a no ser que la tensión sea de 4.15 V. La tensión, en este caso, es sinónimo de SOC igual al 100 %. Del mismo modo, la tensión mínima es de 2.5 V. Véase la Figura 6-1.

ID	Step name	StepTime(hh:mm:ss.ms)	Rate(C)	Volt(V)	Cur.(A)	Cap.(Ah)	Stop Rate(C)	Stop Cur.(A)	Eng(Wh)
1	Rest	00:00:30.000							
2	CC_Dchg			2.5000	22.0000				
3	CCCV_Chg			4.1500	22.0000			2.0000	
4	Rest	06:50:43.000							
5	CC_Dchg	00:08:29.000		2.5000	90.0000				
6	CCCV_Chg	00:07:58.000		4.1500	55.0000			2.0000	
7	CC_Dchg	00:03:36.000		2.5000	90.0000				
8	CCCV_Chg	00:05:29.000		4.1500	55.0000			2.0000	
9	CC_Dchg	00:08:50.000		2.5000	90.0000				
10	CCCV_Chg	00:44:53.000		4.1500	22.0000			2.0000	
11	CC_Dchg	00:03:37.000		2.5000	90.0000				
12	CCCV_Chg	00:03:17.000		4.1500	46.0000			2.0000	
13	CC_Dchg	00:04:45.000		2.5000	90.0000				
14	CCCV_Chg	00:05:42.000		4.1500	55.0000			2.0000	
15	CC_Dchg	00:03:15.000		2.5000	90.0000				

Figura 6-1: programación de la estrategia de movilidad de forma manual

La programación se tuvo que hacer de forma manual, hay que indicar la intensidad a la que se va a cargar la celda y la intensidad a la que se va a descargar. También hay que indicar el tiempo de carga-descarga. Cuando la celda esté totalmente cargada alcanzará una tensión de 4.15 V, si alcanza dicha tensión antes del tiempo indicado, pasará a la siguiente fila y se descargará a la intensidad indicada, el tiempo necesario, hasta que se cumpla el tiempo o, por el contrario, alcance una tensión de 2.5 V. Según la Figura 6-1, a partir de la fila 4, el procedimiento es el siguiente:

Rest en la fila 4: la batería ni se carga ni se descarga, se está simulando la noche (un total de casi 7 horas).

Descarga en la fila 5 durante ocho minutos y medio a una descarga de 90 A, se está simulando la carga del autobús. Si la celda, por algún motivo, se descarga y alcanza una tensión de 2.5 V antes de tiempo, pasará a la fila 6 para proceder a la carga correspondiente que hay entre autobús y autobús.

Cuando ha pasado el tiempo de carga del autobús (en este caso de ocho minutos y medio) se cargará la celda a una intensidad 55 A hasta que pase el tiempo o bien haya que se cargue por completo, dicho de otro modo, cuando la tensión en bornes de la celda sea de 4.15 V.

El número de líneas de programación es limitado, por lo que se ha dividido en parejas de días. Los domingos y festivos no hay servicio de autobús, por lo que la celda se deja en reposo.

Todas las semanas son prácticamente iguales, se ha programado una semana y se ha puesto cíclicamente, el problema es que el ciclador no permite más de 225 líneas. Por lo que se programó lunes-martes, miércoles-jueves y viernes-sábado. El domingo no hizo falta puesto que el domingo no pasan autobuses. De este modo el procedimiento sería:

1. Programar manualmente las cargas-descargas de dos días consecutivos y repetirlo tres veces para tener una semana completa. Hacerlo para las dos celdas.
2. Una vez que está el código completo, cada dos días lanzar los siguientes días consecutivos y vigilar la celda.

3. Recoger datos y obtener resultados para poder compararlos con los de la simulación.

Con respecto al paso 1, no es nada trivial y es muy común equivocarse en los tiempos. Son muchas líneas de código manual y es muy fácil equivocarse. El proceso de calibración y detección de errores puede durar un mes.

Con respecto al paso 2, cada dos semanas hay que realizar un ensayo de capacidad para comprobar la degradación, que es uno de los objetivos clave del Trabajo.

Antes del paso 1 se tuvo que calcular qué intensidad y qué tiempos se van a poner, para ello, se desarrolló un programa que a partir del ciclado de la celda obtuviera los tiempos de carga y descarga.

En la Figura 6-2 se aprecia el resultado del programa que calculó las intensidades y tiempos correspondientes. Por simplicidad, se establecieron niveles fijos de corriente. Los resultados son bastante similares a los de simulación.

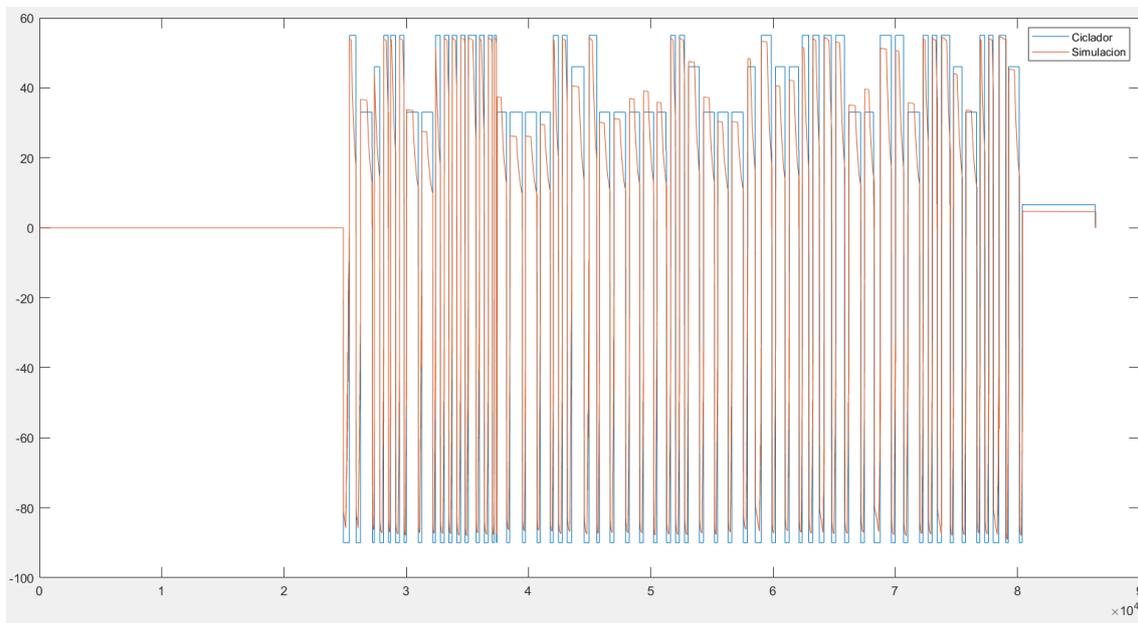


Figura 6-2: ciclado de la celda FL obtenido por simulación y el que se programará en el ciclador para el sábado

En la Figura 6-3 se puede observar las intensidades que se pretenden programar en el ciclador y las que se obtienen por simulación: es imperativo fijarse en las descargas, y es que la descarga, en la simulación, tiene una pendiente progresiva negativa antes de la siguiente carga, sin embargo, en el ciclador esa pendiente no se reflejará principalmente porque el ciclador no permite infinitas líneas de código, habría que poner muchas más filas indicando tiempo e intensidad.

Este hecho se traduce en que en el ciclador la energía de descarga diaria es mayor, lo que hará que el trasiego de energía sea mayor.

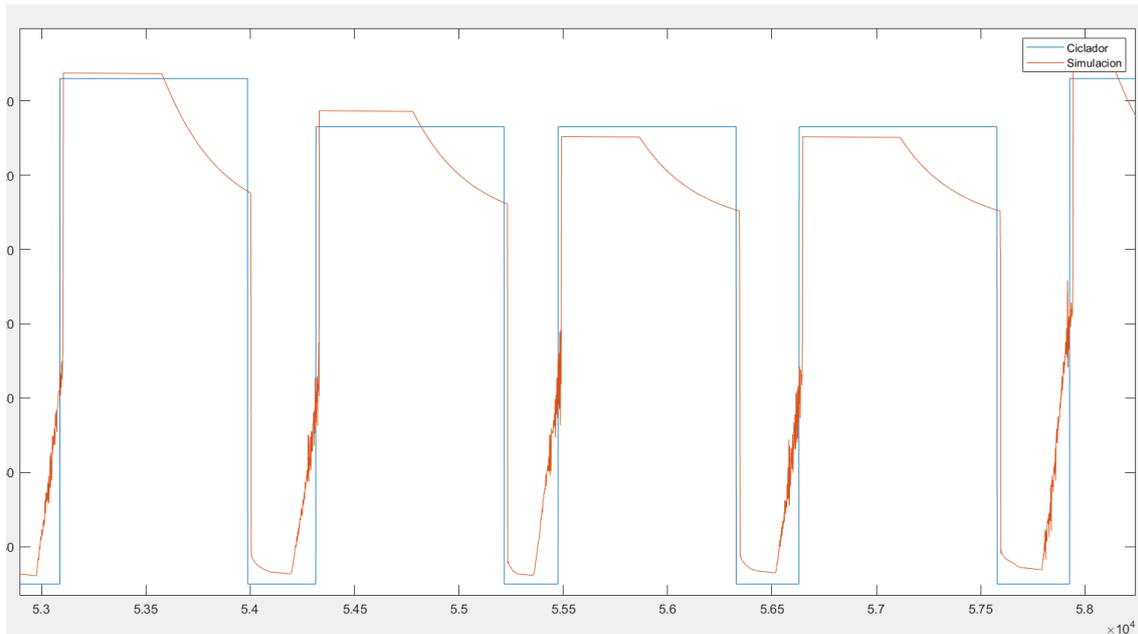


Figura 6-3: ciclado ampliado de la celda FL obtenido por simulación y el que se programará en el ciclador

El proceso se debe repetir dos veces, una vez por celda.

Las celdas han estado en funcionamiento dos meses y medio, de los cuales se tienen datos del último mes puesto que el primer mes fue para calibrar las celdas y solucionar los fallos que había al poner los tiempos manualmente.

Para recoger los datos se creó un programa que leyera los datos en .txt y sea capaz de superponer los datos de simulación con los datos del ciclador. La principal dificultad fue que el ciclador puede dar cinco datos en un segundo y no cada segundo como se hacía en simulación.

Se han obtenido numerosas gráficas (dos celdas y 1 mes funcionando equivalen a 40 gráficas), se van a mostrar dos gráficas, una para la celda FL y otra para la celda SL, para ver visualmente los resultados.

En la Figura 6-4 y Figura 6-7 aparece el SOC de la celda en el ciclador y en simulación, para la celda FL y SL respectivamente. Se puede visualizar que la tendencia es prácticamente la misma entre los datos de simulación y los obtenidos por el ciclador, sin embargo, las descargas son mayores en el ciclador y esto es por lo siguiente: el autobús está durante 5 minutos cargando (por ejemplo), sin embargo, los últimos 30 segundos la intensidad no es constante y decrece hasta llegar a 0 en esos 30 segundos, sin embargo, como se acaba de indicar, en el ciclador la intensidad será constante hasta que el autobús se marche.

En la Figura 6-5 y la Figura 6-7 hacen referencia a las celdas FL y SL, respectivamente. En éstas aparecen las intensidades de simulación, las que se han querido programar en el ciclador y las que finalmente se han obtenido. Se han superpuesto todas las intensidades con el fin de asegurar el correcto funcionamiento. Se ve que, aunque exista un pequeño desequilibrio (en el peor de los casos es de minutos) se puede considerar válido puesto que las amplitudes y tendencias son muy parecidas.

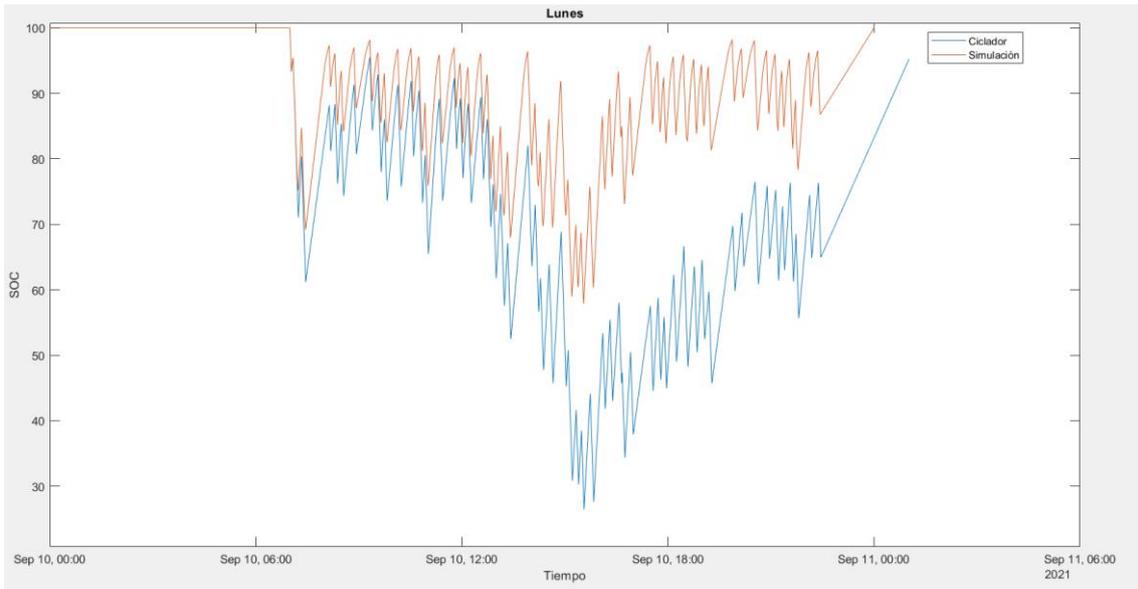


Figura 6-4: SOC de la celda FL para el lunes según el ciclador y según simulación para la celda FL

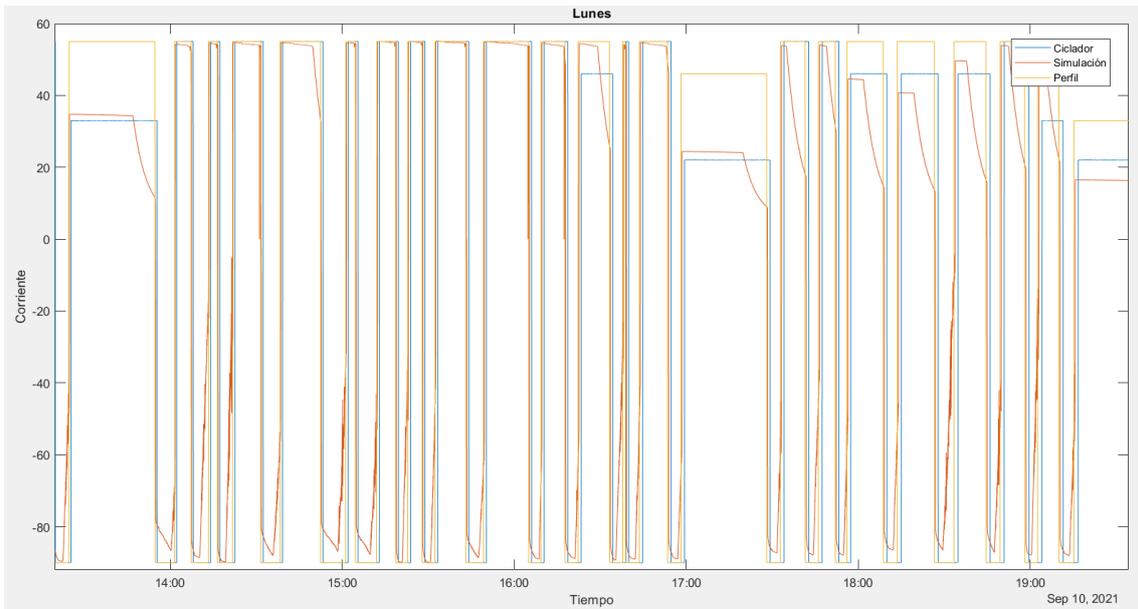


Figura 6-5: comparación entre la intensidad obtenida por simulación, obtenida según el ciclador y la que se pretendía programar en el ciclador para la celda FL

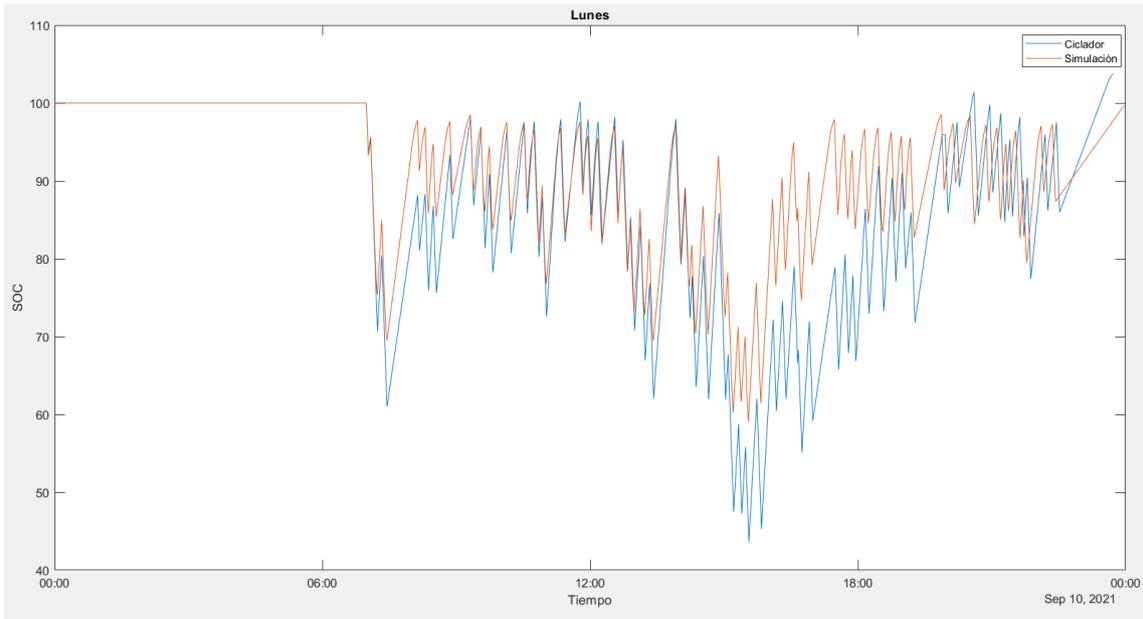


Figura 6-6: SOC de la celda FL para el lunes según el ciclador y según simulación para la celda SL

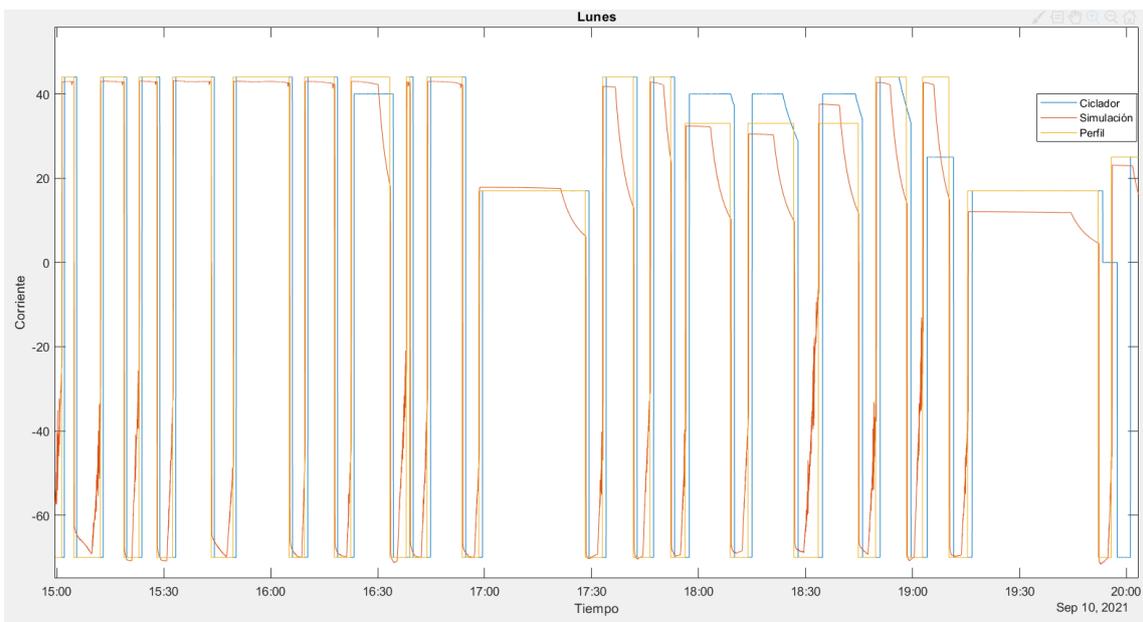


Figura 6-7: comparación entre la intensidad obtenida por simulación, obtenida según el ciclador y la que se pretendía programar en el ciclador para la celda SL

Tras un mes de experimentación a una temperatura de 45 °C, se ha procedido al análisis de resultados y a un RPT tras las dos primeras semanas. Los resultados de la celda FL están representados en la Tabla 6-1 y los de la celda SL en Tabla 6-2: trasiego de energía, trasiego de corriente, número de EFC y variación de resistencia y capacidad tras las primeras dos semanas.

Tabla 6-1: resultados de la estrategia de movilidad para la celda FL con duración de un mes

Días	Trasiego de energía (Wh)	Trasiego de corriente (Ah)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
L-M	7272.15	1830.84	15.7		
X-J	6118.45	1541.59	13.2		
V-S-D	7739.73	1961.53	16.8		
L-M	7197.24	1833.14	15.7		
X-J	6482.23	1654.88	14.2		
V-S-D	7151.16	1812.05	15.6		
RPT	= 41960.96	= 10634.04	= 91.3	4.1	- 3.9
L-M	6822.3	1717.49	15.4		
X-J	6178.9	1543.64	13.8		
V-S-D	7096.9	1779.57	15.9		
L-M	6822.3	1717.49	15.4		
X-J	6174.7	1543.24	13.8		
V-S-D	7095.6	1779.5	15.9		
RPT	= 82151.66	= 20714.97	= 181.5	-	-

Tabla 6-2: resultados de la estrategia de movilidad para la celda SL con duración de un mes

Días	Trasiego de energía (Wh)	Trasiego de corriente (Ah)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
L-M	5508.19	1393.9	15.2		
X-J	4779.83	1199.06	13.1		
V-S-D	5929.03	1499.39	16.4		
L-M	5250.29	1334.76	14.6		
X-J	4832.52	1226.75	13.4		
V-S-D	5863.01	1482.48	16.2		
RPT	= 32162.87	= 8136.35	= 88.9	27.6	- 6.3
L-M	5350.4	1338.2	15.6		
X-J	4815.3	1202.56	14.0		
V-S-D	5336.00	1336.08	15.6		
L-M	5350.40	1338.20	15.6		
X-J	4669.60	1201.80	14.0		
V-S-D	5506.6	1431.86	16.3		
RPT	= 63191.17	= 15985.05	= 180.0	-	-

Tras obtener los resultados del ciclador, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El número de EFC son muy parecidos entre ambas celdas puesto que las intensidades son similares.
- La energía trasegada en la celda FL es un 13.37 % mayor que el obtenido por simulación, esto es coherente con lo analizado anteriormente: la energía de descarga es mayor en el ciclador que en la simulación.
- La energía trasegada en la celda SL es un 3 % mayor en el ciclador que el obtenido por simulación.
- El número de EFC de la celda FL en el ciclador es un 9.6 % mayor que el obtenido por simulación.
- El número de EFC de la celda SL en el ciclador es un 2.58 % mayor que el obtenido por simulación.
- En la celda FL, la capacidad ha disminuido un 3.9 % tras realizar 91.3 EFC, por simulación la capacidad disminuyó un 1.2 %. Por otro lado, si comparamos la resistencia, ha aumentado un 4.1 % mientras que en simulación un 0.23 %. La degradación ha sido mayor en el ciclador que en simulación.
- En la celda SL, la capacidad ha disminuido un 6.3 % tras realizar 88.9 EFC, por simulación la capacidad ha disminuido 4.3 %. Por otro lado, la resistencia en el ciclador ha aumentado 27.6 % mientras que por simulación sólo ha sido un 3 %.

Estrategia de autoconsumo

La metodología es muy parecida para la programación de la estrategia de autoconsumo que la que se ha seguido en movilidad. El cambio está en que ahora se va a combinar un .txt junto con la programación manual, es decir, para ciertas horas se va a leer un .txt y para otras horas del día se impondrá unos tiempos e intensidades determinadas.

Para hacerlo lo más realista posible, se han escogido dos días soleados, tres días medio nublados y dos días nublados, de esta manera ya se tienen qué días se van a experimentar en el ciclador.

Como ahora se va a combinar un .txt con la programación manual, toda la semana se puede programar de una vez, de esta forma se tendrá en bucle durante un mes sin tener que lanzar cada dos días como ocurría con la estrategia de movilidad.

Los .txt corresponden con las descargas que se producen a lo largo del día (el consumo de la vivienda) y las intensidades y los tiempos que se han introducido de forma manual corresponden con las cargas que, más o menos, tienen un perfil regular.

Al igual que ocurría con la estrategia de movilidad, se debe crear un programa que indique cuándo se lee el .txt y cuándo se introduce de forma manual (intensidades y tiempos). En la Figura 6-8 se aprecia lo que se pretende programar en el ciclador. En la Figura 6-9 aparece cómo es el código de programación.

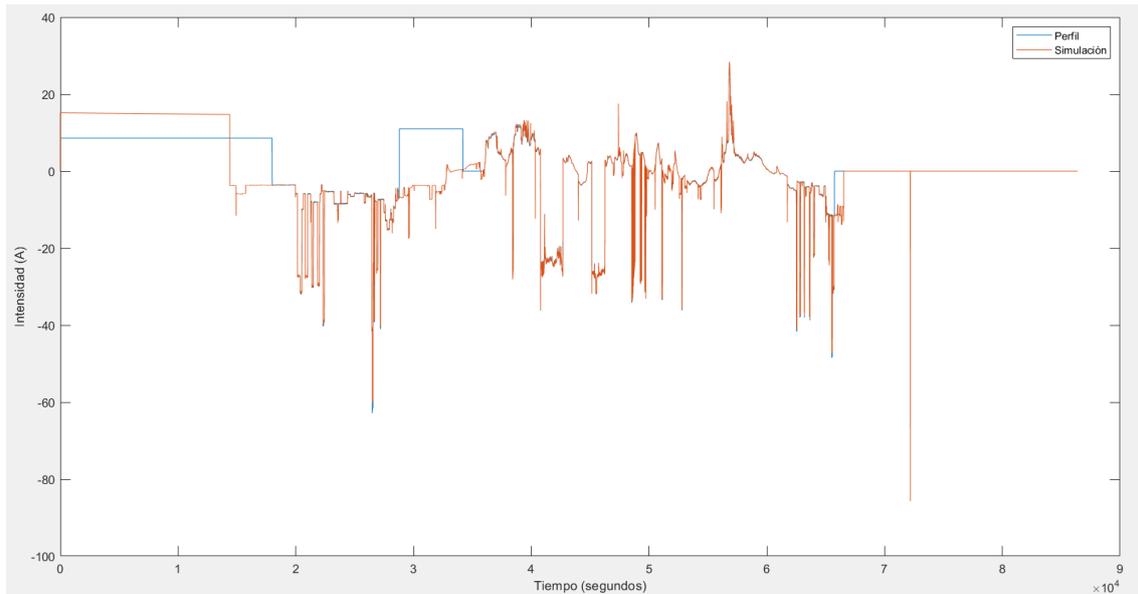


Figura 6-8: intensidad que se pretende programar en el ciclador y la obtenida por simulación. Las descargas corresponden con el .txt y las cargas se introducen de forma manual

4	Rest	04:00:00:000						
5	SIM	File path	3870E336AD5.txt	Cur mode	Multiplicator: 1			
	IF		Volt.	>=	4.1500V	Goto:Finished		
	IF		Volt.	<=	2.5000V	Goto:Finished		
6	CCCV_Chg	02:30:00:000		4.1500	14.8000			2.0000
7	Rest	02:30:00:000						
8	SIM	File path	0368DE3E21A.txt	Cur mode	Multiplicator: 1			
	IF		Volt.	>=	4.1500V	Goto:Finished		
	IF		Volt.	<=	2.5000V	Goto:Finished		
9	Rest	00:01:00:000						
10	CCCV_Chg	05:00:00:000		4.1500	11.6000			2.0000
11	Rest	01:30:00:000						
12	SIM	File path	F89034388EE.txt	Cur mode	Multiplicator: 1			
	IF		Volt.	>=	4.1500V	Goto:Finished		
	IF		Volt.	<=	2.5000V	Goto:Finished		
13	CCCV_Chg	01:00:00:000		4.1500	14.8000			2.0000
14	Rest	01:30:00:000						
15	SIM	File path	0E2125ABA9A.txt	Cur mode	Multiplicator: 1			
	IF		Volt.	>=	4.1500V	Goto:Finished		
	IF		Volt.	<=	2.5000V	Goto:Finished		
16	CCCV_Chg	01:30:00:000		4.1500	3.4000			2.0000
17	Rest	05:30:00:000						
18	SIM	File path	F33A967CDFB.txt	Cur mode	Multiplicator: 1			
	IF		Volt.	>=	4.1500V	Goto:Finished		

Figura 6-9: programación para la estrategia de autoconsumo en el ciclador

Las celdas FL y SL, tras varias semanas calibrándolas, se han tenido en funcionamiento un mes.

En la Figura 6-10 se ha graficado la intensidad que la celda FL tiene en el ciclador. Se puede apreciar el gran parecido que hay entre la intensidad del ciclador y la que se quería programar (recordemos que se trata de una programación manual y es muy difícil que no haya desajustes de algunos segundos). Se comprueba que la prueba ha sido un éxito.

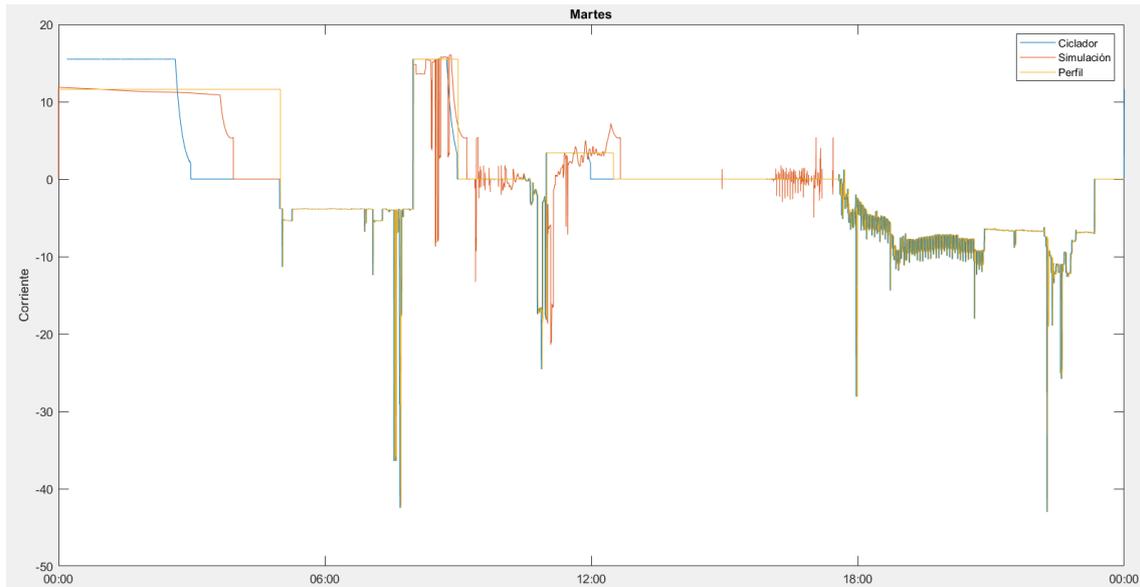


Figura 6-10: intensidad de simulación, intensidad que se pretende programar en el ciclador e intensidad que se da en el ciclador

Es importante superponer el SOC que se obtiene por simulación y el que se ha conseguido en el ciclador (Figura 6-11) para una correcta comprobación.

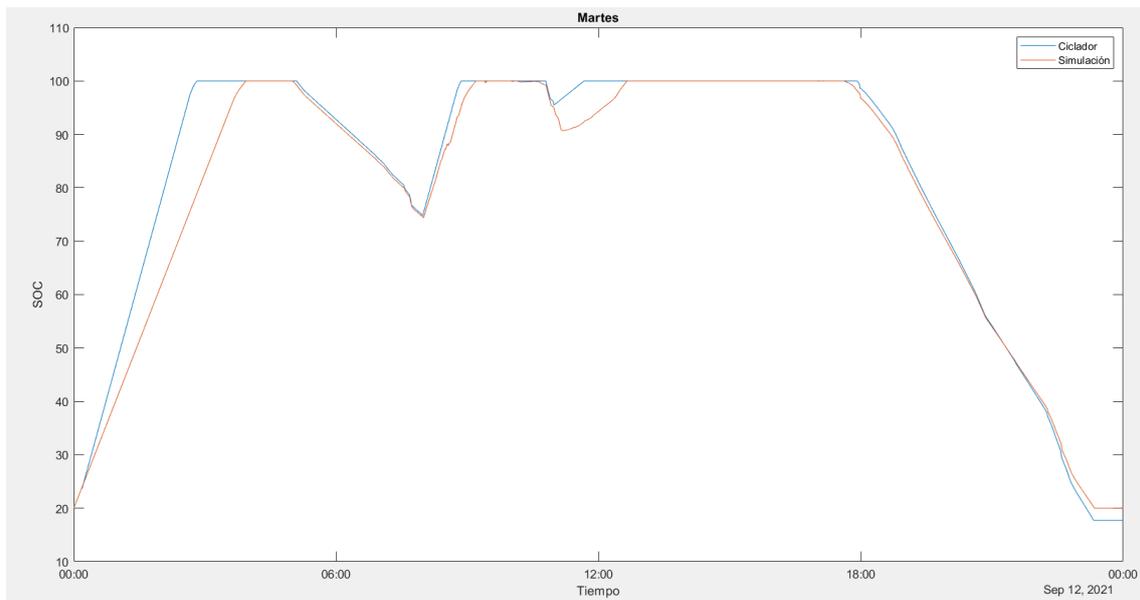


Figura 6-11: SOC que la celda FL consigue en simulación y la que consigue en el ciclador el martes

Subrayar que se debe tener en cuenta que no todos los días se consigue que los datos experimentales sigan exactamente la misma tendencia (como sucede el martes), se han producido algunos desequilibrios. Dichos desequilibrios hacen que la descarga comience algunos minutos más tarde, pero no se ha conseguido calibrar tanto las celdas. En cualquier caso, no afectan a los resultados puesto que lo único que ocurre es que la descarga o la carga comience más tarde. En la Figura 6-12 se puede ver lo que ocurre en el peor de los casos. La descarga comienza antes, pero se ajusta con un rest más largo. Como se ha comentado, no afecta a los resultados puesto que la energía trasegada va a ser la misma con o sin el retraso.

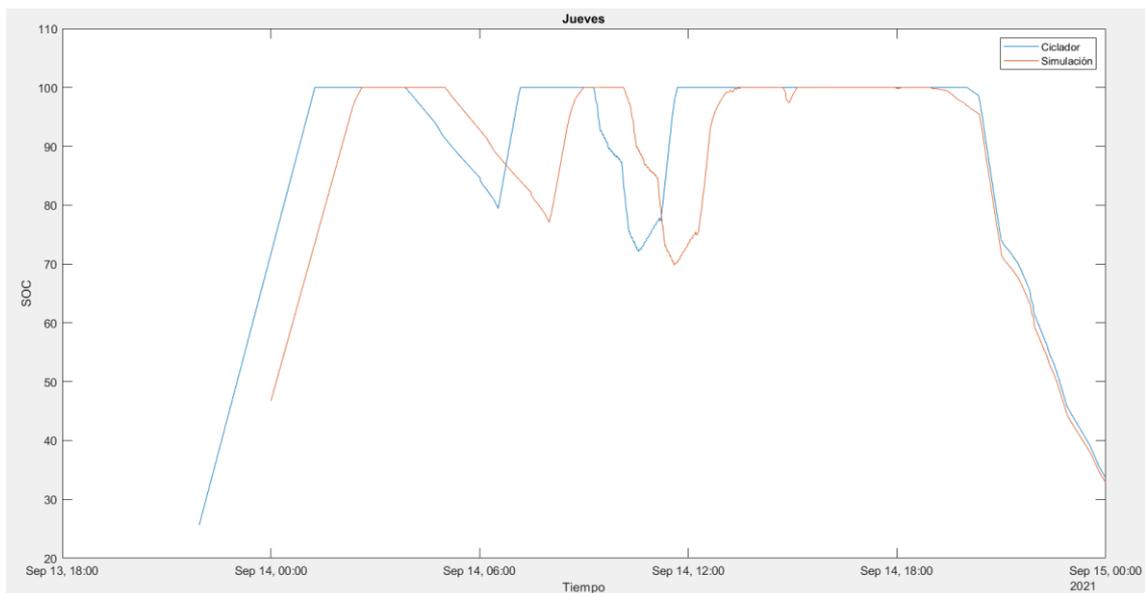


Figura 6-12: SOC que la celda FL consigue en simulación y la que consigue en el ciclador el jueves

Los principales resultados de la estrategia de autoconsumo aparecen en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: resultados de la estrategia de autoconsumo para la celda SL y FL

Celda	Semanas	Trasiego de energía (Wh)	Trasiego de corriente (Ah)	Nº de EFC	ΔR (%)	ΔC (%)
SL	1-2	4630.22	1223.31	13.7	-	-
	RPT	-	-	-	36.5	- 13.6
	3-4	5632.50	1334.73	17	-	-
FL	1-2	6294.46	1659.24	13.8	-	-
	RPT	-	-	-	3.7	- 4.5
	3-4	7148.40	1881.16	16.2	-	-

De la Tabla 6-3 El número de EFC entre ambas celdas es muy parecido.

- El trasiego de la celda FL es mayor por tener una capacidad mayor.
- La degradación de la celda de SL es mayor que la celda FL.

- En simulación y para la celda SL, en 30 días la celda ha realizado 26.5 EFC, mientras que en el ciclador se han conseguido 30.7 EFC. En simulación la capacidad ha disminuido un 1.2 % mientras que la resistencia ha aumentado un 0.1 %. La degradación en el ciclador es mayor.
- Con respecto a la celda FL, en 30 días la celda ha realizado por simulación la celda ha realizado 25.7 EFC y en el ciclador la celda ha hecho 30 EFC. La capacidad ha disminuido un 0.3 % y la resistencia ha aumentado un 0.01 % por simulación.

6.2. Microrred

La última parte del trabajo es el análisis de las baterías BeePlanet y LG. La microrred da problemas de conexión y durante la experimentación se ha apagado y se ha tenido que volver a lanzar. En cualquier caso, se analizarán los datos durante el período que las baterías han estado en funcionamiento.

La microrred sí permite programar la estrategia del mismo modo que en Matlab gracias al programa de LabView. La diferencia con Matlab es que no se va a introducir ni el modelo eléctrico ni el modelo de degradación puesto que estamos en un entorno real.

Para el análisis de resultados ha sido necesario crear un programa que filtre los datos puesto que había casos en los que el SOC variaba de un 50 % a un 0 % y que rellene los huecos donde no ha habido medidas. Resulta que hay algunos momentos (en nuestro caso el máximo es de 20 segundos) en los que la microrred no mide ningún dato. A los momentos en los que no hay datos se le ha denominado huecos, para rellenarlos se ha utilizado la función fillgaps [5]. Se trata de una función desarrollada por MathWorks que en función de todo el array de datos (en nuestro caso una matriz de datos) o en función de los datos de alrededor del hueco, rellena los huecos de forma coherente.

6.2.1. Estrategia de autoconsumo

Esta estrategia se ha programado en dos programas exactamente iguales [4] que funcionan simultáneamente mandando consignas de potencia en función de unos inputs:

1. Array en un .txt de la potencia fotovoltaica del mes de abril.
2. Array en un .txt de la potencia de consumo del mes de abril.
3. Array que indica cuándo es de noche, de tal forma que cuando se detecte que es de noche la batería sea cargada a partir de la red.

Los programas que, en función de la batería tendrán un factor de escala u otro, en función de los inputs, del SOC medido de las baterías y con una correcta programación según la Figura 5-1, mandarán la consigna de potencia adecuada a los inversores que controlan las baterías.

Al octavo día la microrred dejó de funcionar hubo que volver a lanzar la estrategia. La estrategia estuvo en funcionamiento un total de 28 días.

Batería de BeePlanet

Se va a comprobar el funcionamiento de la estrategia visualmente para, posteriormente, exponer los resultados.

Las potencias que se consiguen en la microrred y las que se han calculado por simulación tienen la misma tendencia y se puede decir que coinciden (Figura 6-13).

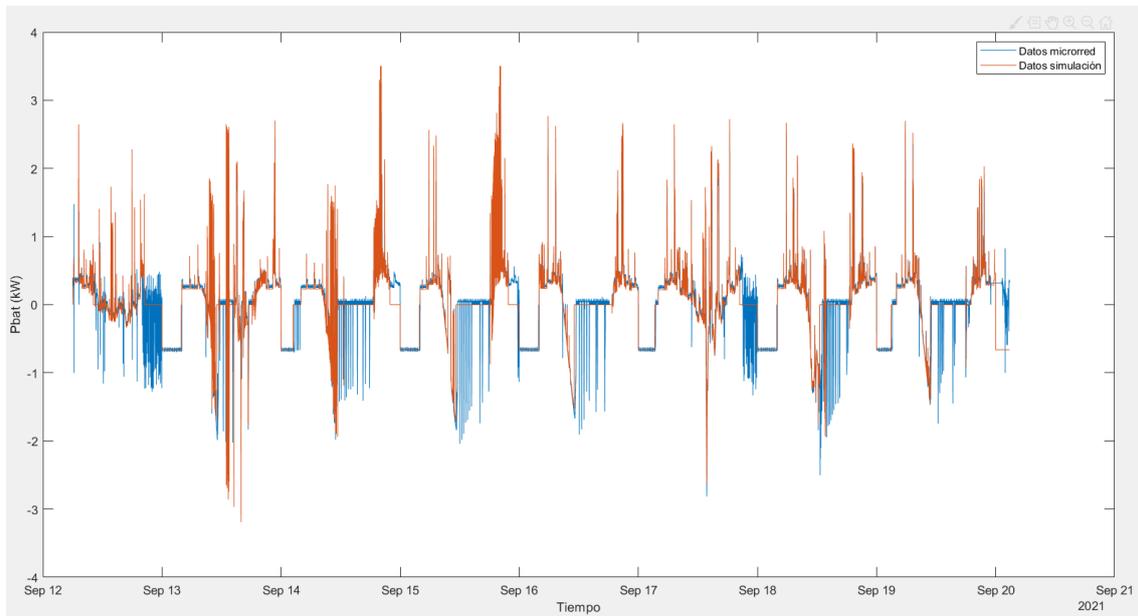


Figura 6-13: potencia de carga-descarga de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días

El SOC no tiene una coincidencia como pasaba con la potencia, sin embargo, es semejante (Figura 6-14).

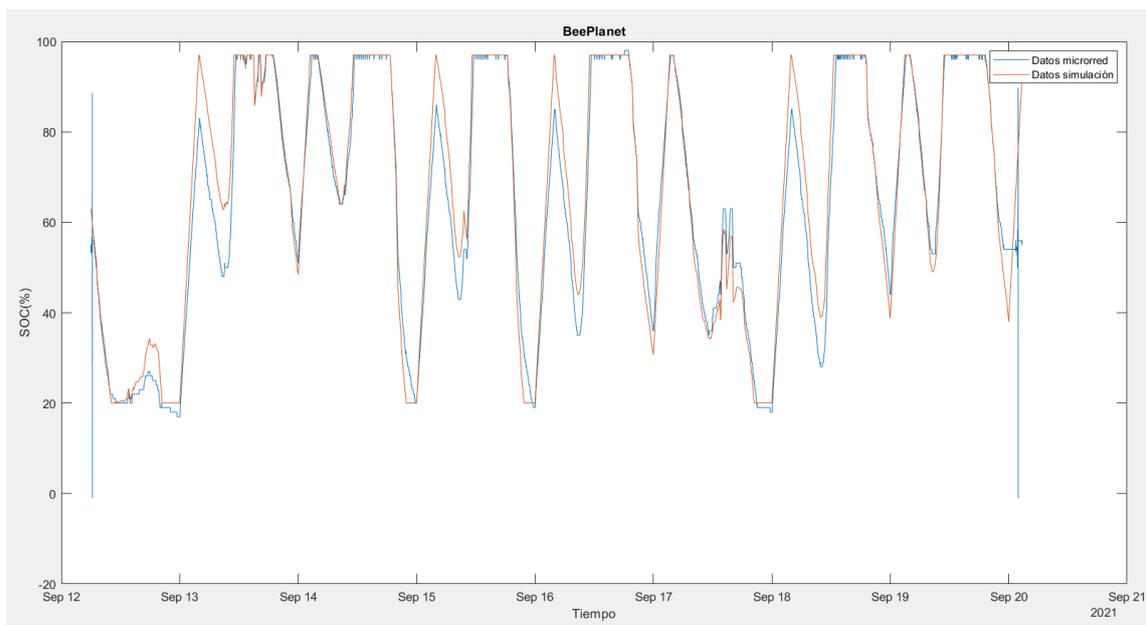


Figura 6-14: SOC de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días

La intensidad es prácticamente igual entre la que se calculó por simulación y la que se obtuvo en la microrred (Figura 6-15). Se puede ver que cuando la batería debe estar en standby se produce una descarga que no corresponde con la consigna de potencia que se calcula desde el programa LabView.

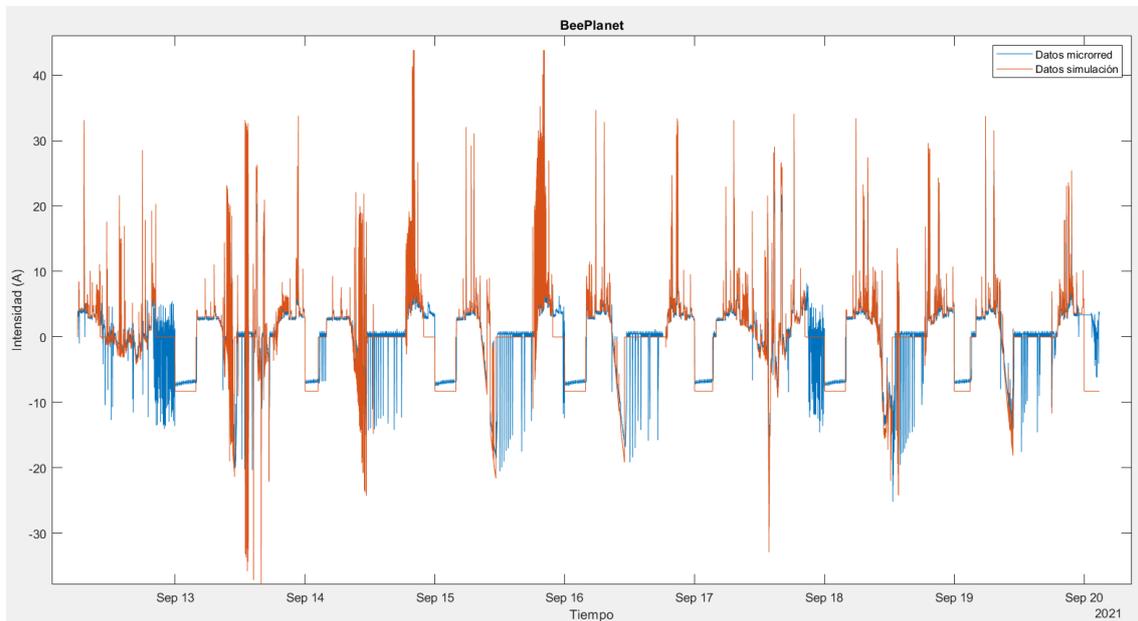


Figura 6-15: intensidad de la batería BeePlanet en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días

Tras los 28 días de funcionamiento se debe calcular conocer cuál es el autoconsumo y cuál es el trasiego de energía (Tabla 6-4).

Tabla 6-4: resultados de la estrategia de autoconsumo para la batería BeePlanet

	Trasiego de energía (kWh)	Nº de EFC	Autoconsumo (%)
Microrred	273.25	40.65	56.35
Simulación	243.05	36.15	60.78

Es normal que el trasiego de energía de la batería sea mayor en la microrred que en la simulación puesto que realmente la batería no está en standby.

Se concluye que la fase de experimentación de la microrred con la batería BeePlanet ha sido un éxito por dos razones:

- La superposición de los datos reales y los de simulación reflejan una gran similitud.
- Los resultados numéricos (trasiego de energía, número de EFC y autoconsumo) son coherentes con lo que se ha obtenido en simulación.

Batería LG

Como se ha comentado, las dos baterías funcionan simultáneamente, la única diferencia es que la batería LG, por tener una capacidad más pequeña, tendrá consignas de potencia menores que la batería BeePlanet.

La potencia calculada por simulación y la que la potencia de carga-descarga de la microrred siguen la misma tendencia, aunque, al igual que pasaba con la batería BeePlanet y pasará en la estrategia de autoconsumo, la batería nunca está en standby (Figura 6-16). La potencia de descarga de la batería LG es de 0.5 kW mientras que la de BeePlanet es de 0.7 kW.

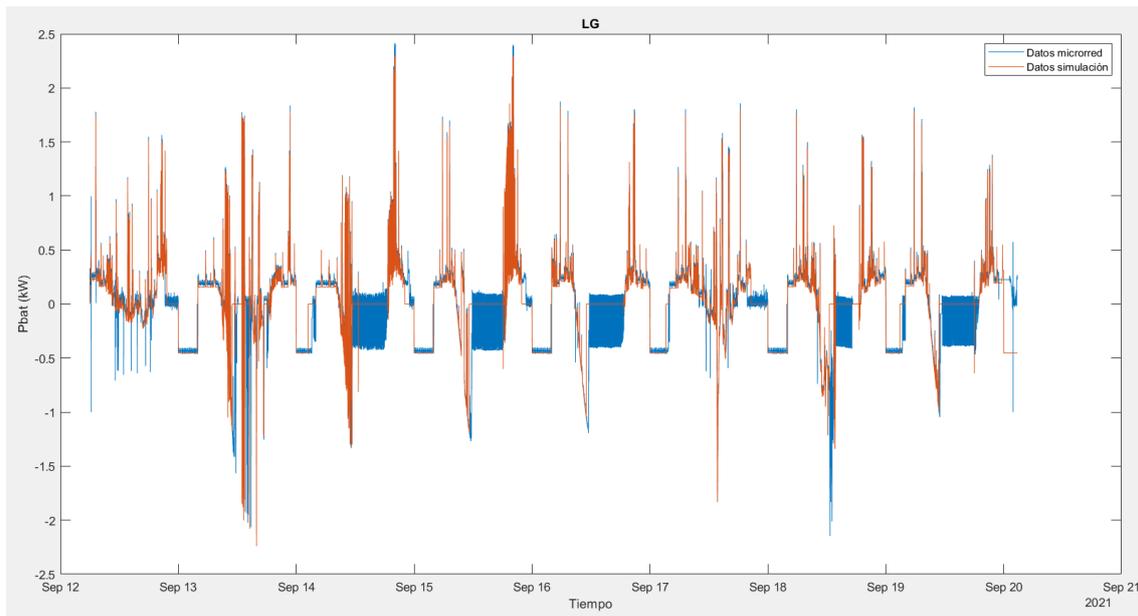


Figura 6-16: potencia de carga-descarga de la batería LG en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días

Como bien se ha explicado con anterioridad, la batería se cargará a partir de la generación del campo fotovoltaico cuando haya un exceso de energía (potencia neta > 0 kW) y cuando el SOC de la batería sea menor al 97 %. En caso de que la batería esté cargada, el exceso de energía se verterá a la red. Por otro lado, la batería se cargará entre las 00:00 h y 05:00 h, donde la electricidad es más barata, para cubrir el consumo de las primeras horas de la mañana. En la Figura 6-17 se puede comprobar el funcionamiento de la estrategia.

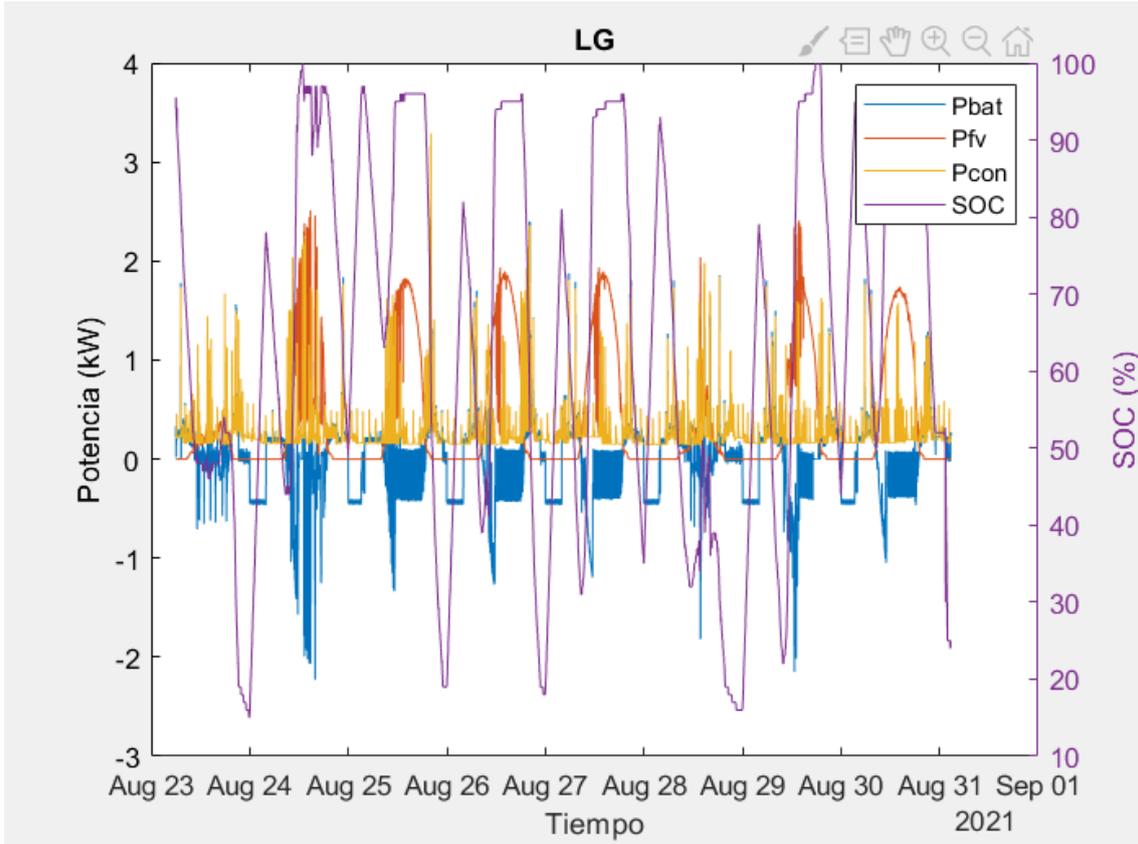


Figura 6-17: funcionamiento de la batería LG en los 8 primeros días

Por último, véase la Figura 6-18, donde se aprecia la gran similitud entre el SOC de la batería en la microrred y el obtenido por simulación.

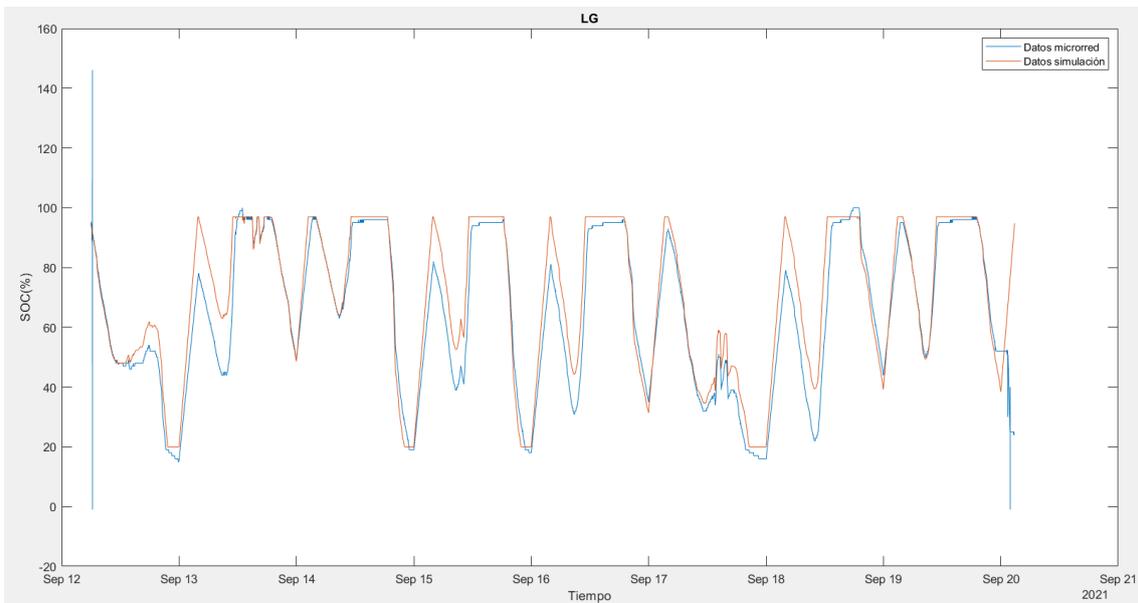


Figura 6-18: SOC de la batería LG en la estrategia de autoconsumo para los primeros 8 días

El trasiego de energía (Tabla 6-5) es muy similar, de nuevo, es mayor en la microrred por lo anteriormente comentado. El autoconsumo, que está relacionado con el trasiego de energía, es mayor en simulación.

Tabla 6-5: resultados de la estrategia de autoconsumo para la batería LG

	Trasiego de energía (kWh)	Nº de EFC	Autoconsumo (%)
Microrred	193.04	41.63	57.09
Simulación	165.19	35.66	61.70

En el Capítulo 3 se indicó cuál eran las capacidades energéticas de las baterías, tras la finalización de la estrategia de autoconsumo es imperativo volver a ensayar las baterías para comprobar cómo ha aumentado la resistencia interna y cómo ha disminuido la capacidad energética. Estos resultados se han actualizado en la estrategia de movilidad.

En la Tabla 6-6 y la Tabla 6-7 aparecen las nuevas características de la celda. Tras el análisis de la microrred, se ha comprobado que los datos no son ni tan fiables ni tan exactos como los del ciclador. Hay que filtrarlos y tratarlos, sin embargo, para obtener unos datos de ensayo resulta difícil decidir cómo tratar y filtrar los datos. Hay picos de intensidad, de tensión y de potencia que hacen que el ensayo de caracterización no se complete, en este caso no se ha conseguido el valor de resistencia interna de las baterías cuando el SOC es del 100 %.

Analizando la Tabla 6-6 se concluye que ni la resistencia ni la capacidad de la batería LG han cambiado, aunque los valores son ligeramente distintos, no se puede obtener una conclusión clara puesto que no se ha ciclado mucho la batería y es pronto para observar la degradación.

La resistencia interna, antes de la experimentación era de 9.6 mΩ, tras un mes de funcionamiento se mantiene en torno a 9.2 mΩ. La capacidad energética era de 2232 Wh y, tras el mes de funcionamiento es de 2230 Wh.

Tabla 6-6: características de la batería LG

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	-	10.2	9.5	9.2	8.9	8.6
Tensión de circuito abierto (V)	-	56	53.82	51.7	50.8	49.4

Capacidad (Ah)	44.39					
Capacidad energética (Wh)	2230					

Con respecto a la batería BeePlanet (Tabla 6-7), sí se aprecia un descenso de la capacidad, la capacidad ha disminuido de 3361 Wh a 3044 Wh mientras que la resistencia ha aumentado de 91.1 mΩ a 94.8 mΩ.

Tabla 6-7: características de la batería BeePlanet

SOC (%)	100	90	70	50	30	10
Resistencia interna (mΩ)	-	97.5	96	94.8	91.3	87
Tensión de circuito abierto (V)	-	101	94.5	97.8	97.7	93.9
Capacidad (Ah)	34.27					
Capacidad energética (Wh)	3044					

6.2.2. Estrategia de movilidad

Para la estrategia de movilidad se cuentan con unos inputs que permitirán el correcto desarrollo de la estrategia, estos inputs son:

- El array del vector tiempo que indica cuándo hay autobús y cuánto tiempo hay hasta que venga el siguiente autobús.
- El array de potencias del consumo del autobús, que debe complementarse con el array tiempo.
- En todo momento se mide el SOC de las baterías.

Con los parámetros que se acaban de indicar y siguiendo el organigrama de la Figura 4-2, se ha programado la estrategia en LabView. Cuando la estrategia ha decidido a qué potencia debe cargarse-descargarse la batería mandará una consigna de potencia a los inversores (dependiendo de la batería será una u otra potencia).

Se han programado las baterías en un único programa LabView para que sea más compacto. En función de la capacidad energética de la batería se ha escalado de una u otra forma, es decir, tienen un factor de escala diferente.

Tras los cinco primeros días la microrred se apagó y hubo que volver a relanzar la estrategia. En este Trabajo se cuenta únicamente con esos cinco días.

Batería BeePlanet

A continuación se van a mostrar una serie de gráficas en donde aparece información muy relevante para el Trabajo, siempre con el objetivo de comparar los datos de simulación con los obtenidos en la microrred. En la Figura 6-19 aparecen las potencias durante todo el período de funcionamiento de la batería BeePlanet, en la Figura 6-20 aparece el SOC de la batería durante todo el período de experimentación de la batería.

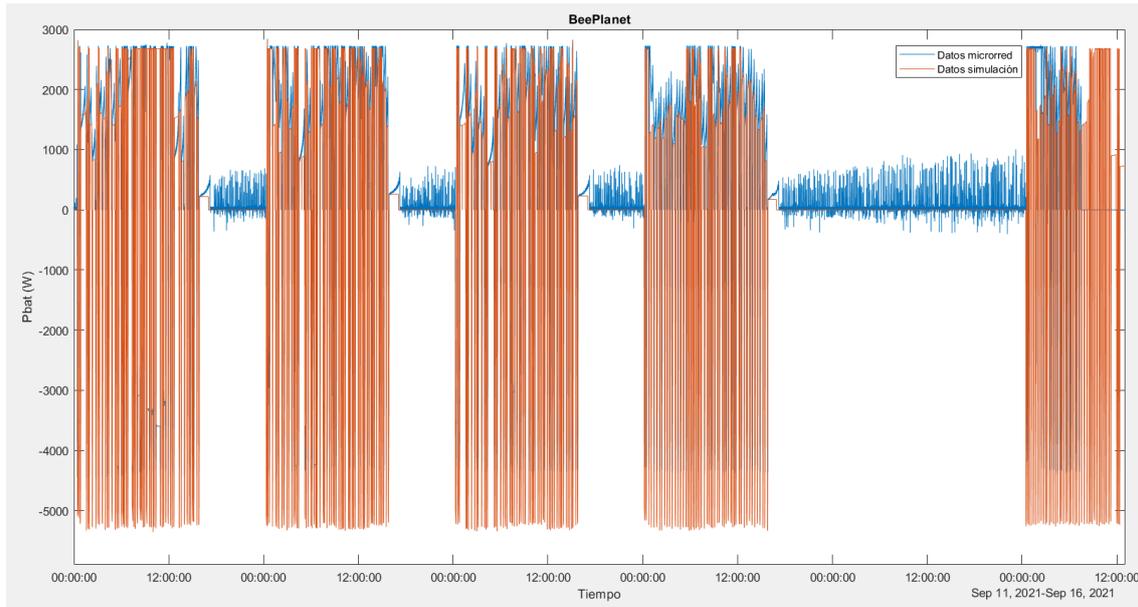


Figura 6-19: potencia de simulación y potencia en la microrred de la batería BeePlanet

De la Figura 6-19 se puede exponer que la tendencia es muy similar entre la simulación y la experimentación, vemos que cuando la batería tiene que estar en standby, en la microrred está dando constantemente valores de potencia, se está descargando a pesar de que desde la estrategia se esté mandando una consigna de potencia de 0 kW. En la Figura 6-20 se puede comprobar cómo se descarga la batería cuando es de noche. Esto influirá en el trasiego de energía.

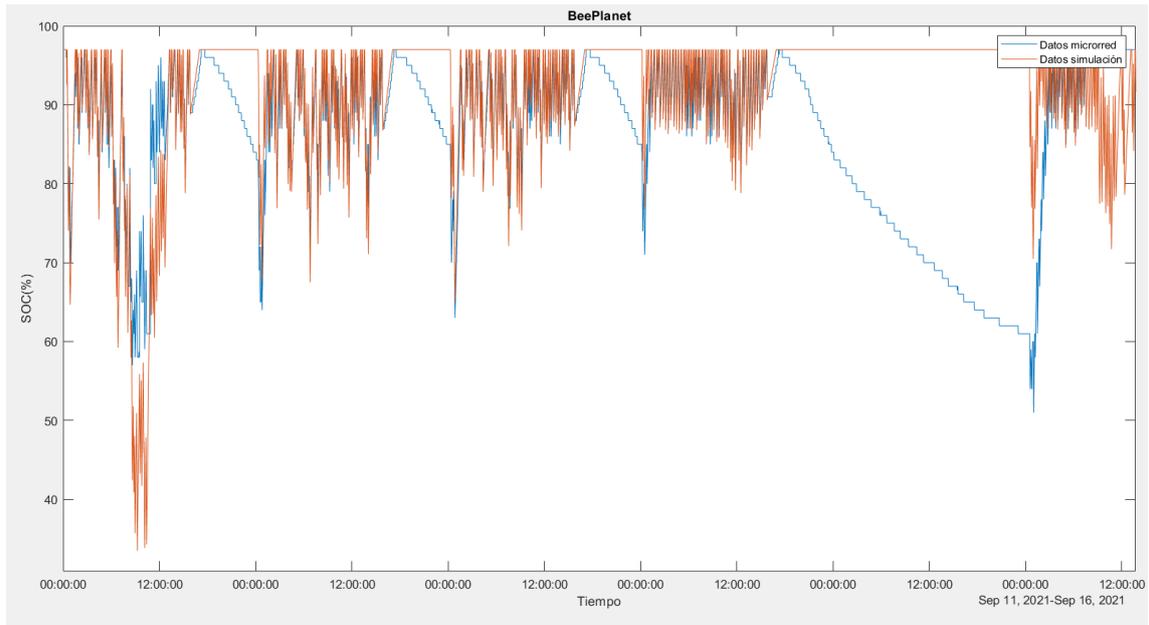


Figura 6-20: SOC de la batería BeePlanet en la microrred y en simulación

En la Figura 6-21 se representa el SOC de la batería entre las 09:00 y las 12:00 del lunes, se ve que el SOC se mantiene, la batería está en standby y no debe estarlo. Durante el día la batería se tiene que estar cargando y descargando constantemente.

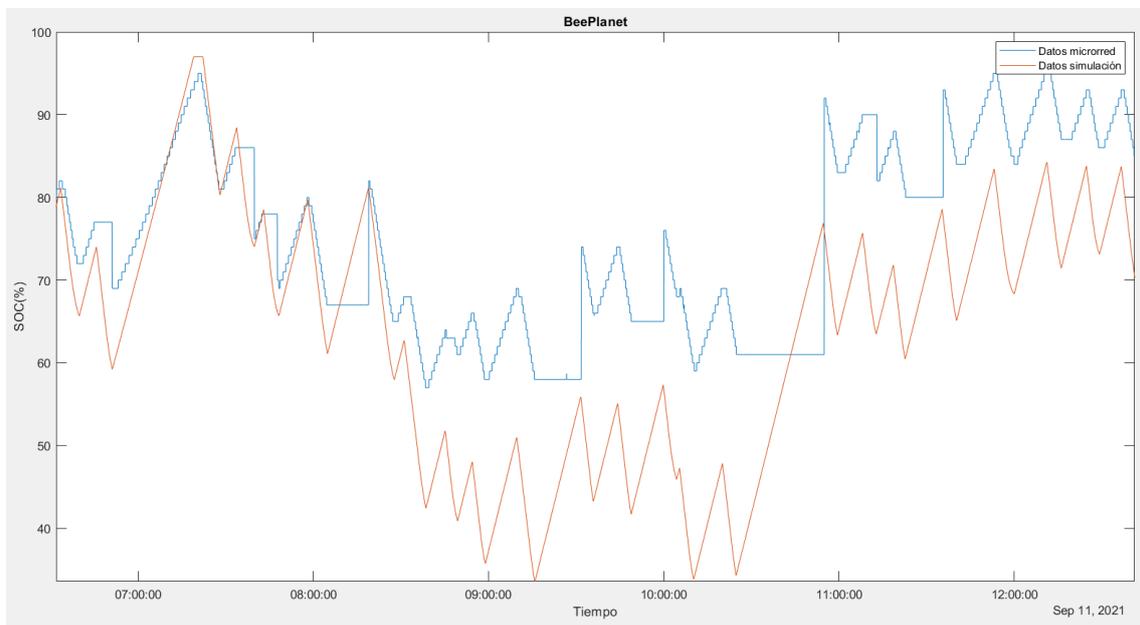


Figura 6-21: SOC de la batería BeePlanet entre las 09:00 y las 12:00 del lunes

En la Figura 6-22 se ve la potencia de la microrred para las horas que está en standby, vemos que la potencia no es 0. Por tanto, la microrred no está midiendo bien en esos puntos. Además, en la Figura 6-21 vemos que a las 11:00 pasa de un SOC del 60 % a un 90 %. Se trata de un ejemplo claro de datos que no son válidos. Tras analizar los datos se decidió aplicar fillgaps, de modo que actúe no sólo en los huecos, sino con los datos que se consideren que no son aptos. En la Figura 6-26 se puede ver la gran mejora que supone

aplicar el algoritmo. Ahora se tienen unos datos más reales. Los datos y gráficas que se muestran a continuación ya han sido tratados con fillgaps.

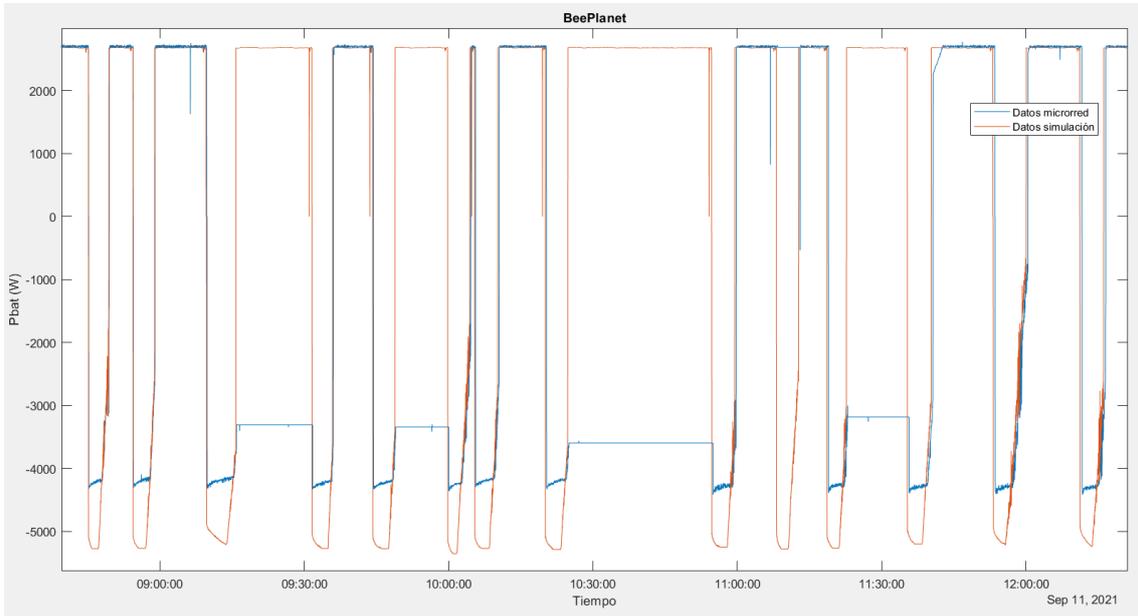


Figura 6-22: potencia de la batería BeePlanet entre las 07:00 y las 12:00 del lunes

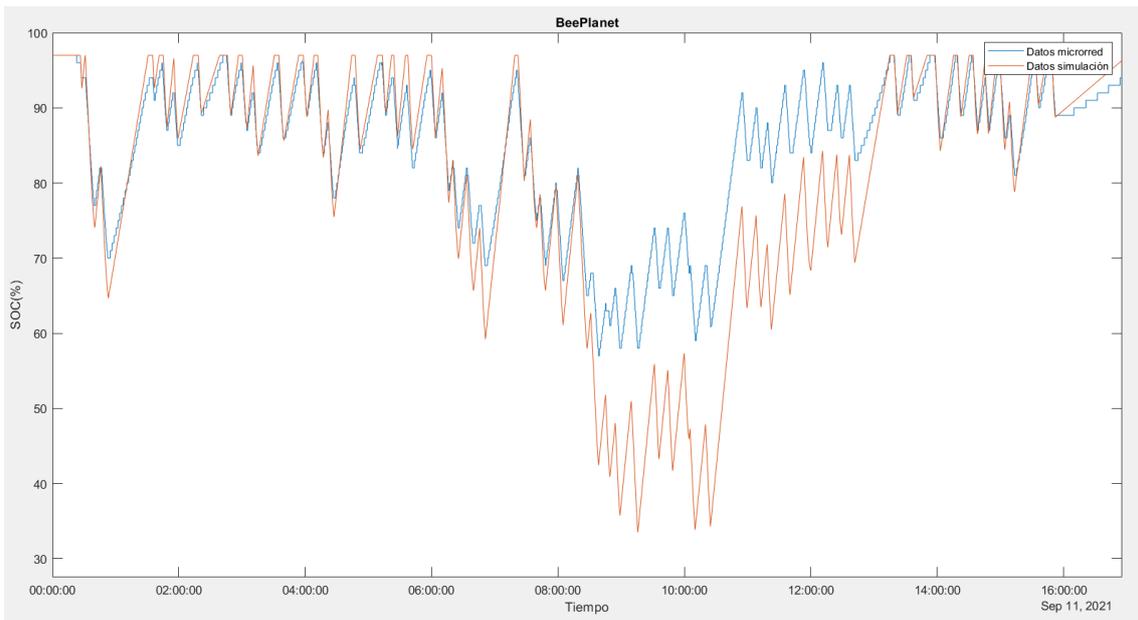


Figura 6-23: SOC de la batería BeePlanet tras aplicar fillgaps

Compárese la Figura 6-22 y la Figura 6-24.

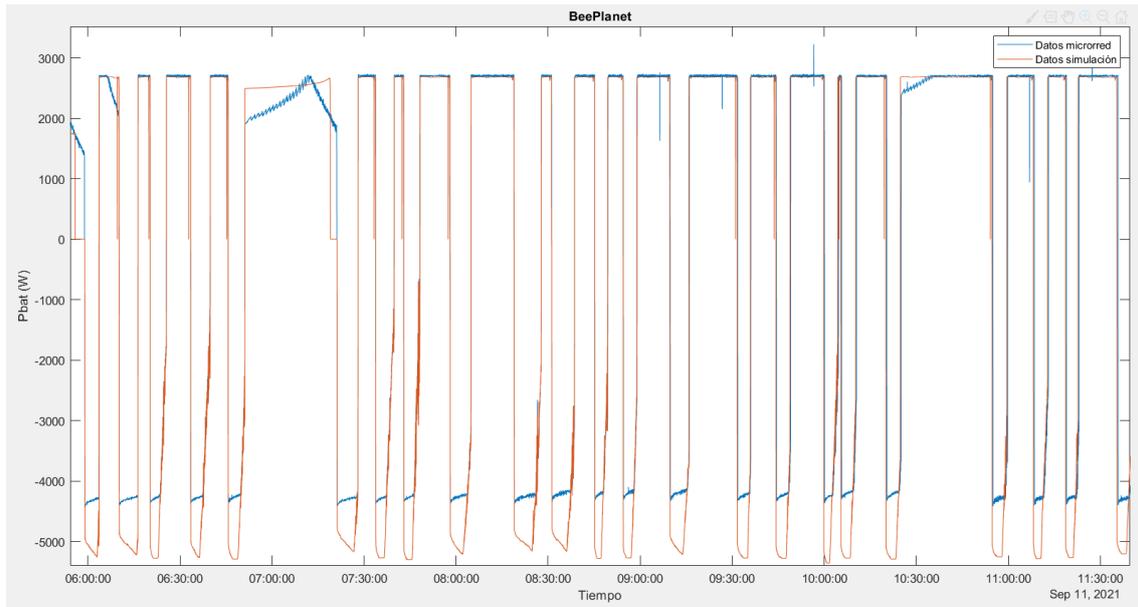


Figura 6-24: potencia de la batería BeePlanet tras aplicar fillgaps

Hay que prestar atención a que la potencia de descarga de la batería en la microrred es de 4500 W mientras que en simulación es de 5100 W. La consigna de potencia de la batería es superior a la que realmente se obtiene.

De la Figura 6-25 y la Figura 6-26 se obtiene que la intensidad de descarga es inferior a la que se había obtenido en simulación (8 A). La tensión, en todo momento, se mantiene por encima de la simulación, esto explica que la potencia se acerque más a lo obtenido por simulación. Si la tensión es más alta de lo previsto, la intensidad será menor.

La intensidad alcanza valores de 55 A, y la microrred no está preparada para soportar esta intensidad durante un largo período de tiempo. El problema que hubo es que se fundió el fusible de la batería BeePlanet.

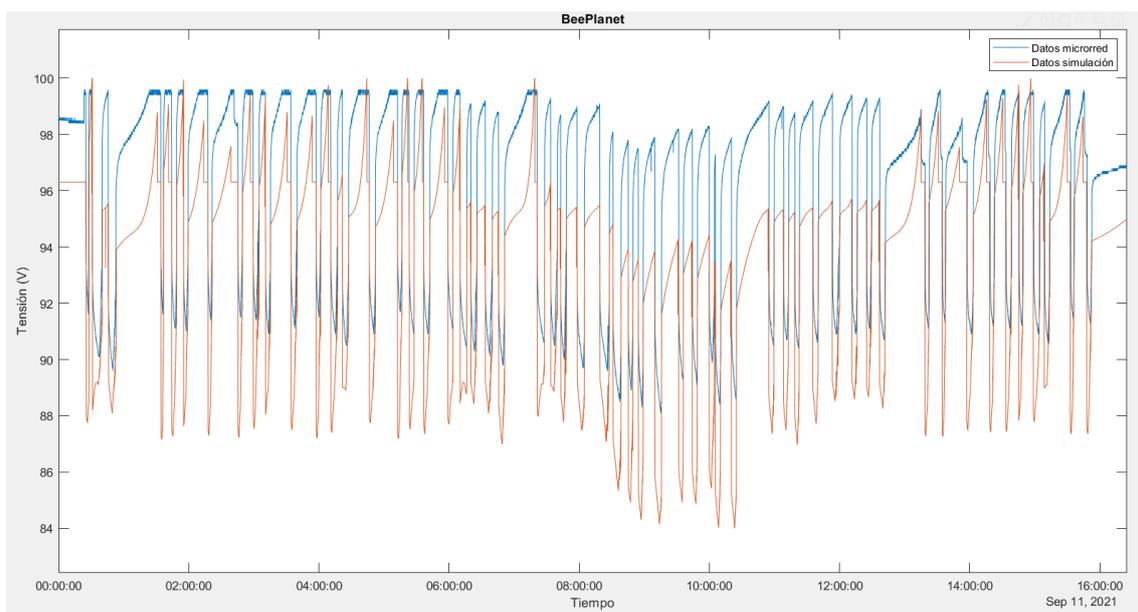


Figura 6-25: tensión de la batería BeePlanet el lunes

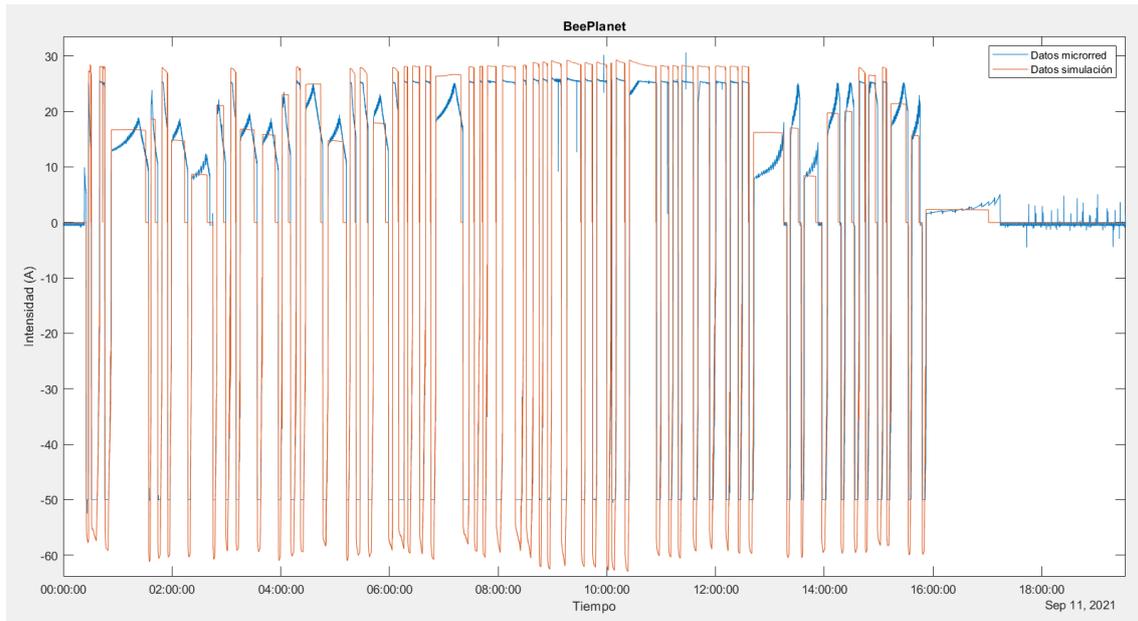


Figura 6-26: intensidad de la batería BeePlanet el lunes

Los resultados que se muestran en la Tabla 6-8 tienen coherencia con los resultados de la Tabla 4-8. Los datos de la microrred son semejantes a los de simulación diferenciándose, en relación al número de EFC, en un 13 %.

Tabla 6-8: resultados principales de la microrred y de la simulación para la batería BeePlanet de la estrategia de movilidad

	Trasiego de energía (kWh)	Nº de EFC
Microrred	181.77	38.41
Simulación	160.82	33.9

Batería LG

En este caso se parte con los datos filtrados. Se comprobará, al igual que en el caso de la batería BeePlanet, la potencia, el SOC, la intensidad y la tensión de la batería LG para el lunes de forma visual para continuar exponiendo los datos principales (trasiego de energía y número de EFC).

En la Figura 6-27 se ve que la consigna de potencia es muy parecida y en la Figura 6-28 se puede comprobar que el SOC el mismo tanto en simulación como en la microrred (a excepción del período en donde había datos irregulares, en torno a las 10:00 horas). En este caso la batería se sigue descargando por las noches pero en menor medida.

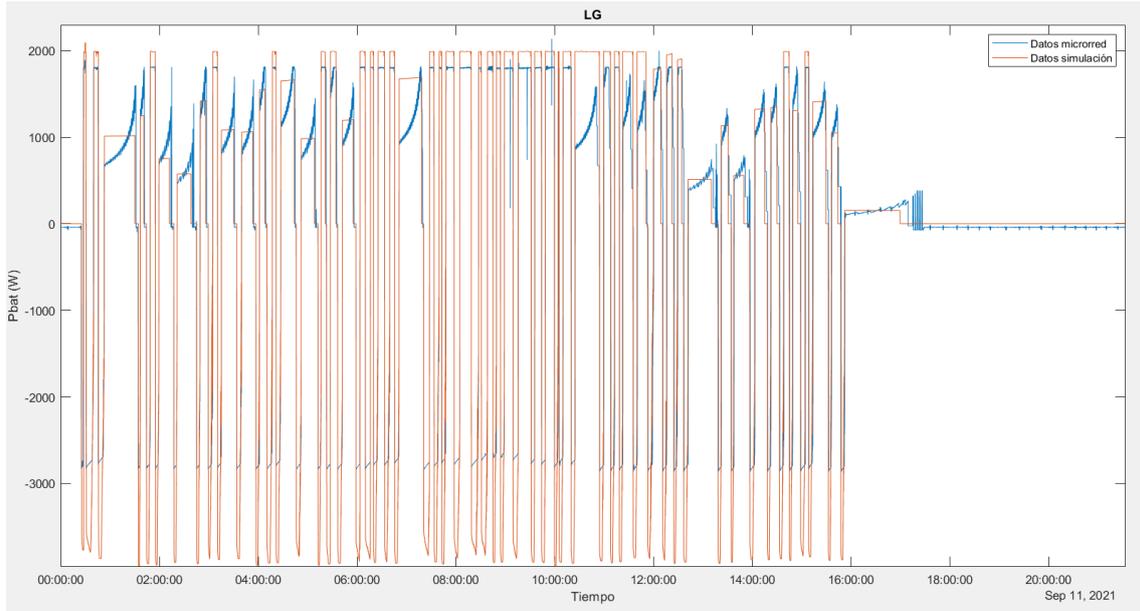


Figura 6-27: potencia de la batería LG

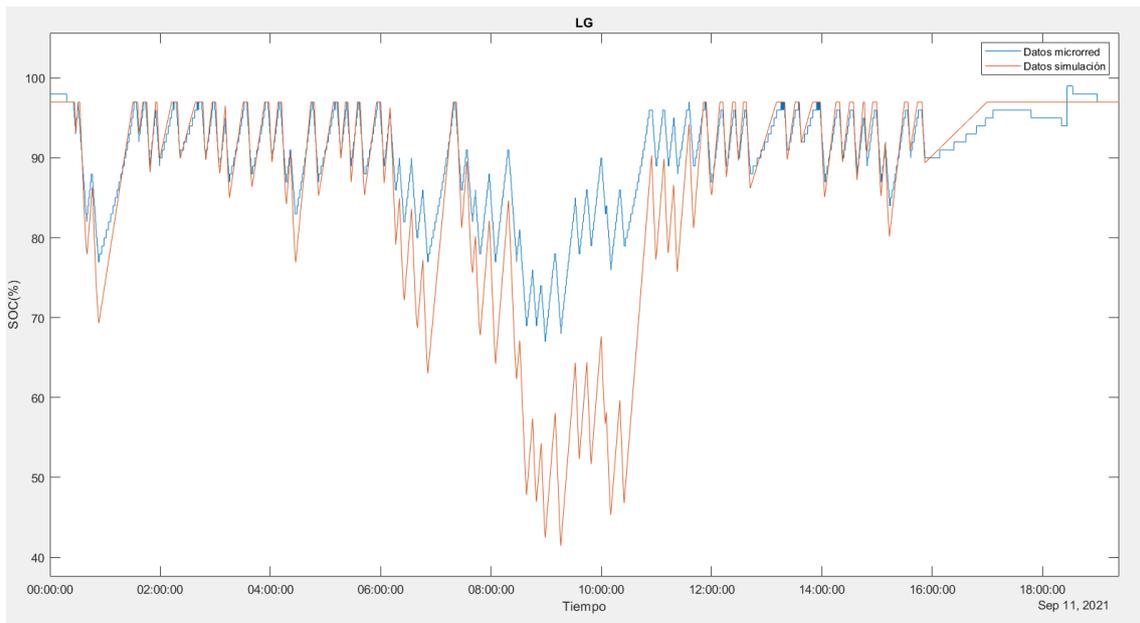


Figura 6-28: SOC de la batería LG

En Figura 6-29 se ve que la intensidad de descarga de la batería LG es mucho inferior (18 A de diferencia) que la que se obtiene por simulación. En Figura 6-30 pasa lo mismo que lo que ocurría con la batería BeePlanet, y es que la tensión es superior a la que se había previsto.

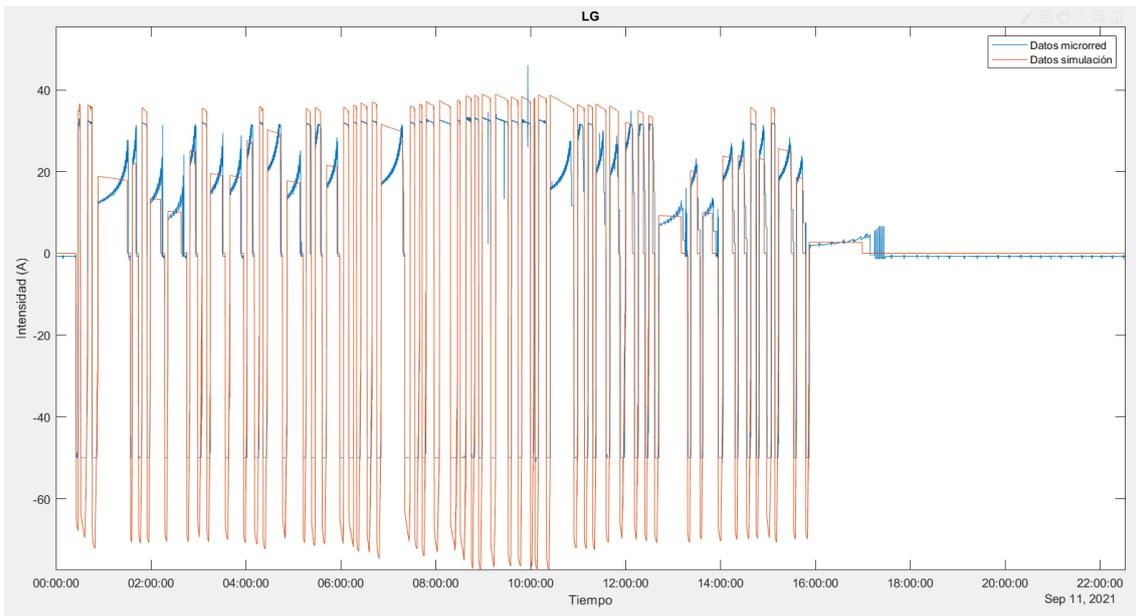


Figura 6-29: intensidad de la batería LG

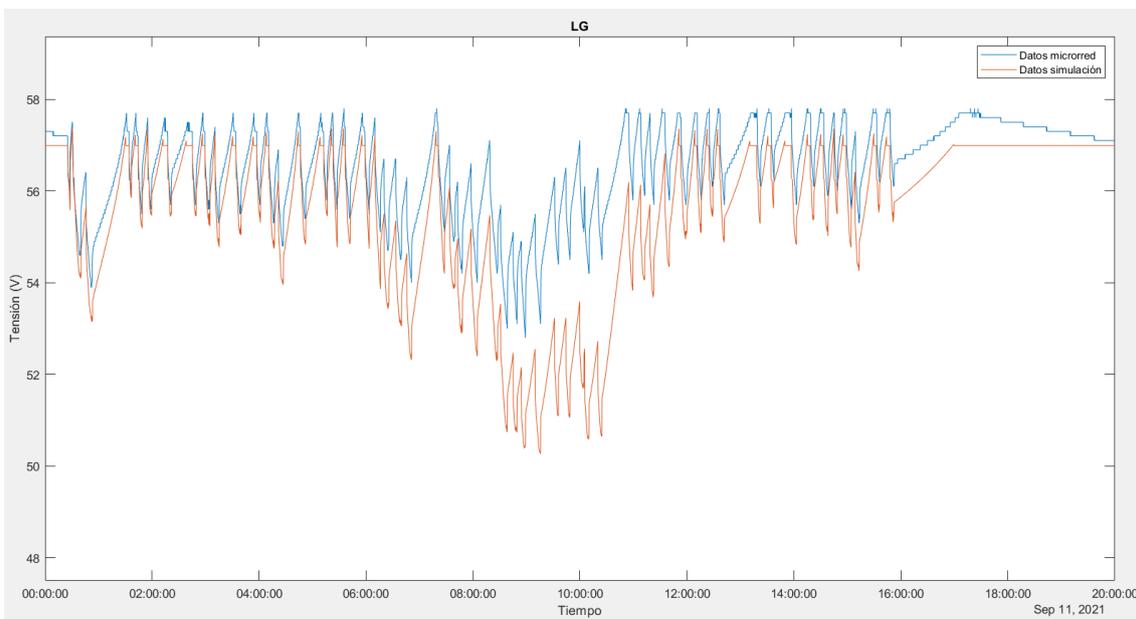


Figura 6-30: tensión de la batería LG

De nuevo, la energía trasegada vuelve a ser mayor en la microrred que el que se había previsto por simulación (Tabla 6-9). Aunque la potencia de descarga sea menor, durante toda la noche está descargándose sin que se haya indicado. Es decir, se trata de una autodescarga.

La diferencia entre el trasiego de energía es del 13 %, siendo el número de EFC un 15 % mayor que en simulación, con lo que la experimentación ha resultado exitosa.

Tabla 6-9: resultados principales de la microrred y de la simulación para la batería LG de la estrategia de movilidad

	Trasiego de energía (kWh)	Nº de EFC
Microrred	128.81	29
Simulación	113.71	25.16

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El objetivo del Trabajo es comprobar si usar una batería de segunda vida es viable técnicamente en una estrategia como el de movilidad o, por el contrario, ofrece mejores prestaciones en una estrategia de autoconsumo residencial. Es interesante que los resultados, así como el comportamiento de la batería, sea comparados con una batería nueva.

Gracias al análisis por simulación se ha averiguado cómo se iban a comportar las celdas/baterías, esto ha permitido, posteriormente, desarrollar una metodología capaz de implementar las estrategias tanto en el ciclador como en la microrred.

La comprobación de que el número de EFC se acerca al obtenido en simulación, garantiza que el modelo representa correctamente el comportamiento de las celdas/baterías. De modo que se puede apreciar la importancia que tiene el consumo de la resistencia interna, los picos de corriente que se dan cuando la celda/batería tiene un SOC bajo y a qué potencia se tiene que cargar la batería.

Con respecto a la estrategia de autoconsumo:

- Se trata de una estrategia mucho menos agresiva. Durante un año el número de EFC de la batería está en torno a 450 mientras que el número de EFC en la estrategia de movilidad, en los primeros tres meses, es de 550. Experimentalmente esto también se ha comprobado en el ciclador puesto que en movilidad se han realizado 180 EFC y en autoconsumo 38 EFC en un período de un mes.
- La degradación de la celda FL ha sido menor que la celda SL. Tras las dos primeras semanas la resistencia en la celda FL ha aumentado un 3.7 % mientras que su capacidad ha disminuido un 4.5 %. La celda SL ha experimentado un aumento de su resistencia interna de un 36.5 % y su capacidad ha disminuido un 13.6 %. Ambas celdas han realizado 13.7 EFC. Por tanto, no existe un envejecimiento lineal a lo largo de la vida útil de una celda.
- El autoconsumo en la microrred es un poco inferior que en simulación, además, el trasiego es mayor porque cuando la batería debe estar en standby resulta que se descarga.
- Se realizó un ensayo de caracterización de las baterías tras la estrategia de autoconsumo residencial, se comprobó que la capacidad de la batería de BeePlanet había disminuido (un 10 % con respecto al inicio) mientras que la batería de LG presenta la misma capacidad y resistencia. La resistencia apenas ha variado en la batería de BeePlanet.

Con respecto a la estrategia de movilidad:

- La potencia superior de red se debe aumentar por lo menos en un 5 % para asegurar que la batería no se descargue por completo durante el día. Esto es independiente de si la batería es nueva o de segunda vida.

- Tanto en simulación como en experimentación se aprecia una notoria diferencia entre la degradación de la celda SL y FL. En dos semanas la capacidad de la celda FL disminuyó un 3.9 % y su resistencia aumentó un 4.1 % mientras que la capacidad de la celda SL disminuyó un 6.3 % y su resistencia aumentó un 27.6 %.
- La degradación calculada por simulación no se parece a la obtenida en el ciclador, por lo que es necesario desarrollar otro modelo de degradación. Esto se debe a que los datos experimentales de la degradación de la celda no son exactamente los mismos que las celdas que se han analizado. Es decir, la degradación de las celdas que se ha calculado por simulación se corresponde con los datos del Capítulo 3, esto indica que el modelo funciona correctamente. Por otro lado, el número de EFC de las celdas en el ciclador y en simulación son prácticamente los mismos, no siendo así la variación de capacidad y resistencia. Las celdas FL y SL que se han experimentado durante un mes tienen un comportamiento de degradación distinto a las celdas FL y SL de cuyos datos se disponían al inicio del Trabajo.
- En la microrred los datos obtenidos se asemejan a los datos simulados, sin embargo, hacen falta más días para analizar experimentalmente la batería. En cualquier caso, el número de EFC y el trasiego de energía han sido validados experimentalmente.
- Es necesario realizar un ensayo tras cada estrategia para comprobar la degradación de las baterías.
- El gran número de EFC a la que la batería es sometida indica que una batería de segunda vida puede no ser válida para esta estrategia puesto que la degradación es un factor clave y determinante. La degradación puede hacer que a los tres meses la capacidad y la resistencia hayan cambiado tanto que hagan que la batería haya que sustituirla. Una batería nueva sí es apta puesto que su degradación es mucho menor. Esta degradación ha sido confirmada a nivel de celda.
- Como se ha comentado, no se ha podido realizar el estudio de la estrategia de movilidad original puesto que la intensidad admisible del ciclador es inferior a las intensidades que se obtenían por simulación. La degradación habría sido mayor debido al mayor número de EFC.

No es trivial garantizar que una batería de segunda vida funcione correctamente ante situaciones exigentes, actualmente existe un gran interés en garantizar la viabilidad en diferentes circunstancias. Destacar, que las conclusiones más férreas de este trabajo se han obtenido a partir del ciclador, en donde la duración ha sido de un mes para cada estrategia. Es necesario seguir con el estudio durante dos meses más y realizar ensayos periódicos (cada dos semanas un RPT) para ver cómo evolucionan las celdas.

También hay que estudiar la degradación que sufren las baterías en un sistema con mayor potencia, como la microrred. Se debe llevar a cabo un período de experimentación más largo para estudiar en detalle las baterías.

El estudio por simulación es fiable para analizar el comportamiento de una batería a largo plazo que, combinándolo con la experimentación, de forma que se actualicen los datos de degradación, pérdidas, etc., se pueda garantizar la viabilidad de una batería en cualquier situación.

Todo apunta a un nuevo mercado de baterías de segunda vida, se debe realizar un gran esfuerzo para garantizar a los futuros clientes cómo se va a comportar la batería ante diversas situaciones. Además, el cliente debe conocer por qué puede resultar ventajoso y por qué en algunas situaciones es mejor una batería de segunda vida que una nueva.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, «Pacto Verde Europeo,» 2020.
- [2] ACEA (European Automobile Manufacturers Association), «Fuel types of new cars,» [En línea]. Available: <https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-electric-10-5-hybrid-11-9-petrol-47-5-market-share-full-year-2020/>. [Último acceso: 14 Julio 2021].
- [3] A. B. J. P. P. S. A. U. Iñaki Ojer, «Development of energy management strategies for the sizing of fast charging station for electric buses,» 2020.
- [4] Á. M. Castilla, «Estrategia de gestión energética con baterías de segunda vida para autoconsumo residencial,» Pamplona, 2021.
- [5] MathWorks, 2021. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/signal/ref/fillgaps.html>.

ANEXO I

En este capítulo aparecen los datasheet de las baterías LG y BeePlanet, como se ha comprobado no es del todo fiable, pero ha servido como punto de partida. Es normal que los datos del fabricante no coincidan porque las baterías han sufrido un gran número de EFC antes de este Trabajo.

BATTERY	Battery type	EV Second Life
	Chemistry	LMO
	Number of modules	12 modules
	Nominal capacity (Wh)	4000 Wh
	Nominal capacity (Ah)	45 Ah
	Maximum charge and discharge power	4000 W
	Nominal voltage	90 V
	Operating voltage	72 V - 100 V
	Maximum current	50 A
	Depth of Discharge (DoD)	90%
	Estimated equivalent cycles (90% DoD, 25°C)	> 2000 cycles
GENERAL SPECIFICATIONS	Working temperature	5°C - 40°C
	Operating humidity	5% - 90% relative humidity
	Weight	60 kg
	Dimensions (Height x Width x Depth)	500 x 750 x 300 mm
	Enclosure	GRP Polyester cabinet reinforced with fiberglass
	IP Rating	IP 43
	IK Rating	IK 10
	Modularity	Yes
	Optimum location	Indoor and ground-level
	Envelope with self-extinguishing material	Yes (960°C)
	Natural ventilation	Yes
	Resistance to chemical and corrosive environments	Yes
	Double insulation	Yes
	Communications	BUSCAN, Bluetooth, Wifi
Protections	Overcharge, overdischarge, overcurrent, overheating	
Warranty*	2 years	
CERTIFICATIONS AND CE MARKING	Endosure	IEC 62208 UNE-EN 62262 UNE 20672
	Battery	IEC 62619
	EMC Electromagnetic Compatibility (2014/30/EU)	UNE-EN 61000-2/4
	Electrical Safety Low Voltage Directive (2014/35/EU)	UNE-EN 61439-1

Figura A-1: datasheet de la batería BeePlanet

Electrical Characteristics		
Total Energy Capacity	3.3 kWh	
Usable Energy Capacity ¹⁾	2.9 kWh	
Battery Capacity	63 Ah	
Voltage Range	42.0 to 58.8 V _{DC}	
Nominal Voltage	51.8 V _{DC}	
Max. Charge/Discharge Current	71.4A	
Peak Current ²⁾	78.6A for 3 sec.	
Max. Charge/Discharge Power ³⁾	3.0kW	
Peak Power ²⁾	3.3kW for 3 sec.	
Battery Pack Round-Trip Efficiency	>95% (under specific condition)	
Communication Interface	CAN 2.0B	
DC Disconnect	Circuit Breaker, Contactor, Fuse	
Operating Conditions		
Installation Location	Indoor / Outdoor (Stand / Wall-Mounted)	
Operating Temperature	-10 to 45°C	
Operating Temperature (Recommended)	15 to 30°C	
Storage Temperature	-30 to 60°C : ~7 days -20 to 45°C : ~ 6 months	
Humidity	5% to 95%	
Altitude	Max. 2,000m	
Cooling Strategy	Natural Convection	
Certification		
Safety	Cell	UL1642
	Battery Pack	CE / RCM / FCC / TUV (IEC 62619) / UL1973
EMC	IEC61000-6-1, IEC61000-6-3	
Hazardous Materials Classification	Class 9	
Transportation	UN38.3	
Ingress Rating	IP55	

※ Test Conditions - Temperature 25°C, at the beginning of life

※ Total Energy is measured under specific condition from LGC(0.3CCCV/0.3CC)

Figura A-1: datasheet de la batería LG