

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

PROVISIÓN DE SERVICIOS APILADOS A RED MEDIANTE BATERÍAS DE ION-LITIO DE SEGUNDA VIDA



Trabajo Fin de Grado

Marta Alonso Santos

Javier Samanes Pascual

Alberto Berrueta Irigoyen

Pamplona, 28 enero 2021

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos

La idea de este trabajo surge de la incapacidad del sistema eléctrico tal y como se concibe hoy en día debido a los altos niveles de consumo y a la falta de energía limpia. La principal adaptación de este sistema pasa por disminuir los hábitos de consumo y potenciar la energía renovable, demostrando así su capacidad de expansión e integración en el sistema.

Ese fue el punto de partida para este proyecto, que finalmente se ha desarrollado en torno a la mejora del sistema mediante la provisión de servicios a red por parte de los sistemas de almacenamiento energético y más concretamente las baterías de segunda vida, lo que, como se verá más adelante, contribuirá a la mejor integración de las renovables. La principal motivación de este proyecto ha sido la de poder corroborar la posibilidad de impulsar esta clase de servicios en el sistema, así como demostrar sus beneficios y rentabilidad.

A nivel personal ha sido un gran desafío que me ha permitido enfrentarme tanto a sistemas de baterías y microrred en sistemas reales como al manejo de programas como Matlab o Labview. Me gustaría agradecer especialmente a Alberto y a Javier por haberme abierto las puertas a este proyecto y haberme guiado por él, así como a Elisa por su gran ayuda y apoyo y a mis compañeros de laboratorio.

Índice

Agradecimientos	2
Índice de figuras	4
Índice de tablas	5
Resumen y palabras clave	6
1.1 Resumen.....	6
1.2 Palabras clave.....	6
1.3 Acrónimos	6
2. Introducción	7
3. Servicios a red	9
3.1- Caso de estudio y sistema de gestión energética (EMS).....	11
4. Experimental setup	18
4.1. Ensayos a nivel de celda en cicladores.....	18
4.2. Ensayos con batería completa en microrred	19
5. Resultados experimentales	21
5.1- Resultados a nivel de celda en cicladores.....	21
5.1.1- Perfiles de tensión.....	21
5.1.2- Resultados de eficiencia y degradación	23
5.2 Resultados de la microrred	24
6- Conclusiones y líneas futuras.....	28
Bibliografía	29
Anexos.....	34
Anexo 1- programación en matlab.....	34
1.1- Regulación primaria de frecuencia.....	34
1.2- <i>Peak shaving</i>	37
1.3- <i>Stacked services</i>	39
Anexo 2- programación en labview	40
Anexo 3- desglose de resultados.....	44
3.1 Obtención de resultados	44
3.2 Resultados para regulación primaria de frecuencia.....	46
3.3- Resultados para <i>peak shaving</i>	47
3.4- Resultados para <i>stacked services</i>	48
3.5- Datos característicos de los módulos.....	49
Anexo 4- organización de archivos.....	51

Índice de figuras

Figura 1- Gráfico de funcionamiento de RFP	10
Figura 2- Generación FV 9 semanas	12
Figura 3- Frecuencia de red para el año 2016.....	12
Figura 4- Representación esquemática del caso de estudio.....	13
Figura 5- Programación de RFP y PS.....	14
Figura 6- Estado de carga vs. tiempo para RFP).....	15
Figura 7- Estado de carga vs. tiempo para PS	15
Figura 8- Estado de carga vs. tiempo para STACKED	15
Figura 9-Histogramas representativos para RFP	16
Figura 10-Histogramas representativos para PS	16
Figura 11-Histogramas representativos para STACKED	17
Figura 12-Experimental setup de módulos individuales).....	18
Figura 13- Esquema de funcionamiento de la microrred.....	20
Figura 14- Principales componentes de la microrred	20
Figura 15- Tensión vs. Tiempo para RFP	22
Figura 16- Tensión vs. Tiempo para PS	22
Figura 17- Tensión vs- Tiempo para STACKED	22
Figura 18- Evolución de la medida del SOC vs. tiempo en la microrred para 3 semanas	25
Figura 19-Evolución del SOC vs. tiempo en la microrred para 2 días	25
Figura 20- Evolución SOC vs. tiempo para días de mucha (a) y poca generación (b)	26
Figura 21- Diferencia porcentual diaria de eficiencia energética	26
Figura 22- Evolución de la eficiencia del inversor para 3 semanas.....	27
Figura 23-Lectura de generación FV en Labview	40
Figura 24- Programación de PS en Labview	41
Figura 25- Lectura de datos de frecuencia en Labview.....	41
Figura 26- RFP para SOC entre 10-50% en Labview	42
Figura 27- RFP dentro de deadband en Labview	42
Figura 28- RFP limitada para frecuencias extremas en Labview.....	43
Figura 29- Overfulfillment en Labview.....	43
Figura 30- Corrección de offset y eficiencias en Labview	44
Figura 31- Ensayo de caracterización.....	45
Figura 32- Circuito interno equivalente de la batería	45

Índice de tablas

Tabla 1- Resultados a nivel de celda: tipo de servicio y capacidad y resultado.....	17
Tabla 2-Número de ensayos realizados: servicio realizado y tamaño de batería.....	19
Tabla 3- Resultados a nivel de celda	23
Tabla 4- RFP 24kWh para módulo BP247.....	46
Tabla 5- RFP 24kWh para módulo BP106.....	46
Tabla 6- RFP 6kWh para módulo BP110.....	46
Tabla 7- RFP 6kWh para módulo BP108.....	47
Tabla 8- RFP 6kWh para módulo BP110 (repetición).....	47
Tabla 9- RFP 4kWh para módulo BP247	47
Tabla 10- RFP 4kWh para módulo BP56.....	47
Tabla 11- PS 24kWh para módulo BP241.....	47
Tabla 12- PS 24kWh para módulo BP56.....	47
Tabla 13- PS 24kWh para módulo BP106.....	47
Tabla 14- PS 6kWh para módulo BP106.....	48
Tabla 15- PS 6kWh para módulo BP241.....	48
Tabla 16- PS 4kWh para módulo BP56.....	48
Tabla 17- PS 4kWh para módulo BP247.....	48
Tabla 18- Stacked services 24kWh con módulo BP207.....	48
Tabla 19- Stacked services 24kWh para módulo BP108	48
Tabla 20- Stacked services 24kWh para módulo BP241	49
Tabla 21- Stacked services 6kWh para módulo BP110	49
Tabla 22- Stacked services 6kWh para módulo BP241	49
Tabla 23- Stacked services 4kWh para módulo BP207	49
Tabla 24- stacked services 4kWh para módulo BP73.....	49
Tabla 26- Medidas tomadas de forma anterior al ensayo	50
Tabla 25- Características de los ensayos de los cicladores	50
Tabla 27- Medidas tomadas de forma posterior al ensayo	50

Resumen y palabras clave

1.1 Resumen

La utilización de módulos de segunda vida pertenecientes a vehículos eléctricos cuando ya no pueden seguir dando este servicio, para participar en servicios de estabilización de la red eléctrica, es una posibilidad aún por explotar. Esta clase de servicios podría no solo mejorar el reciclaje de litio, sino ayudar a mejorar la integración masiva de los recursos renovables y producir un gran ahorro económico a los usuarios que participen en ello. Por eso, en este trabajo se han estudiado los diferentes servicios en los que podría participar y de entre ellos, se han escogido la Regulación Primaria y el *Peak Shaving* y se han implementado con módulos reales para estudiar su comportamiento.

Por un lado, se han utilizado cicladores para ensayar módulos de segunda vida de diferentes tamaños pertenecientes a un Nissan Leaf realizando ambos servicios por separado, así como ambos simultáneamente. Por otro lado, se ha probado la realización de ambos servicios simultáneos en una microrred con una batería completa de BeePlanet. Estos ensayos permitirán observar la degradación que sufren los módulos en ensayos de 3 semanas de duración, así como el uso real del batería necesario para poder participar en ellos. Los resultados obtenidos muestran que en ninguno de los casos la batería sufre degradaciones considerables, y que la participación en ambos servicios simultáneamente además será más beneficiosa para la batería que cada uno de ellos por separado.

1.2 Palabras clave

Almacenamiento, segunda vida, regulación de frecuencia, *peak shaving*, *stacked services*, microrred, degradación.

1.3 Acrónimos

RFP: Regulación primaria de frecuencia

PS: Peak Shaving

SOC: Estado de carga (State of Charge)

SOH: Estado de salud (State of Health)

DOD: Profundidad de descarga (Deep of Discharge)

EFC: Número de ciclos completos equivalente

VE: vehículo eléctrico

V2G: Vehicle-to-grid

FV: Fotovoltaica

EMS: Sistema de gestión energética (Energy Management System)

R_i: Resistencia interna

2. Introducción

La transición energética hacia las fuentes de generación renovable no gestionable es ya una realidad a nivel mundial. Los altos niveles de dependencia energética, así como Acuerdos políticos como la Cumbre de París o subastas de energía limpia fomentan aún más esta integración masiva de energía renovable. Las principales fuentes renovables no gestionables, como son la eólica y la fotovoltaica, se conectan a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos de potencia, disminuyendo así la constante de inercia del sistema eléctrico de potencia. Cuando generación y demanda no coinciden, esta desviación de potencia se traduce en desviaciones de frecuencia que son mayores cuando menor sea la inercia, generando inestabilidad en la red. La disminución de inercia, junto con la variabilidad inherente al recurso renovable que provoca que estas fuentes de generación no sean gestionables [1, 2, 3], comprometen la estabilidad del sistema eléctrico de potencia actual conforme se incrementa la penetración de energías renovables [4, 5, 6].

Una de las principales soluciones para favorecer la integración masiva de fuentes de generación renovable no gestionable es la inclusión de sistemas de almacenamiento. Estos sistemas permiten proporcionar servicios a la red eléctrica con el objetivo de mejorar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia e incrementar su resiliencia y flexibilidad [7, 8, 9].

Gracias a los sistemas de almacenamiento, las centrales renovables pueden participar en servicios de potencia como regulación de potencia – frecuencia , tanto primaria (RFP) como secundaria (RFS) [10, 11, 12, 13] , emulación de inercia [14, 15], control de tensión [16] o *capacity firming* [17], entre otros. Estos servicios requieren grandes potencias, pero bajas cantidades de energía [18, 19]. Sin embargo, los sistemas de almacenamiento también pueden proporcionar servicios energéticos. El servicio energético más común es el *arbitrage* o *time shift* [20], ya que permite controlar fácilmente las fluctuaciones de la generación renovable, aunque también se han realizado estudios acerca de *distribution & transmission deferral* [21] o *peak shaving* (PS) [22, 23]. Incluso es posible la combinación de un servicio de potencia con uno energético, como *demand response* y RFP [24] , *arbitrage* con RFP [25, 26] y PS con RFP [27].

Todos estos estudios analizan la posibilidad de la incorporación de esta clase de servicios a los sistemas de almacenamiento. Mientras que algunos de ellos valoran la posibilidad de integrarlos en sistemas de baterías genéricas [16, 28], otros de ellos se centran en el caso del vehículo eléctrico (VE) [29]. Esta última opción es especialmente interesante, ya que una de las claves de la descarbonización es la electrificación del transporte [30], y se prevén tasas de implantación incluso del 10% para 2030 [11]. El VE puede ser conectado a red de forma bidireccional, tomando energía de la red e inyectándola con el objetivo de proporcionar servicios a la red [31], algo que se conoce como *Vehicle-to-Grid* (V2G). Los VE requieren de baterías con elevada densidad energética, lo que provoca que cuando su SOH está en un 80% [24] ya no sean válidas para su aplicación original. Sin embargo, pueden ser empleadas en otras aplicaciones con una segunda vida aún muy larga, algo que se conoce como *second-life*. Entre las posibles aplicaciones de segunda vida, una de las principales es la de proporcionar los servicios a la red previamente mencionados. [24, 23, 27, 13]. La provisión de servicios a red suele ser además una función menos exigente que el propio transporte del vehículo ya que el módulo ya no está expuesto a vibraciones, ciclos tan profundos, tensiones o inclemencias meteorológicas [25] lo que cabe estimar que su segunda vida será incluso más larga que la primera. Algunos estudios

prueban además que esta segunda vida permitiría reducir el coste efectivo de los VE [32], impulsando su implantación.

Los estudios relacionados con las baterías de segunda vida empleadas para dar servicio a la red eléctrica se centran mayoritariamente en la viabilidad económica y en la optimización, dimensionado y gestión energética del mismo, aunque algunos también estudian el análisis de la degradación y vida útil de las baterías. En cuanto a la viabilidad económica, las baterías de segunda vida tienen un precio de entre 44 y 180 \$/kWh, por lo que pueden ser una forma de contribuir a los servicios de red obteniendo a su vez beneficios económicos [13]. De hecho, un estudio publicado en 2013 demuestra que la inclusión de baterías en sistemas FV es rentable si su precio es menor que un valor entre 400 y 500 \$/kWh en función de la aplicación [33], por lo que las baterías de segunda vida tienen potencial para generar beneficios rápidamente. Estos estudios de viabilidad económica demuestran que entre la provisión de un servicio energético y uno de potencia, estos últimos, y en concreto la RFP, proporcionan mayores ganancias, y normalmente aún mayores para *up-regulation*, es decir, regulación de frecuencias menores que 50Hz, aunque esto depende del *penalty factor* [34]. Por otro lado, en [26], se estudia la viabilidad económica de los servicios en función de la incertidumbre de los precios y de la degradación de la batería, demostrando que la degradación influye tanto en el coste total como en el uso que se quiere dar a la batería. Demuestra, por tanto, que tomar energía de forma bidireccional (V2G) sólo es beneficioso si los costes de la batería no son muy elevados.

Además de analizar la viabilidad económica, se han creado algoritmos de optimización para estos sistemas [11, 12], y en otras ocasiones incluso se han llevado a la práctica para comprobar si realmente son factibles [24, 13, 25, 23] todos ellos con resultados positivos. Algunos estudios se han centrado en observar la evolución del rendimiento y la degradación de la batería para poder extraer conclusiones de su viabilidad [25, 20].

Sin embargo, actualmente no se encuentran muchos estudios que analicen la degradación sufrida por la superposición de varios servicios apilados tanto energéticos como de potencia (*stacked services*) que se complementen entre ellos, algo que ayudaría no solo al sistema eléctrico sino también a aumentar la rentabilidad de la batería [35].

Por esta razón, en el presente trabajo se han estudiado aquellos que mejor pueden contribuir a la integración de microrredes, RFP (servicio de potencia) y PS (servicio energético) para analizar su viabilidad. Mientras que el PS ayudaría a estabilizar la generación renovable de la microrred produciendo un enorme ahorro económico [36], por su parte la RFP ayudaría a controlar y estabilizar el sistema.

Este análisis se hará además mediante módulos de segunda vida. Dar visibilidad al uso de estos módulos de segunda vida en la participación de servicios a red es algo primordial, ya que muchas veces estas celdas son retiradas debido a bajas eficiencias, golpes o corrosión, lo que no quiere decir que no tengan potencial para participar en otras funciones [13]. Esta clase de servicios pueden alargar la vida de estas baterías, lo que beneficia por otro lado al reciclaje del litio (la tasa actual de reciclaje de baterías de litio es del 3%, donde lo que usualmente interesa es el reciclaje de algunos metales, pero no el del litio [37]).

En primer lugar, partiendo de un perfil de potencias diseñado con Matlab, se probarán estos ensayos en módulos de segunda vida pertenecientes a un Nissan Leaf y de diferentes capacidades mediante cicladores, para observar tanto los efectos de la degradación como caracterizar los ciclos que necesitaría realizar. Por otra parte, también se realizarán los ensayos en una microrred real con una batería de segunda vida real perteneciente a BeePlanet (solución rebaterizada de VE), lo que permitirá extraer conclusiones más efectivas sobre el comportamiento de las baterías al proveer dichos servicios y observar su comportamiento en lazo cerrado.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma: En la sección 3 se presentarán los servicios a red que se han escogido para la simulación y sus beneficios. Dentro de ésta se verá el caso de estudio, que concreta el escenario de simulación y la programación de los distintos servicios. Además, el *experimental setup*, presenta en la sección 4 las celdas utilizadas y sus características, así como los diferentes ensayos que se van a realizar tanto para los módulos ciclados como la batería completa de la microrred. La Sección 5 recoge los principales resultados de degradación, eficiencia y SOC obtenidos en cada uno de los ensayos, así como en la microrred real. Por último, la Sección 6 plantea las conclusiones acerca de la rentabilidad de integrar los servicios en las baterías de segunda vida y las líneas futuras. Al final del trabajo se adjuntan diferentes Anexos que incluyen breves explicaciones de la programación utilizada tanto en Matlab (módulos y cicladores) como en Labview (microrred), así como el despliegue de resultados para cada ensayo individualizado de los módulos en cicladores y la organización utilizada en los diferentes archivos.

3. Servicios a red

Los servicios que ayudan a proporcionar estabilidad a la red se clasifican tradicionalmente según: servicios de potencia (grandes potencias de poca duración, desde segundos hasta 15-30 minutos) y servicios energéticos (la potencia, aunque menor, se mantiene un tiempo prolongado, puede durar entre 4 y 8 horas) [18]. Los servicios de potencia participan en el control y estabilización de la red, mientras que los energéticos gestionan las fluctuaciones de generación y consumo a lo largo del día [18]. De esta forma, se compenetran bien entre ellos, ya que el servicio energético dura varias horas, pero deja un porcentaje de capacidad libre para uno de potencia; permitiendo así la participación de los módulos en varios servicios simultáneamente [38]. Apilar varios servicios simultáneamente producirá mayores beneficios tanto a red como económicos a los usuarios que lo presten [39], lo que fomentará aún más la participación en éstos. La batería de litio es de hecho el dispositivo más apropiado para esta clase de combinaciones debido a su poca autodescarga, larga vida útil, densidad energética, respuestas rápidas y costes cada vez más competitivos [12].

Con el objetivo de cuantificar empíricamente la eficiencia energética que alcanza una batería de segunda vida en la provisión de los servicios de red y la influencia en la vida útil de combinar estos servicios, se van a evaluar de forma simultánea un servicio de potencia (regulación potencia-frecuencia), y otro de energía (*peak-shaving*).

La RFP es, en la mayor parte de los mercados eléctricos, un servicio obligatorio y no retribuido que consiste en un aporte de potencia en función de las desviaciones de frecuencia

producidas por los desajustes entre generación y consumo eléctrico. En ausencia de desequilibrios, los valores de la frecuencia de la red se mantienen dentro de una *deadband*. Cuando la frecuencia del sistema está dentro de esta banda no se exige realizar regulación. Cuando la frecuencia se desvía y sale de esta banda, la RFP se realiza mediante una acción proporcional o *droop control* [40] que sigue la expresión (1):

$$R\Delta P_{pu} = \Delta f_{pu} \quad (1)$$

donde R es el *droop constant* o estatismo, que debe mantenerse en valores de entre 2% y 12% de la potencia nominal [41]. Dentro de esta horquilla de estatismos, el valor más restrictivo es el correspondiente al 2%, ya que para un mismo incremento de frecuencia en por unidad, Δf_{pu} , el incremento de potencia en por unidad, ΔP_{pu} , es mayor. Por este motivo en este trabajo se supondrá un estatismo de 0.02, es decir, el más exigente dentro de la normativa. Ya que este servicio se va a proporcionar mediante baterías, se considerará un SOC de referencia o ideal, de forma que la batería siempre trate de volver a ese nivel de SOC, seleccionando este valor con el fin de reducir la degradación debida a estados de carga extremos.

El control del SOC se lleva a cabo utilizando la *deadband* previamente mencionada, dentro de la cual, a pesar de no ser necesario, se realizará regulación siempre que esto ayude a reestablecer el SOC de referencia, tal y como permite la normativa. La *deadband* seleccionada es de 49.98-50.02 Hz, tomado acorde a la normativa [41] , que permite frecuencias entre 49-51 Hz un tiempo ilimitado y de forma coherente a otros algoritmos ya implementados [12].

Además, se ha implementado el *overfulfillment* [42], una técnica que permite devolver la batería a estados de carga aceptables cuando éstos se encuentran fuera de los límites válidos o recomendados para minimizar la degradación. Funciona de forma que, para estos estados de carga, se permiten variaciones de potencia respecto de la correspondiente siempre que éstas ayuden a volver al SOC de referencia [43]. En la Figura 1 se recoge de forma gráfica y en por unidad los parámetros empleados en la estrategia.

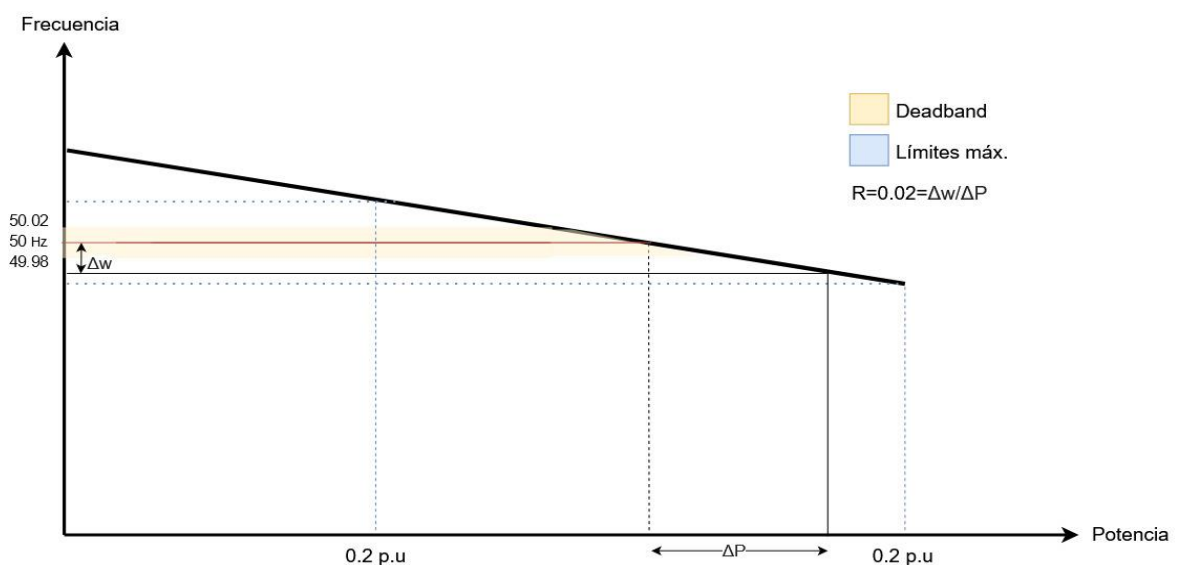


Figura 1- Gráfico de funcionamiento de RFP

En cuanto al servicio de energía, el PS se encarga de atenuar las fluctuaciones renovables que generan precisamente los mencionados desequilibrios entre generación y demanda, de forma que cuando la generación sea superior a un máximo $P_{m\acute{a}x}$, el excedente se almacenará en la batería para descargarse en los momentos en que la generación sea menor la potencia mínima $P_{m\acute{i}n}$ [44]. De esta forma, se consigue estabilizar la inyección de generación renovable no gestionable entre el máximo y el mínimo [45] y así gestionar la variabilidad inherente de recurso. En las horas de mayor consumo y menor generación el precio de la electricidad se dispara, mientras que en momentos de bajo consumo y alta generación el precio es muy bajo. Incluir este servicio permitirá almacenar energía en los momentos en que esta sea más barata para consumirla en las horas económicas punta, conllevando así un gran ahorro para instalaciones de autoconsumo y una mejor gestión del precio mayorista en el pool eléctrico. [46, 47, 36].

Este servicio no solo estabiliza la generación obteniendo beneficios económicos para el usuario, sino que, además, como se resalta en [48], impulsa la integración renovable, aumenta la fiabilidad de la red y retrasa la necesidad de reemplazar los sistemas de transmisión y distribución.

3.1- Caso de estudio y sistema de gestión energética (EMS)

Para analizar la degradación de las baterías de segunda vida cuando se emplean para proporcionar los servicios de potencia y energía anteriormente mencionados, se va a analizar como *case study* una instalación fotovoltaica (FV) de autoconsumo con almacenamiento conectada a red. Esta instalación cuenta con una potencia FV instalada de 12 kWp que alimenta el consumo energético de una vivienda unifamiliar. En este trabajo se estudian tres opciones de almacenamiento para la instalación, las tres basadas en baterías de segunda desechadas de vehículos Nissan Leaf, con diferentes potencias y capacidades. Las capacidades estudiadas van desde los 4 kWh hasta los 24 kWh, lo que permitirá mostrar las diferencias de comportamiento entre baterías de distintos tamaños.

Por un lado, las baterías del tamaño total del VE (24 kWh) demostrará que los usuarios con VE puedan acceder a estos servicios. Por otro lado, se probarán módulos de menor capacidad (6 kWh y 4 kWh) específicamente contruidos para aplicaciones residenciales mediante la rebaterización de celdas, cuyos precios más asequibles para el consumidor hacen que la oportunidad de participar en servicios sea posible para cualquier usuario que se preste. Para esta instalación se va a diseñar una *energy management strategy* (EMS) que permita proporcionar los servicios RFP y PS a la red. La potencia de conexión a red es de 6 kW tanto para absorber como para inyectar. Esta potencia sería también la nominal del inversor conectado al autoconsumo.

Para poder diseñar la estrategia de gestión, el primer paso consiste en caracterizar la generación FV. Para ello, se ha partido de datos reales de dicha instalación de autoconsumo para 9 semanas, que se muestran en la Figura 2. En esta gráfica se pueden observar fluctuaciones tanto horarias como diarias, viendo por tanto grandes rampas y días sin apenas generación.

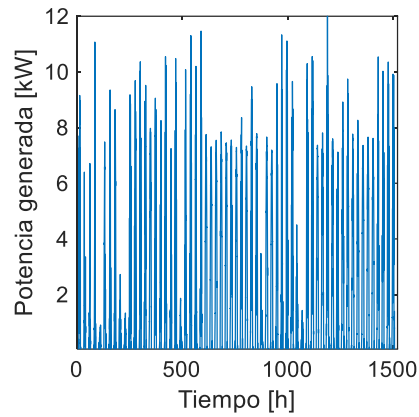


Figura 2- Generación FV 9 semanas

En segundo lugar, para poder programar la estrategia de regulación potencia frecuencia, se han obtenido datos de la frecuencia de red segundo a segundo durante el año 2016, que se utilizarán para la RFP. Estos datos están representados en la Figura 3.

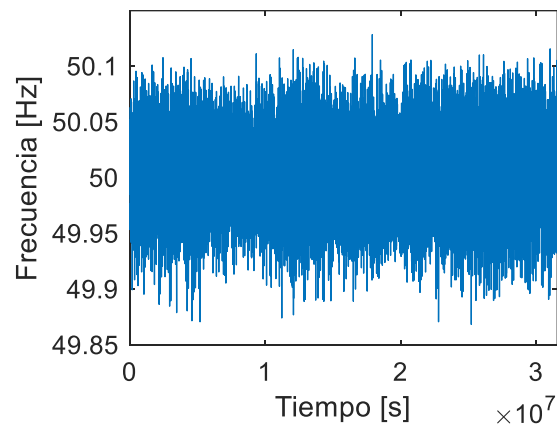


Figura 3- Frecuencia de red para el año 2016

Una vez que se tienen los datos correspondientes a la generación FV y los de la frecuencia, se puede diseñar el EMS. Considerando el sistema como una pequeña microrred, existirá un sistema de control y gestión energética, que genere las consignas de potencia para las diferentes funciones de la batería. Por otro lado, el *Battery Management System* (BMS) se encargará de garantizar una operación eficiente y segura, calculando a su vez el SOC de la batería para vigilar las sobrecargas o sobredescargas [49]. El esquema global de funcionamiento del sistema se ve reflejado en la Figura 4.

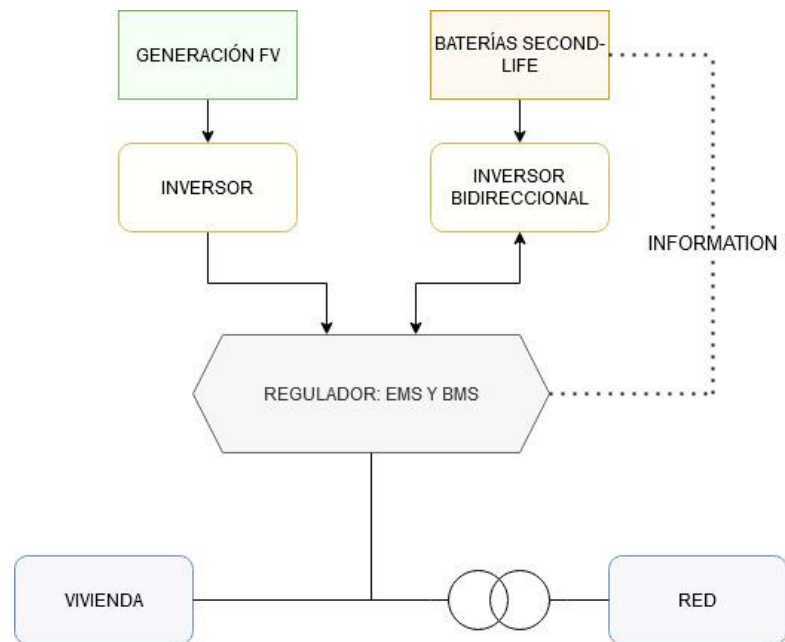


Figura 4- Representación esquemática del caso de estudio

En cuanto a la aplicación concreta de los servicios, por un lado, la batería realiza RFP de forma normal siempre que el SOC se encuentre entre el 25 y el 75%, rango apto para optimizar el SOH de la batería y que esta sufra menos esfuerzos. Además, se considera un rango de frecuencias a regular fuera de la *deadband* de entre 49.8 y 49.98 Hz *down-regulation* y entre 50.02 y 50.2 Hz *up-regulation* tomado conforme a otros estudios [12]. Se realizará RFP dentro de la *deadband* previamente mencionada siempre que ésta ayude a volver al SOC de referencia, que en este caso será del 50%, acorde de nuevo a trabajos ya realizados [50].

La regulación para frecuencias extremas (mayores que 50.2 Hz o menores que 49.8 Hz) está limitada a 0.2 p.u como se puede ver en la Figura 1, potencia máxima que inyectará o absorberá la batería. El *overfulfillment* ayudará a reestablecer el SOC cuando esté se encuentre entre el 10 y el 25% o entre 75 y 90% (estados de carga extremos), aportando potencias del 70 o 130% respecto de la correspondiente respectivamente, con objeto de tratar de devolverla a SOC válidos para la regulación. De este modo, la batería nunca llegará a SOC considerados perjudiciales [51](SOC<10%, SOC>90%).

Para el PS se ha considerado una potencia máxima, P_{max} , igual al 50% la potencia pico de generación PV, en este caso, 6 kW. Cuando la potencia generada supere este valor, la batería se cargará con el excedente [52, 47]. Este valor permitirá observar ciclos profundos de carga y descarga de la batería y poder así caracterizar su degradación. El porcentaje considerado para la P_{max} es coherente con otros estudios previos, en los que se considera un 60% [33]. La batería se descarga cuando la generación está por debajo del 16.6%, o lo que es lo mismo, cuando la generación sea inferior a 2 kW. En este caso, se realizará PS siempre que el SOC se encuentre entre 10-85%, y fuera de este rango se inyectará toda la generación renovable a la red. Se han utilizado de nuevo valores coherentes, aunque más conservativos que en otros estudios, como

[53], donde se ha tomado 2-85%. El funcionamiento de estos servicios se puede ver resumido en la Figura 5.

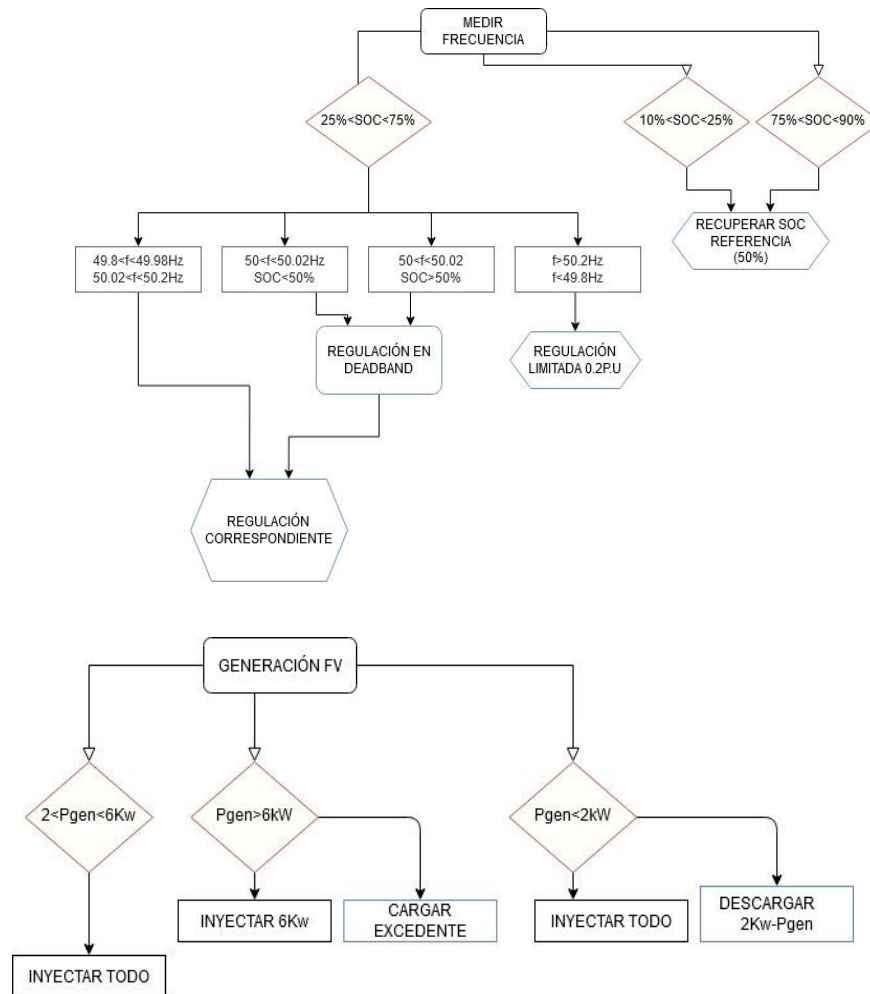


Figura 5- Programación de RFP y PS

Estos servicios se pueden proporcionar de forma independiente a la red o combinando ambos en la misma batería. Para poder analizar cómo afecta a la de la batería la provisión de servicios de potencia y energía de forma simultánea, se modifica el estado de carga de referencia de la RFP al 20% de forma que la superposición de ambas curvas de un resultado más homogéneo, ya que el PS buscará realizar descargas nocturnas muy profundas, en los momentos de menor generación, llegando incluso al 10% de SOC, por lo que el RFP con estado de referencia 50% impediría su correcta realización.

La parte experimental del proyecto pasa por verificar la posibilidad de integrar estos servicios en baterías reales. Para ello se han utilizado en una primera etapa celdas de segunda vida provenientes de un Nissan Leaf, que se ensayarán en cicladores. La aplicación de las estrategias de control al *case study* descrito, para tres tamaños de batería de 24 kWh, 6 kWh y 4 kWh y 3 escenarios de servicio diferentes, se ha programado en Matlab cuyo desarrollo se puede ver en el Anexo 1- programación en Matlab.

Ésta resulta en los perfiles recogidos en las siguientes figuras: Si solo se proporciona el servicio de RFP Figura 6, si solo se proporciona el PS Figura 7 o si se combinan ambos servicios Figura 8. Dichos perfiles sintéticos serán los empleados para ensayar las celdas y baterías reales de segunda vida en los cicladores, y servirán para caracterizar la degradación de las mismas.

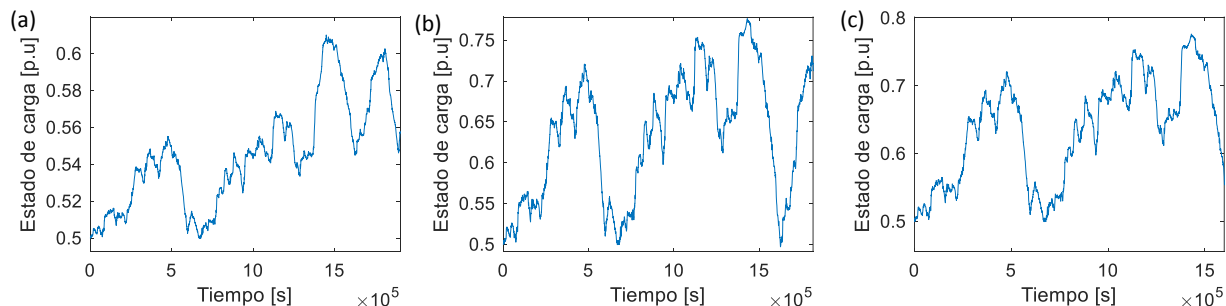


Figura 6- Estado de carga vs. tiempo para RFP con baterías de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

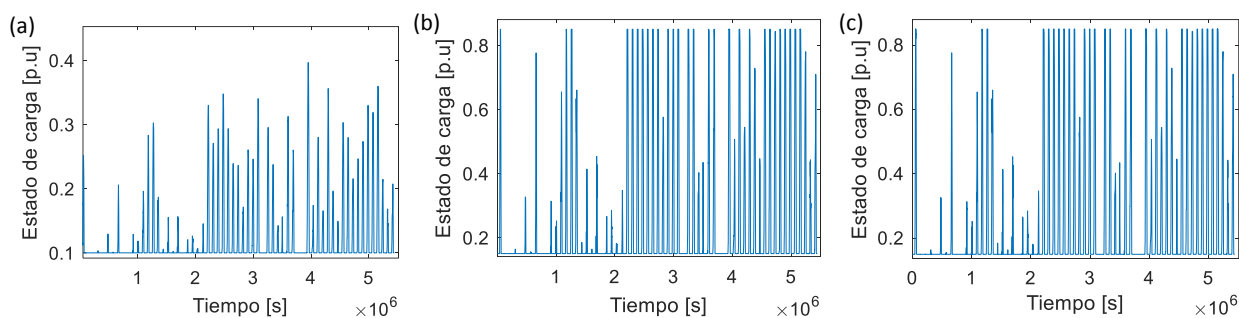


Figura 7- Estado de carga vs. tiempo para PS con baterías de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

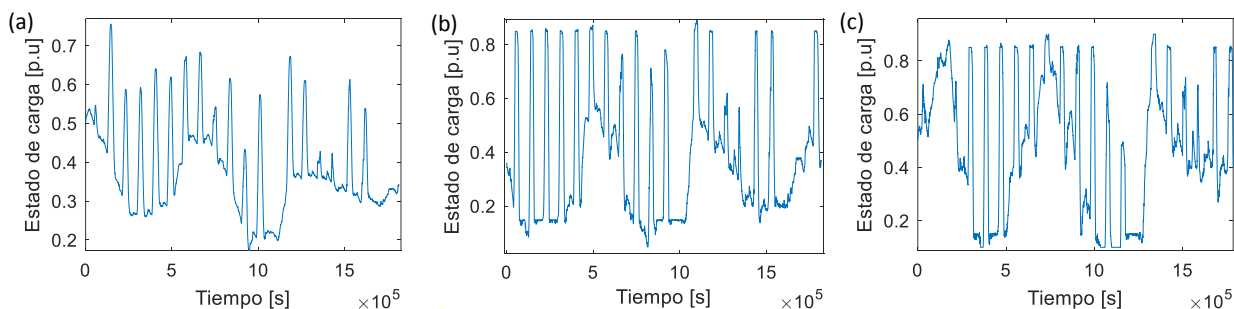


Figura 8- Estado de carga vs. tiempo para STACKED con baterías de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

Para todos ellos se ha utilizado un horizonte temporal representativo de 3 semanas. Sin embargo, el PS es un servicio energético que solo se presta un número determinado de horas al día como se puede ver en la Figura 7, lo que en primera instancia no permitiría observar efectos de degradación. Por esta razón se ha utilizado un horizonte temporal de 9 semanas considerado como superposición de 3 ensayos de 3 semanas de duración.

Además, se presentan también los histogramas energéticos de DOD, obtenidos en cada ensayo y representados en valores porcentuales respecto de su capacidad inicial. En ellos se

puede observar el rango de descarga más representativo de cada tipo de ensayo, así como sus descargas máximas y la frecuencia con la que ocurren (Figura 9 Figura 10 Figura 11) es decir, su uso general.

Lo que estos histogramas vienen a representar es el número de repeticiones de cada tipo de ciclo clasificados según su profundidad de descarga medida respecto de la capacidad total de la batería. La programación realizada para obtenerlos se puede ver en el Anexo 3.1 Obtención de resultados. Ya en primera instancia se pueden observar las diferencias entre ellos. Como cabía esperar, la provisión de servicios para la batería de tamaño VE es menos exigente que para las soluciones rebaterizadas, ya que para la misma premisa de servicio estas últimas requieren DOD más profundas debido a su menor capacidad.

Los ciclos de descarga menos profundos se producen siempre en la RFP, que en ningún momento llega a producir ciclos del 50% de su capacidad, mientras que los más profundos se dan en el PS, que llegan a descargas incluso del 100% de su capacidad en el caso de la batería de 6 kWh. Como ya se había visto en las anteriores figuras, esto es debido a que la RFP es un servicio que exige cada segundo pequeñas cantidades de potencia, que a corto plazo no producen grandes cambios en el SOC mientras que el PS es un servicio energético que a lo largo del día requiere cantidades de energía que producen ciclos mucho más profundos. La superposición de servicios requiere DOD intermedias, entre el 25 y el 50% como máximo según la capacidad, o visto de otro modo, ciclos óptimos ya que no llevan a la batería a SOC extremos que podrían dañarla.

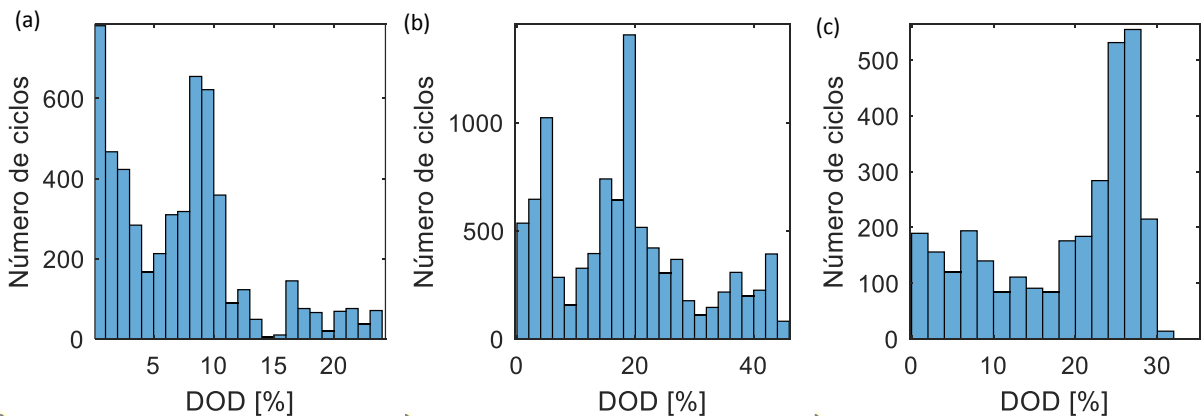


Figura 9-Histogramas representativos para RFP con tamaños de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

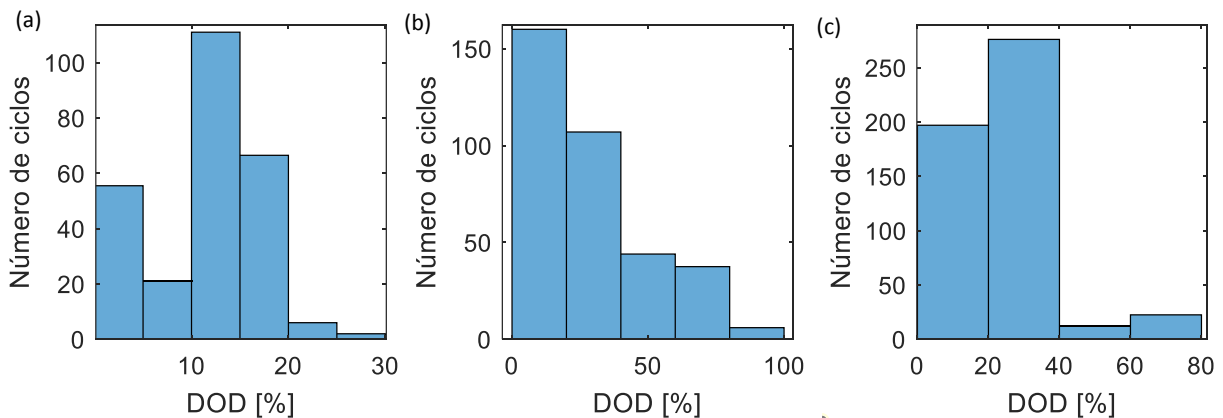


Figura 10-Histogramas representativos para PS con tamaños de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

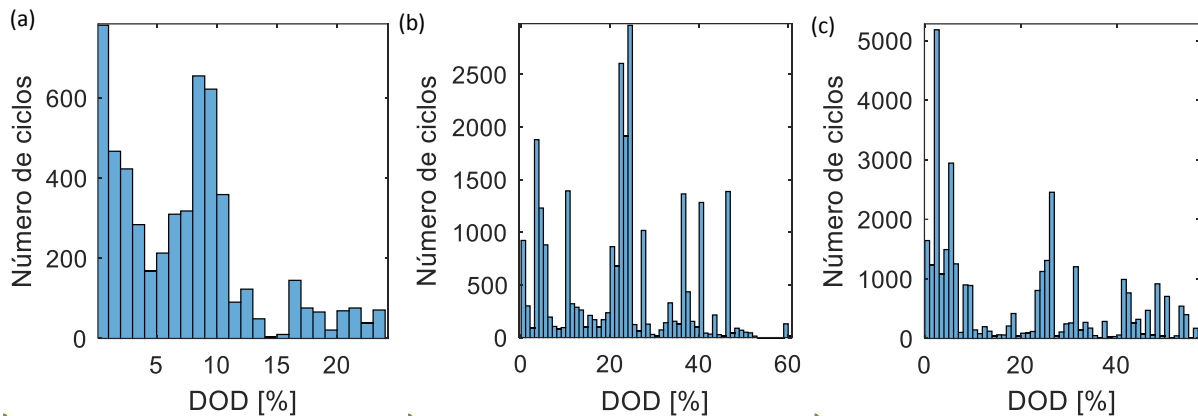


Figura 11-Histogramas representativos para STACKED con tamaños de 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

Por último, se adjuntan en la Tabla 1 los resultados obtenidos en cuanto a número de ciclos equivalente (EFC) para cada ensayo, así como la DOD media para cada uno de ellos, o más representativa, lo que permitirá estimar las exigencias de cada uno de ellos y por tanto en cuál es más probable que se sufran efectos de degradación. El número de ciclos equivalente representa el número de ciclos de carga y descarga completos que se correspondería con este ensayo, y su cálculo viene explicado en el anexo 3.1 Obtención de resultados.

Tabla 1- Resultados a nivel de celda: tipo de servicio y capacidad (filas) y resultado (columnas)

Serv.	Capacidad (kWh)	Ciclabilidad (EFC/año)	DOD media (%)
RPF	24	8.5	1.2
	6	49.7	18.8
	4	58.7	26
PS	24	61.2	12
	6	225.8	26.8
	4	318.2	30
Stacked	24	48.5	10
	6	95.1	22
	4	148.4	26

Este estudio relativo a la caracterización del servicio permite observar que la regulación primaria es el servicio con menor número de ciclos equivalente, así como DOD medias menos profundas, lo que por un lado beneficiaría a la batería, pero por otro no se estaría explotando toda su capacidad. El PS se sitúa en el otro extremo, siendo esto más evidente para los tamaños de batería más pequeños. No solo exige mayor número de ciclos anuales, sino que su media de DOD es la más alta llegando a ciclos incluso del 100% de su capacidad.

Se constata, por tanto, que los *stacked services* serán más beneficiosos para la batería que la realización de cada uno de ellos por separado. La razón es que éstos permiten explotar mejor la capacidad de la batería que la RFP sin exigir tantos esfuerzos como el PS, llegando así a un

punto medio del que además se obtienen el doble de beneficios económicos y a red. De hecho, como se puede ver los *stacked services* no llegan a consumir en ninguno de los tamaños más del 60% de la capacidad de la batería, lo que permite entrever que incluso sería posible la inclusión de un tercer servicio a red para situaciones puntuales o con menor consumo energético, como podrían ser *transmission and distribution deferral*, solo utilizado unas pocas horas al año, regulación secundaria de potencia, o bien dejar una parte de la capacidad para uso del consumidor.

4. Experimental setup

Los ensayos presentados en este trabajo tienen dos objetivos fundamentales. Por una parte, cuantificar empíricamente la eficiencia energética que alcanza una batería de segunda vida en la provisión de los servicios de red estudiados, así como su degradación. Por otra parte, se realizan ensayos en una microrred real para demostrar la viabilidad de estas baterías de segunda vida al proveer los servicios con el EMS diseñado. Todos los ensayos mostrados en este trabajo se realizan sobre baterías reales extraídas de vehículos eléctricos Nissan Leaf que han llegado al final de su vida útil, y tienen una duración de 3 semanas como se ha explicado en el caso de estudio, lo que facilita la comparación de resultados. Para cumplir estos dos objetivos se realizan los dos tipos de ensayos descritos a continuación.

4.1. Ensayos a nivel de celda en cicladores

Los perfiles diseñados en Matlab y mencionados en el caso de estudio son lanzados en cicladores para observar la degradación sufrida. Los ensayos se han realizado con módulos desechados de vehículos Nissan Leaf. Cada módulo (Figura 12 a) consiste en cuatro celdas de óxido de manganeso y electrodo de grafito conectadas en serie-paralelo (2s 2p) [54]. Los ensayos se realizan en una de las parejas de celda (terminales R y W de la Figura 12 b). Mediante el equipo CT-4016-5V50A-NTA-P (Figura 12 c), con canales de 5 V y 50 A, que ofrece una precisión de 0.1% en las medidas, se ha sometido a cada pareja de celdas (llamadas celda a partir de ahora) al perfil de trabajo correspondiente a cada servicio de red y cada tamaño de batería. Las celdas se han mantenido a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante todo el experimento mediante cámaras climáticas (Figura 12 d).

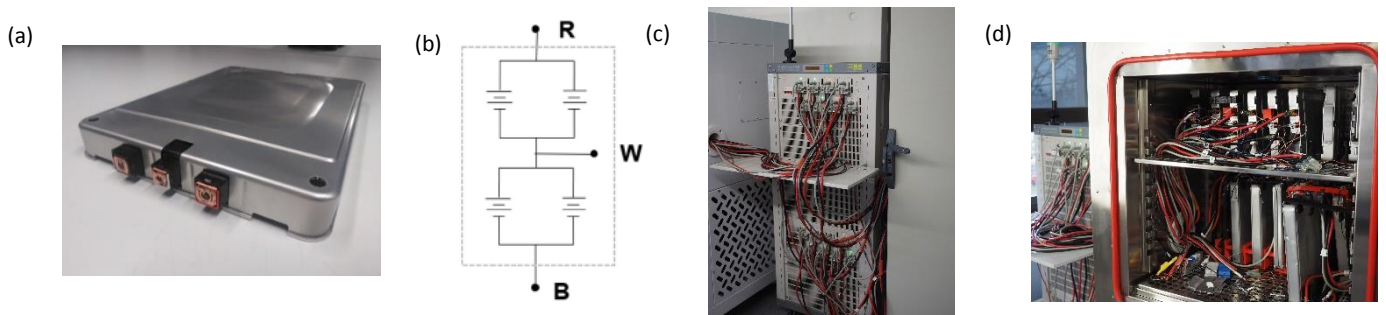


Figura 12-Experimental setup de módulos individuales: uno de los 48 módulos del Nissan Leaf (a), representación esquemática de la conexión interior (b), ciclador CT-4016-5V50A-NTA-P (c) y conexionado de los módulos al ciclador dentro de cámara climática (d)

Antes y después de cada ensayo se ha realizado sobre cada celda un ensayo de caracterización exhaustiva, con el fin de cuantificar los efectos que estos servicios tienen sobre la degradación de estas celdas y estimar su factibilidad y tiempo de vida. El ensayo consiste en 3 ciclos de carga y descarga profundos para medir la capacidad de la batería, seguido de un pulse charge current (PCC) test para medir la resistencia interna de la batería a diferentes valores de SOC ($R_i(SOC)$). Esta caracterización se explica con más detalle en el Anexo 3- Desglose de resultados.

Tabla 2-Número de ensayos realizados: servicio realizado (filas) y tamaño de batería (columnas)

	24 kWh	6 kWh	4 kWh
PFR	2 celdas	3 celdas	2 celdas
PS	9 celdas	6 celdas	6 celdas
Stacked	3 celdas	2 celdas	2 celdas

Con este tipo de experimentos a nivel de celda es posible cubrir una matriz de ensayo suficiente para sacar conclusiones significativas. Esta matriz de ensayos es la mostrada en la Tabla 2, en la que se analizan los servicios de regulación de frecuencia (RFP), *peak shaving* (PS) y la combinación de ambos servicios (*stacked*) como se ha detallado en las secciones anteriores. De esta forma se estudia el funcionamiento de estas celdas si se usan para proveer cada uno de los servicios mediante tres baterías de segunda vida con las capacidades nominales estudiadas (24, 6 and 4 kWh).

Aunque se ha intentado realizar un número de ensayos representativos similar para todos los servicios y tamaños, el distinto comportamiento de cada batería debido a las diferencias de eficiencia y capacidad provocaba pequeñas diferencias de resultados para un mismo ensayo en dos módulos diferentes. Por esta razón se han realizado más repeticiones en aquellos ensayos cuyos resultados distaban levemente entre sí. Además, en los ensayos relativos al PS, los módulos solo aportaban energía al servicio unas pocas horas al día debido a la variabilidad de generación renovable, por lo que se han realizado más repeticiones de cada ensayo con objeto de apreciar mejor su degradación.

4.2. Ensayos con batería completa en microrred

Estos ensayos se realizarán en una microrred experimental instalada en la Universidad Pública de Navarra, que cuenta con un sistema de generación fotovoltaica de 3.6 kWp con conexión a red, y alimenta a una vivienda unifamiliar de 4 miembros. A continuación, en la Figura 13 se muestra el esquema a tiempo real utilizado para controlar la microrred, donde se pueden diferenciar claramente todos sus componentes. Como sistema de almacenamiento energético, en esta contribución se estudia una solución rebaterizada de batería de VE de BeePlanet con módulos de 6 kWh (Figura 14). Se cuenta también con 2 inversores con una corriente máxima de 50A.

La programación utilizada para la microrred sigue una estructura similar a la de los módulos y cicladores, pero se ha programado en Labview. Se puede ver un desglose en el Anexo 2-programación en Labview.

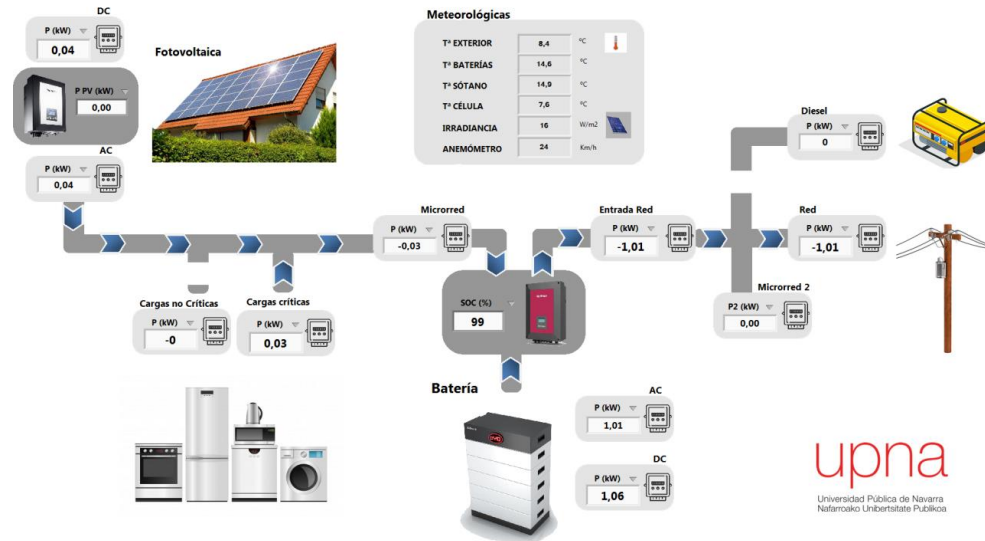


Figura 13- Esquema de funcionamiento de la microrred

Dado que el número de experimentos que se puede realizar a nivel de batería es menor que el que permiten realizar las celdas individuales, en este apartado se experimentará únicamente con los *stacked grid services* (última fila de la Tabla 2), que ofrecen un análisis más completo que el estudio de servicios individuales y como se ha visto en el caso de estudio, aportan más beneficios tanto económicos como a la batería.



Figura 14- Principales componentes de la microrred: Batería de BeePlanet, inversores y sistema de control

Al igual que los ensayos a nivel de celda, estos ensayos tendrán una duración total de 3 semanas, lo que permite tanto comprobar el funcionamiento del EMS diseñado en una instalación real, demostrando así su factibilidad, como comprobar su comportamiento ante estos servicios y la aparición de degradación. Estas comprobaciones se realizarán mediante la medida de la eficiencia energética de la batería (η_{DC}), la eficiencia de carga-descarga incluyendo las pérdidas en el inversor (η_{AC}).

5. Resultados experimentales

5.1- Resultados a nivel de celda en cicladores

En esta sección se analizan los resultados de la matriz de ensayos mostrada en la Tabla 2. En todos los casos se proporciona el valor medio de las réplicas utilizadas en cada ensayo. Las repeticiones se han utilizado para detectar ensayos atípicos para poder eliminarlos de la matriz de ensayos. El desglose de los resultados individuales para cada ensayo se puede ver en Anexo 3- Desglose de resultados.

Los resultados obtenidos para estos ensayos se clasifican a grandes rasgos en 3 grupos:

- Se verificará el seguimiento del SOC estimado en los perfiles teóricos simulados en Matlab a través de la tensión, proporcional al estado de carga.
- Se calcularán eficiencia energética y culómbica en los ensayos de caracterización anteriores y posteriores al servicio para obtener las diferencias porcentuales y así estimar tanto sus pérdidas como su posible degradación.
- Se obtendrá igualmente la capacidad de la batería de forma anterior y posterior al servicio, así como su resistencia interna, ambos para tratar de cuantificar la degradación sufrida por la batería.

5.1.1- Perfiles de tensión

En un primer lugar se puede observar la evolución de la tensión a lo largo de los ensayos en las siguientes figuras: Figura 15 Figura 16 Figura 17. Dicha tensión es proporcional al SOC de los módulos, lo que permite comprobar que los resultados son los esperados de forma teórica.

En este aspecto cabe resaltar la dificultad encontrada en el ajuste de la eficiencia de los módulos, clave para poder seguir correctamente las consignas de potencia. Así como para la RFP se consiguió el correcto seguimiento de los perfiles teóricos sin dificultad debido a sus DOD poco profundas, para los otros dos servicios sí que aparecieron más conflictos al ser necesario un ajuste del rendimiento más preciso. Finalmente, todos los ensayos han seguido correctamente las consignas teóricas, a pesar de que en el caso del PS el ajuste no fue no fue totalmente preciso, y como se puede ver la batería se va cargando con el tiempo.

Para todos los ensayos se supuso inicialmente una eficiencia del 95% que posteriormente se fue ajustando y que se tuvo en cuenta de la siguiente manera:

$$P_{carga} = P/\eta \quad (2)$$

$$P_{descarga} = P \cdot \eta \quad (3)$$

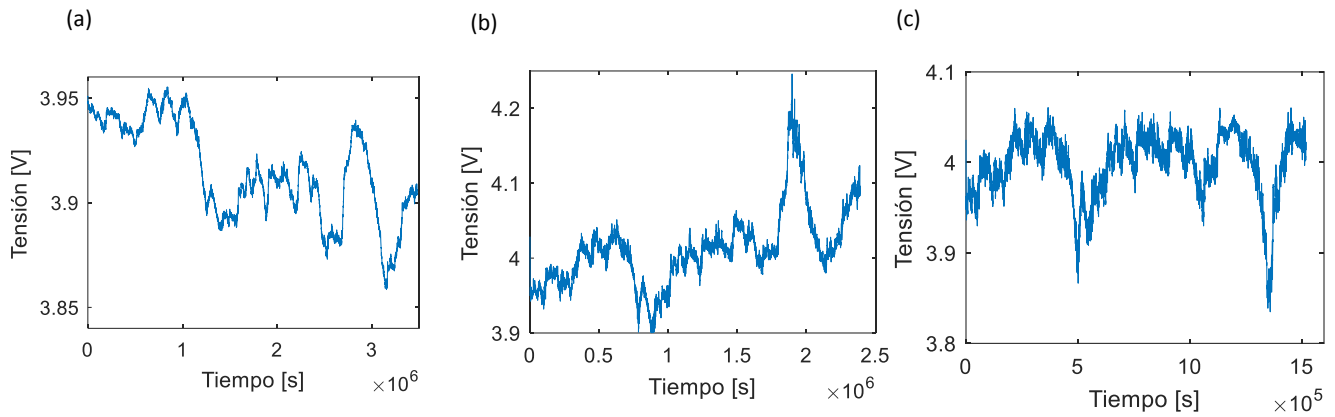


Figura 15- Tensión vs. Tiempo para RFP con 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

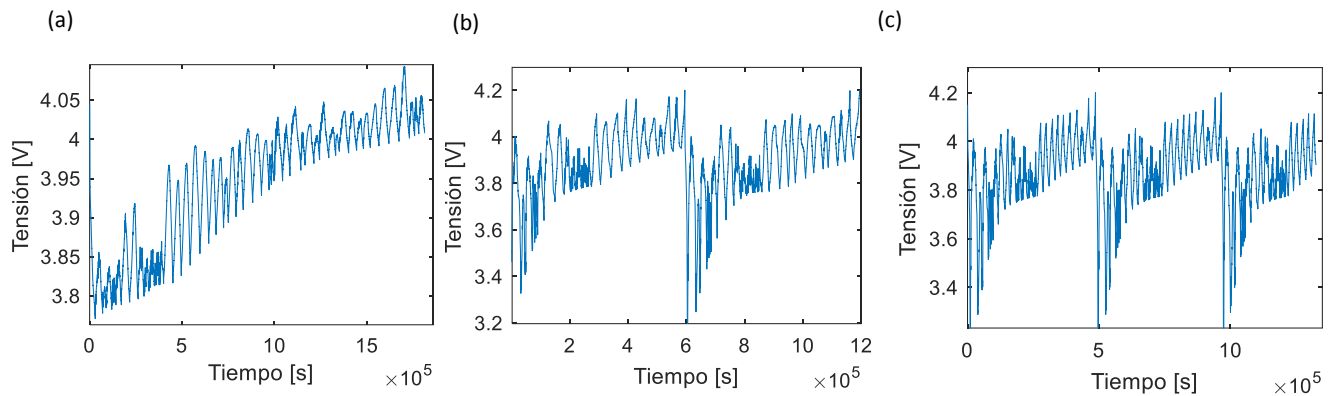


Figura 16- Tensión vs. Tiempo para PS con 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

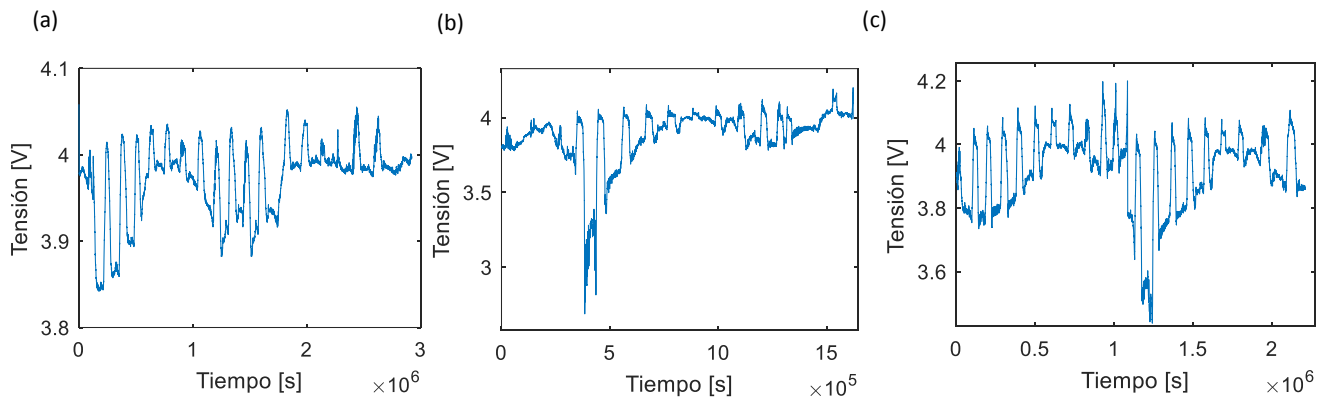


Figura 17- Tensión vs. Tiempo para STACKED con 24 kWh (a), 6 kWh (b) y 4 kWh (c)

Todos los ensayos tienen una duración de 3 semanas. Para agilizarlos, únicamente se han ensayado aquellos momentos en que la batería prestaba servicio, es decir, con consigna de potencia no nula, por lo que las duraciones temporales no coinciden ni entre ellos, ni con el horizonte temporal teórico.

La evolución del SOC permite entrever que la superposición de la contribución de la RFP, con un crecimiento/decrecimiento más progresivo, con la contribución del PS, en este caso provoca ciclos menos profundos que cuando la batería participa únicamente en este último servicio.

5.1.2- Resultados de eficiencia y degradación

Los resultados obtenidos se han agrupado en la Tabla 3, aportando aquí la media aritmética de cada tipo de ensayo. Igualmente, se agruparán también según el tipo de servicio para poder extraer conclusiones. Todos los resultados están expresados de forma diferencial entre el final y el inicio del servicio, representados de forma porcentual respecto al valor final. El procedimiento de cálculo de todas estas variables, así como el desarrollo de resultados para cada ensayo en concreto se encuentra en Anexo 3- Desglose de resultados.

Como se ha dicho, disminuciones de eficiencia energética permitirán atisbar posibles pérdidas tanto económicas como energéticas, mientras que disminuciones de la eficiencia culómbica implicarán posible aparición de degradación. Por otro lado, tanto la disminución porcentual de la capacidad de la batería como el aumento de su resistencia interna (R_i) conllevarán la existencia de degradación, siendo esta resistencia su parámetro más representativo. Asimismo, se han tenido en cuenta ciertas tolerancias o errores debido tanto a las medidas proporcionadas por el sistema como a los cálculos realizados. Para las eficiencias tanto energética como culómbica, se ha tenido en cuenta una posible horquilla de errores del 0.3%, es decir, desviaciones en el cálculo del rendimiento de en torno a 0.0029 p.u, poco representativas. En cuanto a la R_i , se han tomado tolerancias de hasta un 4% (aproximadamente $\pm 0.2 \text{ m}\Omega$) y de hasta 2% de capacidad ($\pm 0.8 \text{ Ah}$).

Tabla 3- Resultados a nivel de celda: Tipo de servicio y capacidad (filas) y principales resultados porcentuales (columnas)

Serv.	Capacidad (kWh)	$\Delta\text{EFICI. Wh}$ (%)	$\Delta\text{EFICI. Ah}$ (%)	ΔR_i (%)	$\Delta\text{CAPAC.}$ (%)
RPF	24	0,12328	0,00312	-0,3135	0,55211
	6	-0,0645	0,20915	-3,9836	1,32160
	4	0,36194	0,18494	-0,7518	0,93091
PS	24	0,16167	-0,0179	0,93006	-0,3764
	6	-0,1368	0,10627	6,76593	2,07093
	4	0,00071	0,01358	8,19473	-0,2996
Stacked	24	-0,2336	0,18488	-0,9763	0,12973
	6	0,28169	-0,2734	6,31370	1,04275
	4	-0,1447	-0,0603	3,93540	0,53437

Teniendo en cuenta estas posibles desviaciones, se puede observar que en estos cortos periodos de tiempo no se observan diferencias de eficiencia o capacidad ninguno de los casos. Esto no implica que no vayan a aparecer pérdidas o degradación a largo plazo, pero sí tiene una posible extrapolación positiva y es que los módulos no sufren grandes esfuerzos en la provisión de servicios, por lo que su vida útil puede ser larga. Más adelante se podrá comprobar si en la microrred expuesto a condiciones reales se aprecia algún cambio. Sí se aprecian aumentos de la resistencia interna debidos a la degradación en los casos de *stacked* para 6 kWh, así como PS

tanto para 6 como para 4 kWh, lo que lleva a asumir que la realización de estos servicios hará que la batería se degrade más rápidamente.

Como se ha mencionado previamente, para este análisis también se han calculado el número de ciclos equivalentes y el histograma representado en las siguientes figuras: Figura 9 Figura 10 Figura 11.

En una visión global de los resultados se observa que la RFP es el servicio tanto con menor degradación presentada como con menor número de ciclos profundos para estas tres semanas; siendo por tanto el más beneficioso para la batería, aunque por otro lado no se utilizaría toda la capacidad disponible para aportar servicios a la red. El PS se sitúa en el otro extremo, produciendo los mayores ciclos de carga y descarga, lo cual perjudicaría a la batería con el tiempo, y además produciendo degradación en la batería especialmente para tamaños de batería pequeños, cuyas exigencias de servicio son mayores. Como se puede apreciar, la apilación de ambos servicios simultáneamente se presenta como un punto medio entre ambos.

Esta apilación (*stacked services*) produce tanto mayores beneficios económicos a los usuarios que la presten como mayores beneficios a la batería al someterse a DOD no muy profundas, pero sí lo suficientes como para utilizar correctamente la capacidad de la batería. Sus resultados de degradación también son positivos al solo apreciarse pequeños incrementos de la resistencia interna en el caso de la batería con menor tamaño, lo que permite suponer que su vida útil aplicando estos servicios puede ser larga.

5.2 Resultados de la microrred

Como se ha mencionado en el apartado 4, Ensayos con batería completa en microrred, estos ensayos se han realizado en la microrred de la Universidad pública de Navarra para un intervalo de 3 semanas representativas del mes de agosto de 2020. Sus resultados se van a centrar principalmente en la comprobación del correcto funcionamiento del EMS diseñado en lazo cerrado, observando el seguimiento del SOC real con el teórico. Igualmente se medirá la eficiencia energética de la batería (η_{DC}) así como la eficiencia de carga- descarga del inversor (η_{AC}).

En un primer instante se va a observar la evolución del SOC medido segundo a segundo en la microrred para estas tres semanas de ensayo. Como se puede observar en la Figura 18, la contribución del PS será realmente significativa al ser realizada con generación fotovoltaica perteneciente a los meses del verano. Esto hace que por tanto la contribución de la RFP sea menos representativa, aunque apreciable igualmente en los pequeños picos que se suceden a lo largo del día.

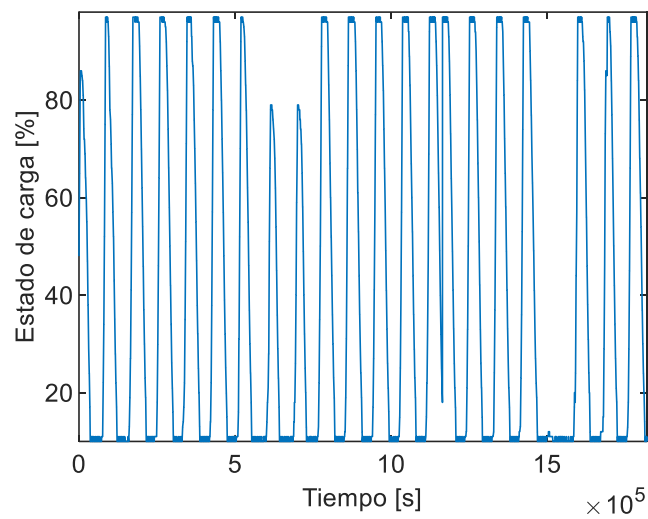


Figura 18- Evolución de la medida del Estado de carga vs. tiempo en la microrred para 3 semanas

Centrándose en la observación de dos días representativos, Figura 19, estos picos de la RFP son más apreciables, principalmente en los momentos en los que el PS no da servicio.

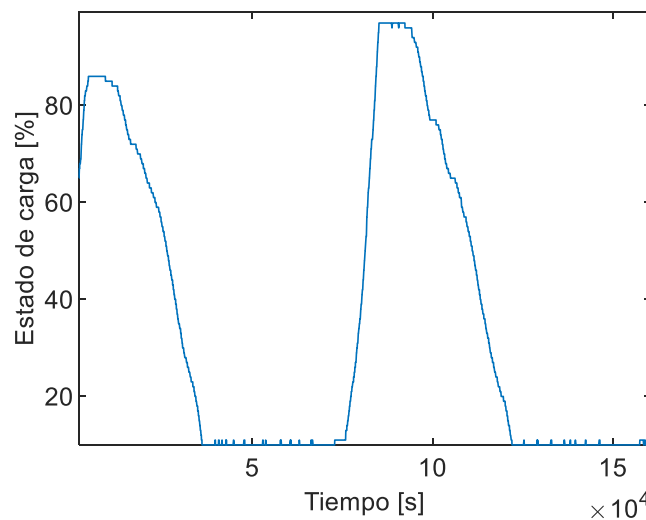


Figura 19-Evolución del Estado de carga vs. tiempo en la microrred para 2 días

Igualmente se puede diferenciar el comportamiento de los días con mucha generación FV (Figura 20 a) en los que la batería no llega a descargarse por completo, y los días nublados con poca generación FV en los que la batería apenas se carga, ya que toda la generación se inyecta a la red y únicamente participa en el servicio la RFP (Figura 20 b):

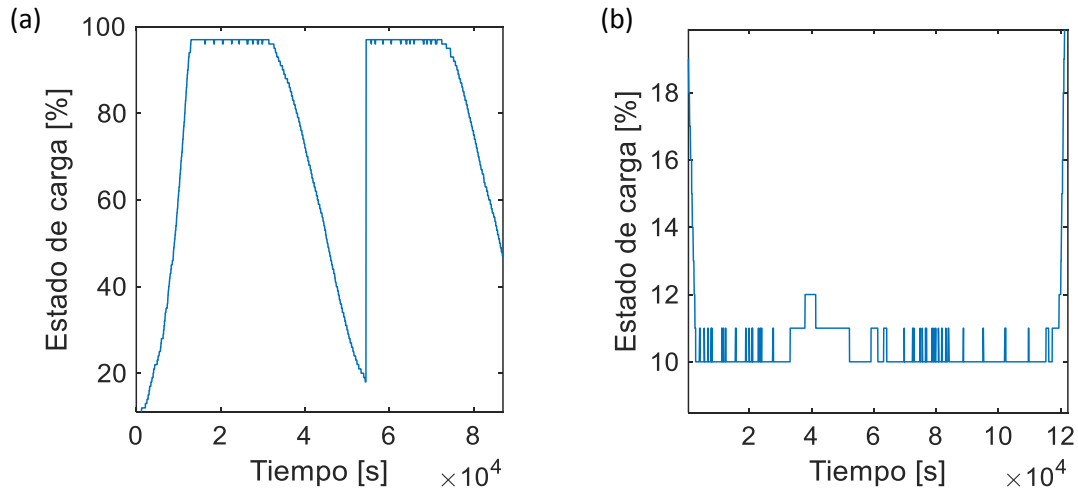


Figura 20- Evolución Estado de carga vs. tiempo para días de mucha generación (a) y poca generación (b)

Como se puede observar en la Figura 18, las grandes cargas y descargas producidas por el PS hacen que la batería realice ciclos completos diarios, por lo que todos los días la batería comienza y termina con el mismo SOC, que en este caso es del 10%. Esto permite el cálculo diario de la eficiencia energética de la batería, η_{DC} , cuya disminución a lo largo del tiempo indicaría degradación en la batería. El cálculo se ha realizado de forma diaria de la forma:

$$\eta_{DC} = \frac{\sum E_{carga}}{\sum E_{descarga}} \quad (4)$$

La Figura 21 muestra las variaciones porcentuales diarias de η_{DC} respecto del valor final. La evolución de las variaciones de eficiencia tiene de media una disminución del rendimiento del 0.3385%, es decir, que no se aprecian variaciones representativas. El rendimiento medio de la instalación es de 98,0403004%. A pesar de que las diferencias diarias de eficiencia son relativamente grandes debido al proceso de cálculo, estas no siguen un patrón descendente, lo que denota un correcto funcionamiento sin aparición de degradación.

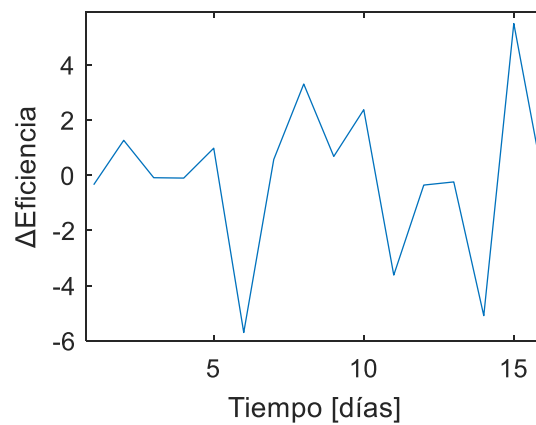


Figura 21- Diferencia porcentual diaria de eficiencia energética

Por último, también se puede calcular segundo a segundo la eficiencia del inversor, definida en los momentos de carga de la batería como:

$$\eta_{AC} = P_{DC} / P_{AC} \quad (5)$$

Mientras que en los momentos de descarga:

$$\eta_{AC} = P_{AC} / P_{DC} \quad (6)$$

Se adjunta a continuación en la Figura 22 su forma de onda. Esta eficiencia tiene de media un 88.26%, y de nuevo, aunque el cálculo es ciertamente impreciso, no consta de un patrón de disminución de eficiencia, prescribiendo así el correcto funcionamiento de la microrred para la provisión de estos servicios.

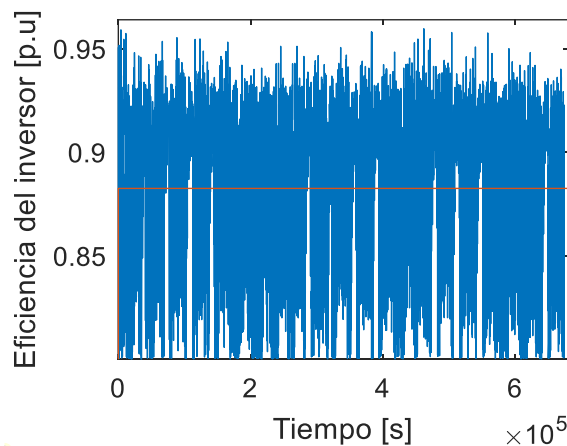


Figura 22- Evolución de la eficiencia del inversor para 3 semanas

Como se puede ver en los resultados, la provisión de ambos servicios combinados resulta ser de nuevo la óptima de entre los 3 casos a estudiar, ya que la superposición de los pequeños ciclos de RFP con las cargas y descargas más profundas del PS hacen que el resultado sea más estable que la realización de ambos servicios por separado. Es decir, que la provisión de dos servicios simultáneos, uno de potencia y otro de energía a la red, permite obtener dos beneficios consumiendo menos recurso, que en este caso es el SOH de la batería.

La principal resolución de este apartado ha sido la verificación del correcto funcionamiento del EMS diseñado para la aplicación de *stacked services* en un sistema en lazo cerrado, lo que permite a su vez verificar que las conclusiones obtenidas en el apartado 5.1.2- Resultados de eficiencia y degradación en cuanto a pérdidas y degradación son por tanto extraíbles y aplicables a casos reales.

6- Conclusiones y líneas futuras

A lo largo de este trabajo se ha analizado la contribución a servicios a red de RFP, PS y servicios apilados mediante baterías de segunda vida de diferentes capacidades, tanto a nivel de celda como para batería completa.

En base a los ensayos en lazo abierto, se han analizado tanto eficiencias como capacidades y resistencias internas en un periodo de 3 semanas representativas. Para este periodo, no se han observado variaciones significativas tanto en eficiencia como en capacidad. Aunque esto no implique que para ciclos más largos pueda aparecer degradación, sí que implica que estos servicios no conllevan grandes esfuerzos para los módulos y que su vida útil será larga. Por otro lado, sí se ha observado variaciones en la resistencia interna, siendo éstas más apreciables en las baterías de menor tamaño. Los resultados en cuanto a número de ciclos y profundidad, así como en valores óhmicos prueban que la contribución a un servicio energético respecto a uno de potencia requiere ciclos mucho mayores, así como una más rápida degradación.

Igualmente, la contribución a servicios apilados es más beneficiosa para la batería que la contribución únicamente al servicio energético, como se puede ver en los valores óhmicos, lo que además conllevaría mayores beneficios económicos para el proveedor. Recientes estudios, [55] prueban que los módulos de segunda vida pertenecientes a Nissan Leaf podrían realizar incluso hasta 2033 ciclos completos equivalentes antes de llegar al *ageing knee*, lo que en el caso de servicios apilados con módulos residenciales implicaría hasta 13 años de vida útil teniendo en cuenta condiciones de temperatura, tensiones y ambientales en general.

El estudio en lazo cerrado por otro lado prueba que efectivamente la caracterización inicial de los servicios era óptima y estos se realizan de forma correcta. Se ha permitido observar en un escenario real la realización de estos sin observar degradación alguna en los módulos. La estrategia inicialmente programada por el EMS es correcta, porque tal y como se preveía, permite superponer ambos servicios sin dificultad, y dejando en ocasiones incluso capacidad libre de la batería para darle otros usos.

A modo de conclusión se prevé un posible gran futuro para esta clase de servicios que ayudaría mucho como se ha mencionado al reciclaje del litio, a mejorar la integración de las energías renovables, a alargar la vida de los módulos y beneficiaría económicamente a los usuarios que lo presten. Una posible línea futura para este trabajo sería ensayar estos servicios en un periodo de tiempo más extenso para probar la degradación en horizontes temporales más largos, así como probar otros posibles servicios igualmente necesarios como *arbitrage*, *virtual inertia* o control de tensiones.

Bibliografía

- [1] A. Steiner, Köhler Carmen, I. Metzinger, A. Braun, M. Zirkelbach, D. Ernst, P. Tran and B. Ritter, "Critical weather situations for renewable energies – Part A: Cyclone detection for wind power," *Renewable Energy*, 2017.
- [2] C. Köhler, A. Steiner, Y.-M. Saint-Drenan, E. Dominique, A. Bergmann-Dick, M. Zirkelbach, Z. Ben Bouallègue, M. Isabel y B. Ritter, «Critical weather situations for renewable energies – Part B: low stratus risk for solar power,» *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 794-803, 2017.
- [3] P. Eriksen, T. Ackermann, H. Abildgaard, P. Smith, W. Winter y J. Rodriguez, «System operation with high wind penetration,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, nº 6, pp. 65-74, 2005.
- [4] J. Liu, C. Hu, A. Kimber y Z. Wang, «Uses, Cost-Benefit Analysis, and Markets of Energy Storage Systems for Electric Grid Applications,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [5] V. Zamani, A. Cortés, J. Kleissl y S. Martínez, «Integration of PV generation and storage on power distribution systems using MPC,» de *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver,CO, 2015.
- [6] E. J. Eguis-Eslava, K. M. Padilla-García, L. A. López-Díaz, J. D. Soto-Ortiz, R. Castillo-Sierra, M. Pardo-González, C. A. Orozco-Henao, E. A. Jiménez-Matos y I. Oliveros-Pantoja, «Distribution system with wind penetration,» *Visión electrónica, algo más que un estado sólido*, vol. 3, nº 2, 2019.
- [7] V. Deulkar, J. Nair y A. A.Kulkarnib, «Sizing Storage for Reliable Renewable Integration: A Large Deviations Approach,» *Journal of Energy Storage*, vol. 30, 2020.
- [8] A. Baldinelli, L. Barelli y G. Bidini, «Progress in renewable power exploitation: reversible solid oxide cells-flywheel hybrid storage systems to enhance flexibility in micro-grids management,» *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 202-219, 2019.
- [9] "Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 885-894, November 2014.
- [10] P. Denholm y M. Hand, «Grid flexibility and storage required to archive very high penetration of variable renewable energy,» *Energy Policy*, vol. 39, nº 3, pp. 1817-1830, 2011.
- [11] Y. Guo, J. Y. Jilai, Y. Jiang y Y. Tang, «Service Life of EV Batteries Used in Power Grid Frequency Regulation,» de *11th International Conference on Control (CONTROL)*, Belfast, UK, 2016.

- [12] D.-I. Stroe, V. Knap, M. Swierczynski, A.-I. Stroe y R. Teodore, «Operation of a Grid-Connected Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Primary Frequency Regulation: A Battery Lifetime Perspective,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, nº 1, pp. 430-438, Jan-Feb 2017.
- [13] C. White, B. Thompson y L. G. Swan, «Repurposed electric vehicle battery performance in second-life electricity grid frequency regulation service,» *Journal of Energy Storage*, vol. 28, 2020.
- [14] N. Ullah, A. Ali y H. Ali, «Frequency stability and synthetic inertia,» de *Variability, Scalability and Stability of Microgrids*, 2019, pp. 377-394.
- [15] P. Saxena, N. Singh y A. K. Pandey, «Enhancing the dynamic performance of microgrid using derivative controlled solar and energy storage based virtual inertia system,» *Journal of Energy Storage*, vol. 31, 2020.
- [16] N. Sharma y S. Sankar, «Modeling and Control of Battery Energy Storage System for Providing Grid Support Services,» de *Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, 2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC), USA, 2018.
- [17] H. Beltran, J. Cardio-Miota, J. Segarra-Tamarit y E. Pérez, «Battery size determination for photovoltaic capacity firming using deep learning irradiance forecasts,» *Journal of Energy Storage*, vol. 33, nº 102036, Enero 2021.
- [18] R. H. Byrne, T. A. Nguyen, D. A. Copp, B. R. Chalamala y I. Ryuk, «Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13231-13260, 2018.
- [19] B. Yang, J. Wang, Y. Chen, D. Li, C. Zeng, Y. Chen, Z. Gup, H. Guo, X. Zhang, T. Yu y L. Sun, «Optimal sizing and placement of energy storage system in power grids: A state-of-the-art one-stop handbook,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, nº 101814, 2020.
- [20] F. Wankmüller, P. R. Thimmapuram, K. G. Gallagher y A. Botterud, «Impact of battery degradation on energy arbitrage revenue of grid-level energy storage,» *Journal of Energy Storage*, vol. 10, pp. 56-66, 2017.
- [21] S. Narayana Gowda, T. Zhang, C. Jae Kim, G. Rajit y H. Nazaripouya, «Transmission, Distribution deferral and Congestion relief services by Electric Vehicles,» de *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2019.
- [22] I. Junquera Martínez, J. García-Villalobos, I. Zamora y P. Eguía, «Energy management of micro renewable energy source and electric vehicles at home level,» *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, p. 979–990, 2017.
- [23] G. Bode, M. Baranski y D. Müller, «Experimental application of second-life batteries in non-residential buildings,» de *31th International Conference on Efficiency, Cost,*

Optimization, Simulation and environmental impact on Energy Systems, Guimaraes, 2018.

- [24] L. Canals Casals, M. Barbero y C. Corchero, «Reused second life batteries for aggregated demand response services,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 212, pp. 99-108, 2018.
- [25] M. Elliott, L. G. Swan, M. Dubarry y G. Baure, «Degradation of electric vehicle lithium-ion batteries in electricity grid services,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [26] M. Á. Ortega Vázquez, «Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, nº 6, pp. 1007 - 1016, Junio 2014.
- [27] D. Kucevica, B. Tepe, S. Englberger, A. Englberger, M. Mühlbauer, O. Bohlen, A. Jossen y H. Hesse, «Standard battery energy storage system profiles: Analysis of various applications for stationary energy storage systems using a holistic simulation framework,» *Journal of Energy Storage*, nº 28, 2020.
- [28] L. Maeyert, L. Vandeveldel y T. Döring, «Battery Storage for Ancillary Services in Smart Distribution Grids,» *Journal of Energy Storage*, vol. 30, nº 101524, 2020.
- [29] U. Datta, . A. Kalam y J. Shi, «Smart control of BESS in PV integrated EV charging station for reducing transformer overloading and providing battery-to-grid service,» *Journal of energy Storage*, vol. 23, nº 101224, 2020.
- [30] F. Un-Noor, . P. Sanjeevikumar , L. Mihet-Popa , M. Nurunnabi Mollah y E. Hossain, «A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development,» *MDPI-Energies*, vol. 10, nº 8, 2017.
- [31] I. Sami, Z. Ullah, K.Salman, I. Hussain, S.M. Ali, B. Khan, C.A. Mehmood y U. Farid, «A Bidirectional Interactive Electric Vehicles Operation Modes: Vehicle-to-Grid (V2G) and Grid to-Vehicle (G2V) Variations within Smart Grid,» de *2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Lahore, Pakistan, 2019.
- [32] L. Canals Casals, D. De la Torre, R. Reinhart, C. Marchante y B. Amante, «Lithium-ion battery 2nd life used as a stationary energy storage system: Ageing and economic analysis in two real cases,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 272, nº 122584.
- [33] A. Berrueta, M. Heck, M. Jantsch, A. Ursúa y P. Sanchís, «Combined dynamic programming and region-elimination technique algorithm for optimal sizing and management of lithium-ion batteries for photovoltaic plants,» *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1-11, 2018.
- [34] L. Zhuowei, H. Zechun, S. Yonghua, X. Zhiwei, L. Hiu y J. Long, «2012 Economic Analyses of Plug-in Electric Vehicle Battery Providing Ancillary Services and Haiyan Lu,» *IEEE International Vehicle Electric Conference*, Greenville, SC, 2012.

- [35] A. Berrueta, S. Zurmülhen, P. Sanchis, A. Ursúa y D. Uwe Sauer, «Decision-tree bidding strategy for the provision of stacked grid services with a lithium-ion battery,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
- [36] C. Jankowiak, A. Zacharopoulos, C. Brandoni, P. Keatley, P. MacArtain y N. Hewitt, «Assessing the benefits of decentralised residential batteries for load peak shaving,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, nº 101779, December 2020.
- [37] B. Swain, «Recovery and recycling of lithium: A review,» *Separation and Purification Technology*, vol. 172, 2017.
- [38] A. Berrueta, S. Zurmülhen, P. Sanchis, A. Ursúa and D. Uwe Sauer, "Decision-tree bidding strategy for the provision of stacked grid services with a lithium-ion battery," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
- [39] N. Günter y A. Marinopoulos, «Energy storage for grid services and applications: Classification, market review, metrics, and methodology for evaluation of deployment cases,» *Journal of Energy Storage*, pp. 226-234, 2016.
- [40] P. Scarabaggio, R. Carli, G. Cavone y M. Dotoli, «Smart Control Strategies for Primary Frequency Regulation through Electric Vehicles: A Battery Degradation Perspective,» *Energies*, vol. 13, 2020.
- [41] Diario Oficial de la Unión Europea, «REGLAMENTO (UE) 2016/631 DE LA COMISIÓN,» 14 de abril de 2016.
- [42] U. Schlachter, A. Worschech, T. Diekmann, B. Hanke y K. von Maydell, «Optimised capacity and operating strategy for providing frequency containment reserve with batteries and power-to-heat,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [43] J. Munderlein, M. Steinhoff, S. Zurmühlen y D. Uwe Sauer, «Analysis and evaluation of operations strategies based on a large scale 5 MW and 5 MWh battery storage system,» *Journal of Energy Storage*, vol. 24, nº 100778, 2019.
- [44] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt y R. Villafáfila-Robles, «A review of energy storage technologies for wind power applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nº 4, pp. 2154-2171, 2012.
- [45] J. Liu, C. Hu, A. Kimber y Z. Wang, «Uses, Cost-Benefit Analysis, and Markets of Energy Storage Systems for Electric Grid Applications,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [46] C. A. Hill, M. Clayton Such, C. Dongmei, J. Gonzalez y G. W. Mack, «Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, nº 2, pp. 850-857, June 2012.

- [47] A. Oudalov, R. Cherkaoui y A. Beguin, «Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application,» de *IEEE Laussane Power Tech*, Lausanne, 2007.
- [48] M. Uddin, A. Mohd Faris, S. Abd Halim, A. H. Abu Bakar y T. C. Kwang, «A review on peak load shaving strategies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, nº 3, pp. 3323-3332, 2018.
- [49] D. Di Domenico, Y. Creff, E. Prada, P. Duchêne, J. Bernard y V. Sauvant-Moynot, «A Review of Approaches for the Design of Li-Ion BMS Estimation Functions,» *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 68, pp. 127-135, 2013.
- [50] I. Jha, S. Sen, M. Tiwari y M. K. Singh, «Control strategy for Frequency Regulation using Battery Energy Storage with optimal utilization,» de *014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Kurukshetra, 2014.
- [51] H. Liu, Z. Hu, Y. Song y J. Lin, «Decentralized Vehicle-to-Grid Control for Primary Frequency Regulation Considering Charging Demands,» *IEEE transactions on Power systems*, vol. 28, nº 3, pp. 3480-3489, 2013.
- [52] H. Turker, A. Hably y S. Bacha, «Housing peak shaving algorithm (HPSA) with plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs): Vehicle-to-Home (V2H) and Vehicle-to-Grid (V2G) concepts,» de *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Estambul, 2013.
- [53] M. García Plaza, J. Eloy-García Carrasco, J. Alonso-Martínez y A. Peña Asensio, «Peak shaving algorithm with dynamic minimum voltage tracking for battery storage systems in microgrid applications,» *Journal of Energy storage*, vol. 20, pp. 41-48, 2018.
- [54] E. Braco, I. San Martín, P. Sanchís y A. Ursúa, «Characterization and capacity dispersion of lithiumion second-life batteries from electric vehicles.,» de *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2019.
- [55] E. Braco, I. San Martín, A. Berrueta, P. Sanchis y A. Ursúa, «Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles,» *Journal of Energy Storage*, vol. 32, nº 101695, 2020.

Anexos

A continuación, se adjuntan 4 anexos que completan la información y cálculos realizados a lo largo de este trabajo. El primero de ellos incluye una breve justificación del código empleado en Matlab para la programación de los distintos servicios. El segundo incluye la extrapolación de esta misma programación a Lavbiew para lanzarla posteriormente a la microrred. El Anexo 3 recoge los resultados de los ensayos en módulos y cicladores para cada uno de los ensayos individuales, a partir de los cuales se ha calculado su media aritmética con la que se ha trabajado. El Anexo 4 concluye con la organización de carpetas y archivos utilizada a lo largo de este trabajo.

Anexo 1- programación en Matlab

1.1- Regulación primaria de frecuencia

Para una mejor comprensión del funcionamiento de la simulación de los servicios se adjuntan a continuación la implementación de los códigos utilizados para la implementación de los ensayos.

Por un lado, los ensayos para los módulos en lazo cerrado se han programado en Matlab siguiendo el esquema propuesto en la Figura 5. De este código se obtienen vectores de potencia secundales, con las potencias necesarias para que los módulos realicen los servicios correctamente. Son estos vectores los que serán lanzados a los ensayos como consigna.

La simulación de RFP se ha realizado para el año 2016 completo, a partir del cual se han seleccionado tres semanas representativas a ensayar. Se ha supuesto una eficiencia del 95% y se define el estatismo como 0.02 p.u. El programa comienza con la inicialización de variables:

```
%% INICIO
%carga de matriz de frecuencia segundal
load('f_Grid_Hz.mat');

%% INGRESO DE VALORES
%Número de días a simular:
diasSample=365;%
% Número de datos a simular:
nSample=diasSample*24;%(horas)
nnSample=nSample*60*60; %(en segundos)

% CANTIDAD DE ALMACENAMIENTO
PotEnsayo=6000; %W potencia nominal
PotCelda=PotEnsayo/96; %de cada una de las celdas, 62.5W

%% VECTORES Y MATRICES A UTILIZAR
f_Grid=f_Grid_Hz(1:nnSample,1);
EfiAlm=0.95; %Eficiencia de carga y descarga
R=0.02; %Estatismo de los generadores 2%

%Variables de salida de la regulación de frecuencia
PALm=zeros(1,nnSample); %Potencia de carga/descarga
SocAlm =zeros(1,nnSample); %Estado de carga
PALm_print=zeros(1,3*7*24*3600); %potencia a exportar 3 semanas
representativas
```

A continuación, comienza el bucle que calcula la potencia segunda a segundo suponiendo un SOC inicial del 50%. Se pueden observar los diferentes casos, que como se han mencionado previamente corresponden a:

Mientras el SOC se encuentre en valores aptos para la regulación (25-75%):

1. Para frecuencias entre 49.9 y 49.98 Hz o 50.02 y 50.2 Hz la regulación se realiza siempre de forma corriente ($\Delta P = \Delta f / R$ p.u)

```
SocAlm (1)=0.5;
for i=2:1:nnSample %Bucle que calcula todo segundo a segundo%

    %rango aceptable para la regulación, Caso 1
    if 0.25<SocAlm(i-1)&& SocAlm (i-1)<0.75

        if 49.8<f_Grid_(i) && f_Grid_(i)<49.98 %la batería se descarga,
falta potencia
            PAlm(i)=((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %P=w/R en p.u
<0 %medido en GW

        elseif 50.02<f_Grid_(i)&& f_Grid_(i)<50.2 %la batería se carga,
exceso de potencia
            PAlm(i)=((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %P=w/R en p.u
>0 medido en GW
```

2. Para frecuencias dentro de la *deadband* (49.98-50.02Hz), se realiza la regulación siempre que esta ayude a volver al SOC de referencia, que en este caso es de 50 Hz.

```
%Ayuda para recuperar el SOC, Caso 2

elseif 50<f_Grid_(i)&& f_Grid_(i)<50.02 %Ayuda a que SOC
aumente
    if SocAlm (i-1)<0.5
        PAlm(i)=((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %P=w/R en
p.u >0
    else
        PAlm(i)=0;
    end
elseif 49.98<f_Grid_(i)&& f_Grid_(i)<50 %Ayuda a que SOC
disminuya
    if SocAlm (i-1)>0.5
        PAlm(i)=((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %P=w/R en
p.u <0
    else
        PAlm(i)=0;
    end
```

3. Para frecuencias extremas ($f < 49.8$ Hz, $f > 50.2$ Hz), se establece un límite máximo que corresponde a la regulación de las frecuencias límite, en este caso, corresponde a 0.2p.u.

```

    %Caso 3, límites máximos
    elseif f_Grid_(i)>50.2
        PAlm(i)=((50.2-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %El máximo a
absorber es 0.2 p.u
    elseif f_Grid_(i)<49.8
        PAlm(i)=((49.8-50)/50)*(1/R)*PotCelda; %El máximo a
inyectar es -0.2 p.u
    end
    
```

El *overfullfillment* se encargará de que para SOC fuera de los límites aceptables para la regulación, esta ayude a volver a SOC aceptables. Es decir, siempre que la consigna de frecuencia ayude a volver al rango aceptable, el sistema aportará/cogerá un 30% más de potencia, o en caso de que lo empeore, solo realizará un 70% de la consigna asignada. Finaliza el gran bucle.

```

    %overfullfillment
    elseif 0.75<SocAlm (i-1)&& SocAlm (i-1)<=0.9
        if f_Grid_(i)<50
            PAlm(i)=1.3*((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda;
        else
            PAlm(i)=0.7*((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda;
        end

    elseif 0.1<SocAlm (i-1)&& SocAlm (i-1)<0.25
        if f_Grid_(i)<50
            PAlm(i)=0.7*((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda;
        else
            PAlm(i)=1.3*((f_Grid_(i)-50)/50)*(1/R)*PotCelda;
        end

    end
    
```

Por último, el SOC para cada segundo se ha calculado como el SOC anterior más la consigna asignada de energía para cada segundo dividido por la capacidad nominal, que en este caso son 250Wh.

```
SocAlm_freq(i)=SocAlm_freq(i-1)+(PAlm(i)/250/3600);
```

La consigna para los distintos tamaños de batería se obtiene modificando el estatismo de los generadores según el tamaño buscado.

1.2- Peak shaving

En cuanto al *Peak Shaving*, se parte de datos de generación de 9 semanas del año escalados a 12 kWp y de nuevo se inicializan las variables correspondientes. Al ser la generación FV de 12 kWp, se ha programado suponiendo una batería de este mismo tamaño (PotAlm) y posteriormente se ha escalado el vector de potencias al tamaño correspondiente a los módulos (PotCelda). La eficiencia se supuso inicialmente en un 95%, aunque posteriormente requirió de modificaciones.

```
FV=xlsread('Generacion 9 semanas.xlsx','A3:BK86402'); %lee los datos de
generación Fv segundo a segundo
nSample=9*7*24*3600; %número de segundos a simular
%pasa la generación a un vector con 1 única columna escalado
FvTot=zeros(nSample,1);
FvTot=FV(:);
FV_=FvTot(1:3*1814400,1)*12/5.208;

%Variables de salida
Alm=zeros(1,nSample); %Perfil del estado de carga
Carga=zeros(1,nSample); %Perfil de potencia de carga
Descarga=zeros(1,nSample); %Perfil de potencia de descarga
PotAlmPos=zeros(1,nSample); %Potencia de descarga
SocAlm=zeros(1,nSample); %Nivel de carga del resto del almacenamiento
Inyect=zeros(nSample,1); %Potencia inyectada a red
PotAlm=12; %Capacidad baterías kW
EfiAlm=0.95; %Eficiencia baterías
CapAlm=24; %Capacidad baterías kWh
PotEnsayo=6000; %Potencia nominal de la batería W
PotCelda=PotEnsayo/96; %la que realmente vamos a ensayar
PALm_print=zeros(1,1814400); %potencia a exportar
```

A continuación, se inicia el programa. De nuevo, tal y como se describió en la Figura 5, consta de 3 casos:

1- Generación entre 2 y 6 kW. La batería no actúa, generación óptima, se inyecta por completo.

```
Alm(1)=CapAlm*0.5;
SocAlm(1)=0.5;
for i=2:1:nSample
    PotAlmPos = min(PotAlm, Alm(i-1));
    Alm(i)=Alm(i-1);

    if (i>1)

        %Actúa normal
        if FV_(i)>(2) && FV_(i)<(6)
            Inyect(i)=FV_(i);
            Carga(i)=0;
            Descarga(i)=0;
            Alm(i)=Alm(i-1);
        end
    end
end
```

2- Generación mayor que 6 kW. La batería se carga. Se han establecido los siguientes límites de seguridad: Se realiza PS siempre que el SOC no sea superior al 85%, sin sobrepasar la capacidad de la batería. En este caso, se inyectarán 6 kW y se cargará el exceso.

```
%La batería se carga
if FV_(i)>6 && SocAlm(i-1)<1

    if SocAlm(i-1)<0.85
        Carga(i)=min(min([(PotAlm) (3600*(CapAlm-Alm_(i-1))*(EfiAlm))
FV_(i)-(6)])); % Se carga el exceso de 6kW siempre que pueda

        Alm(i)=Alm(i-1)+ (Carga(i)/(3600)); % nuevo nivel de carga

        if (FV_(i)-(6*4))<(CapAlm-Alm(i-1)*EfiAlm) %Si cabía todo en la
batería
            Inyect(i)=6;

        else %si no cabía se carga lo que no cabe
            Inyect(i)=4*6+((FV_(i)-6)-(CapAlm-Alm(i-1)*EfiAlm));

        end

        else %Estados de carga demasiado altos (>85%)

            Inyect(i)=FV_(i);
            Carga(i)=0;
            Descarga(i)=0;
            Alm_i)=Alm(i-1);
            end
        end
end
```

```
%La batería se descarga

if FV_(i)<2 && SocAlm(i-1)~=0

    if SocAlm(i-1)>0.1
        Descarga(i)=min(min([(PotAlmPos) 3600*Alm(i-1)/EfiAlm abs( 2-
FV_(i)))])); % Se descarga para inyectar 2kW siempre que pueda

        Alm(i)=Alm(i-1)- (Descarga(i)/3600);

        if (2-FV_(i))<(Alm(i-1)*EfiAlm) %si tiene suficiente carga
            Inyect(i)=2;

        else %si no tiene carga suficiente solo inyecta lo que puede
            Inyect(i)=4-((4-FV_(i))-(Alm_(i-1)/EfiAlm));

        end

        else %Estados de carga demasiado bajos (<10%)
            Inyect(i)=FV_(i);
            Carga(i)=0;
            Descarga(i)=0;
            Alm(i)=Alm(i-1);

        end
end
```

3- Generación menor que 2 kW. La batería se descarga. Se realiza PS siempre que la batería tenga un SOC mayor al 10%, teniendo en cuenta su nivel de carga y descargando la potencia necesaria para que la potencia total inyectada sean 2 kW.

En este caso, teniendo en cuenta las desviaciones debidas al rendimiento, se calcula el estado de carga y se adaptan las potencias a la capacidad de los módulos:

```
%Ajuste de rendimientos
    if Carga(i)>0
        PeakShaving(i)=Carga(i)/EfiAlm;
    elseif Descarga(i)>0
        PeakShaving(i)=Descarga(i)*(-1)*EfiAlm;
    else
        PeakShaving(i)=0;
    end
    SocAlm(i)=Alm(i)/CapAlm;
    PAlm_print(i)=PeakShaving(i)*PotCelda/PotAlm; %Ajuste de capacidad
```

Los diferentes tamaños de batería se obtienen escalando la generación fotovoltaica, así como los límites para los que se realiza el servicio.

1.3- Stacked services

La realización de ambos servicios simultáneamente se obtiene realizando un único bucle que contiene ambas contribuciones, siendo el SOC por tanto función de ambas de forma que al SOC anterior se le añadan, a cada segundo, la contribución de RFP y la de carga o descarga del PS.

```
if Carga(i)>0 %El PS carga la batería

    SocAlm(i)=SocAlm(i-1)+(Carga(i)/CapAlm/3600)+(PAlm(i)/CapAlm/3600);
    PAlm_print(i)=(PeakShaving(i)+PAlm(i))*PotCelda/PotAlm/EfiAlm;

elseif Descarga(i)>0 %El PS descarga la batería
    SocAlm(i)=SocAlm(i-1)-
    (Descarga(i)/CapAlm/3600)+(PAlm(i)/CapAlm/3600);
    PAlm_print(i)=(PeakShaving(i)+PAlm(i))*PotCelda/PotAlm*EfiAlm;

else %El PS no actúa, sólo RFP
    PeakShaving(i)=0;
    SocAlm(i)=SocAlm(i-1)+(PAlm(i)/CapAlm/3600);

    if PAlm(i)>0
        PAlm_print(i)=((PAlm(i))*PotCelda/PotAlm)/EfiAlm;
    else
        PAlm_print(i)=((PAlm(i))*PotCelda/PotAlm)*EfiAlm;
    end
end
```

La principal diferencia radica en que, como se puede observar en la evolución del SOC, el PS produce grandes ciclos de carga y descarga que van del 10 al 85%, mientras que la RFP tan sólo produce pequeñas oscilaciones alrededor del valor de referencia. Es por eso que, para mejorar la superposición de servicios y estabilizarla, se ha modificado el valor de referencia de la RFP al 20%, y por tanto los valores aptos para la regulación del 10 al 50%.

Anexo 2- programación en Labview

La programación en Labview se ha realizado de forma similar. Por un lado, se tiene la programación del *Peak Shaving*, donde en caso de ser la generación mayor que 2 kW, la batería se carga, y en caso de ser menor que 500 W, se descarga. En este caso, el PS está escalado un 121% de forma que los efectos de la degradación sean más visibles.

Por un lado, comienza con la lectura de la generación FV para los meses de verano Figura 23:

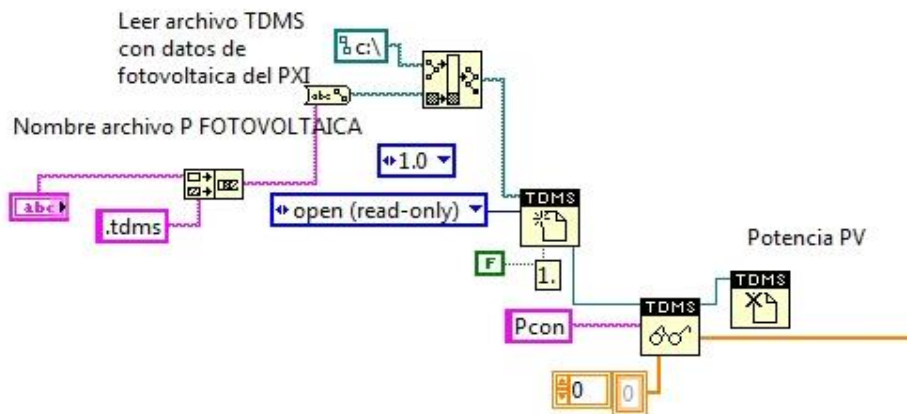


Figura 23-Lectura de generación FV en Labview

A continuación, y dentro del gran bucle donde de actuación de la microrred se programa el PS. En caso de cumplirse el primer *Case Structure* (True), la batería se cargará con el exceso a 2 kW. En caso de cumplirse el segundo, se descargará haciendo inyectar un total de 500 W. Si ambos Cases son False, la batería no se carga ni se descarga. Por último, esta FV se ha escalado un 21% para que sus efectos sean más relevantes. Los SOC aceptables para aportar el servicio (SOC_{MIN} y SOC_{MAX}) se han considerado de 10 y 97% respectivamente. La programación se puede ver en la Figura 24.

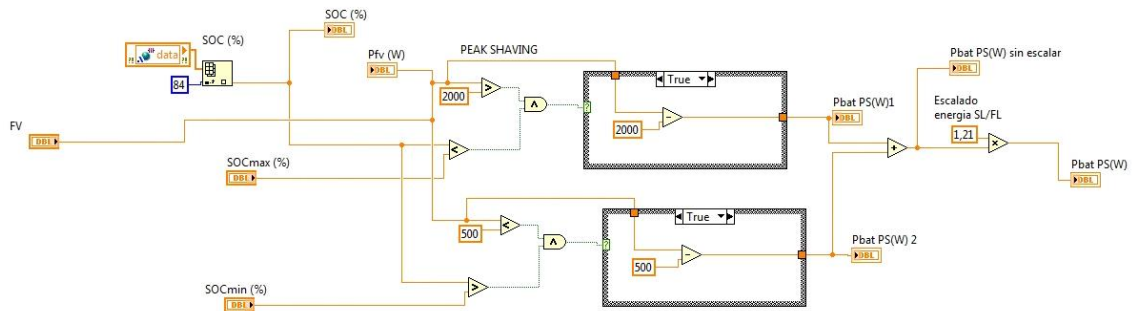


Figura 24- Programación de PS en Labview

La RFP en primer lugar y del mismo modo que el PS, el archivo lee los datos de frecuencia de red Figura 25:

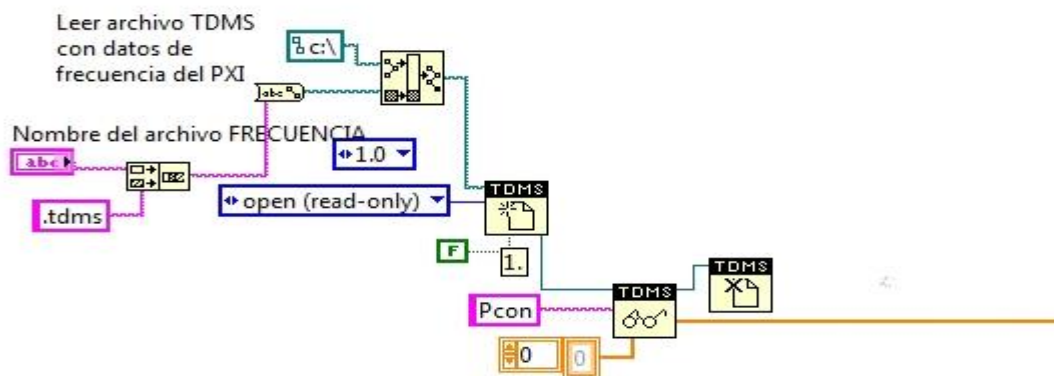


Figura 25- Lectura de datos de frecuencia en Labview

Por otro lado, dentro del mismo bucle, está dividida en una serie de casos a los que accederá en caso de cumplirse las premisas. En caso de acceso al *Case Structure*, cumplirá con la regulación del mismo modo que en los ensayos anteriores y con un estatismo del 2%. Al Igual que en el caso de Matlab, para regular ambos servicios se ha supuesto un SOC de referencia del 20% adaptando así los SOC aceptables para la regulación entre 10 y 50%. Los casos son los siguientes:

- Caso 1: SOC aceptable (10-50%) y frecuencia 49.8-49.98Hz. Se descarga con normalidad.
- Caso 2: SOC aceptable (10-50%) y frecuencia 50.02-50.2Hz. Se carga con normalidad. Estos 2 casos equivalen al caso 1 programado en Matlab y se muestran en la Figura 26.

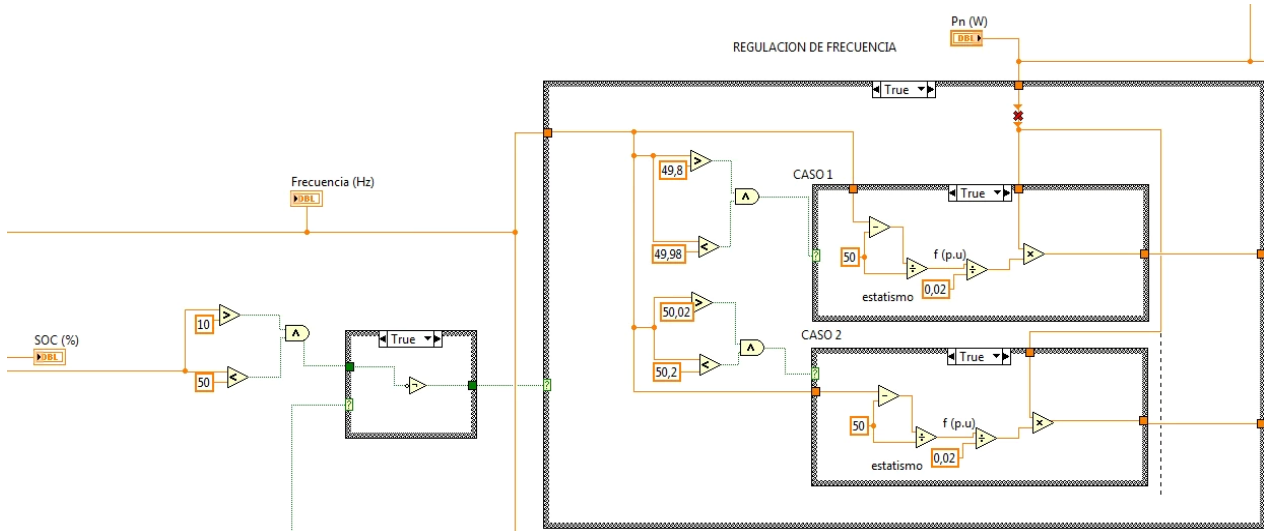


Figura 26- RFP para SOC entre 10-50% en Labview

- Caso 3: Para SOC bajos (10-20%), realiza RFP dentro de la *deadband* siempre que ayude a volver al SOC de referencia (50-50.02 Hz).
- Caso 4: Para SOC altos (20-50%), realiza RFP dentro de la *deadband* siempre que ayude a volver al SOC de referencia (49.98-50 Hz). Ambos casos se corresponden con el caso 2 programado en Matlab y se muestra en la Figura 27.

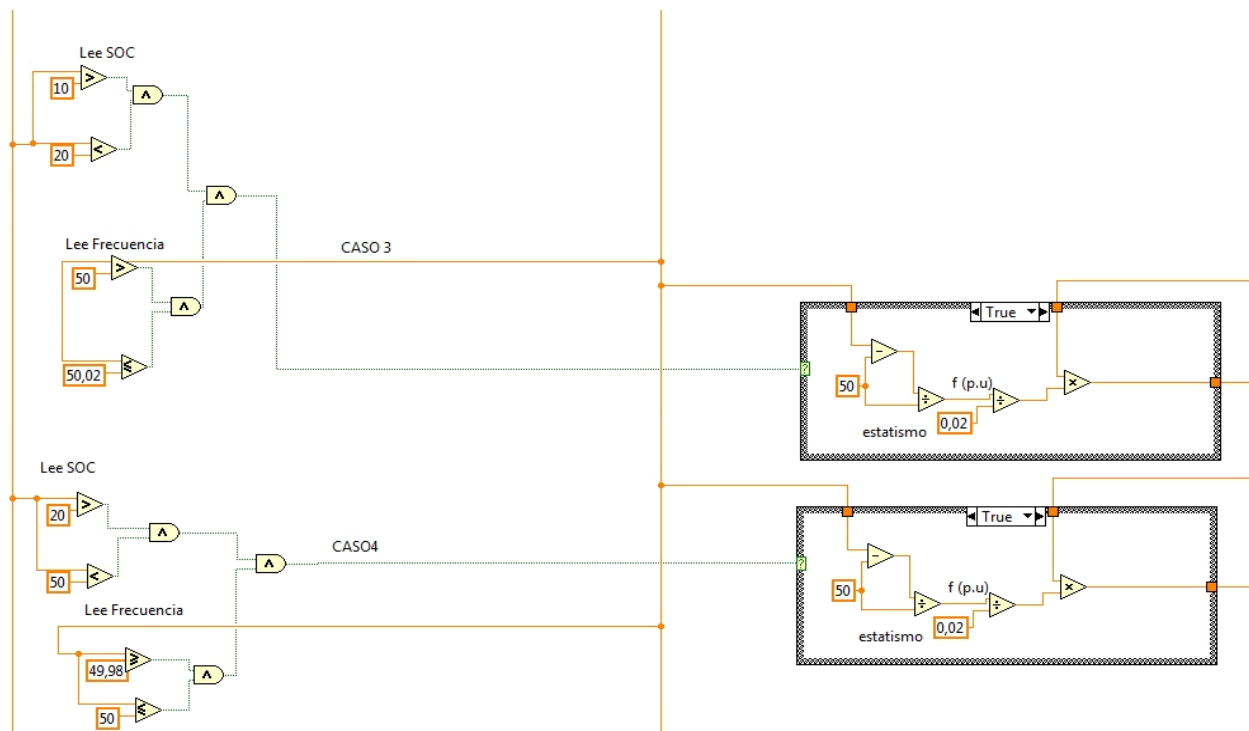


Figura 27- RFP dentro de deadband en Labview

- Caso 5: SOC aceptable (10-50%) frecuencias por debajo de 49.8 Hz limitan la potencia de descarga a 0.2 pu.
- Caso 6: SOC aceptable (10-50%) frecuencias por encima de 50.2 Hz limitan la potencia de carga a 0.2 pu. Ambos casos corresponden al caso 3 programado en Matlab, limitación para frecuencias extremas y se pueden ver en la Figura 28.

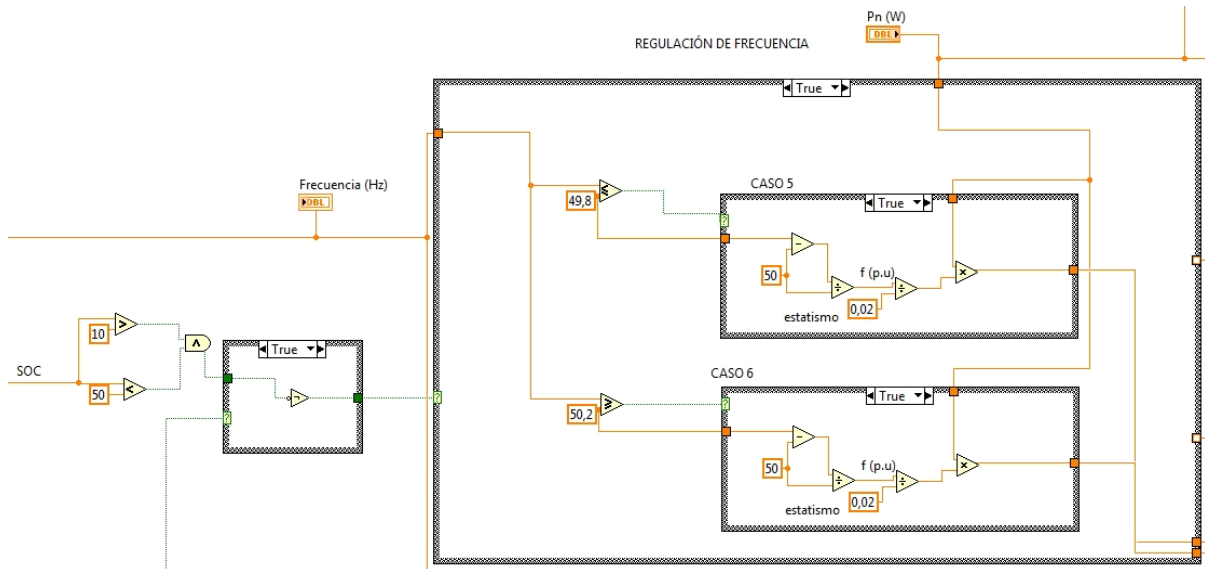


Figura 28- RFP limitada para frecuencias extremas en Labview

- Caso 7: *Overfulfillment*. Para SOC mayores de 50 inyecta un 130% para frecuencias bajas y se carga un 70% para frecuencias altas respecto de la correspondiente.
- Caso 8: *Overfulfillment*. Para SOC menores de 10 inyecta un 70% para frecuencias bajas y se carga un 130% para frecuencias altas respecto de la correspondiente. Ambos se pueden ver en la Figura 29.

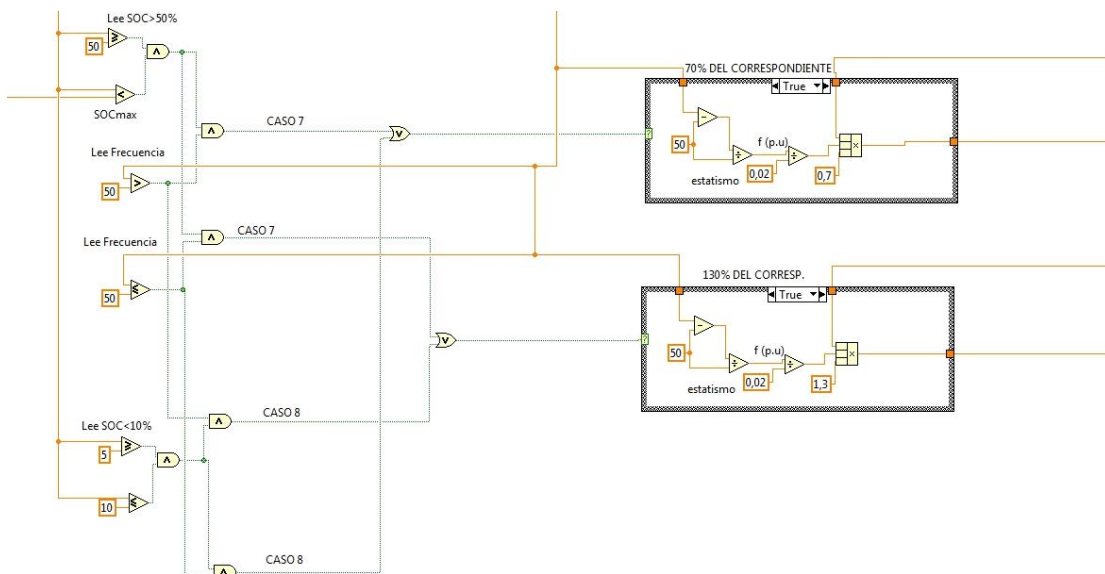


Figura 29- Overfulfillment en Labview

En el supuesto de que las premisas no entran a ninguno de los casos, la microrred no participa en la RFP teniendo como única contribución el PS. Por último, se suman todos los *Cases structure* junto a la contribución del PS y se realizan las correcciones pertinentes en cuanto a eficiencias y corrección de *offset*. Al igual que en la programación en Matlab, las potencias de carga se corrigen dividiendo por la eficiencia mientras que las de descarga se reducen con la eficiencia Figura 30.

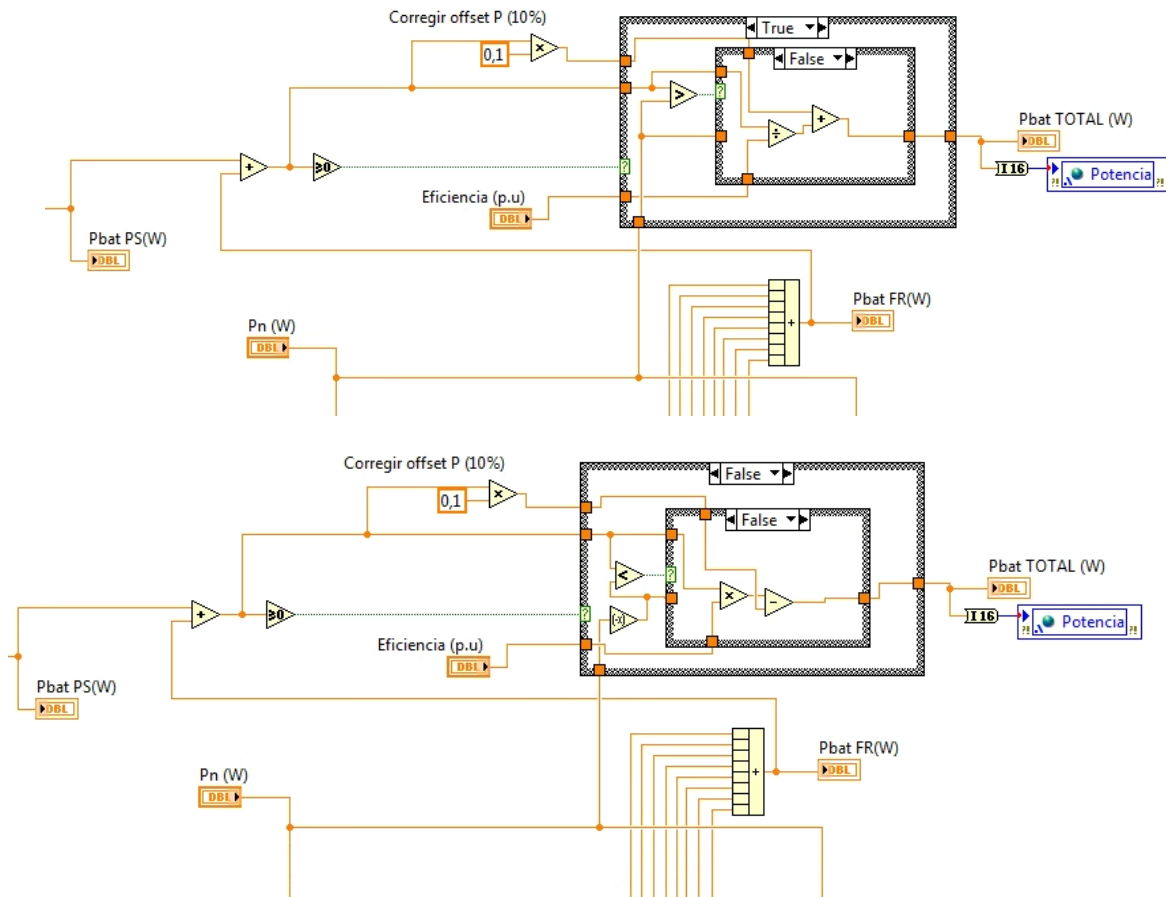


Figura 30- Corrección de offset y eficiencias en Labview

Anexo 3- Desglose de resultados

En este apartado se procede a ilustrar en primer lugar, cómo se han obtenido los valores de EFC, histogramas, resistencia y degradación, así como un desglose de los resultados obtenidos para cada ensayo en concreto.

3.1 Obtención de resultados

Por un lado, los resultados de eficiencia, capacidad y resistencia interna se han obtenido a partir del ensayo de caracterización exhaustiva mencionado previamente, ilustrado en la Figura 31. Este ensayo se ha realizado de forma anterior y posterior a la contribución del servicio. Tanto la capacidad como la eficiencia energética y culómbica se han obtenido durante el tercer ciclo de carga y descarga completa. Por otro lado, la Resistencia interna total se puede medir en

cada uno de los escalones para diferentes SOC. En todos ellos se ha medido la Resistencia en el escalón correspondiente al escalón del 50% según la ecuación (7), y a esta se le ha sustraído la resistencia óhmica, considerada constante.

$$R = \Delta V / \Delta I \quad (7)$$

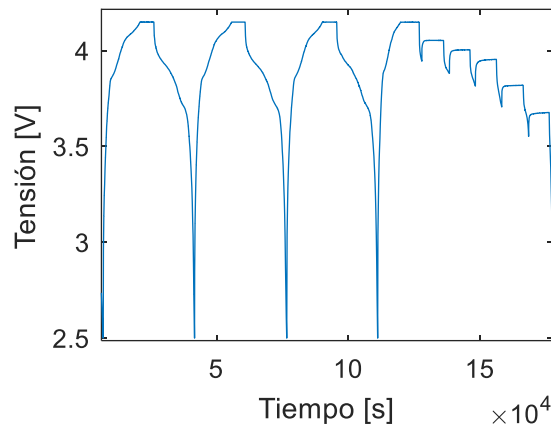


Figura 31- Ensayo de caracterización

En la Figura 32 se muestra en esquema del circuito equivalente utilizado para modelizar la batería, del cual se ha caracterizado la R_i previamente mencionada.

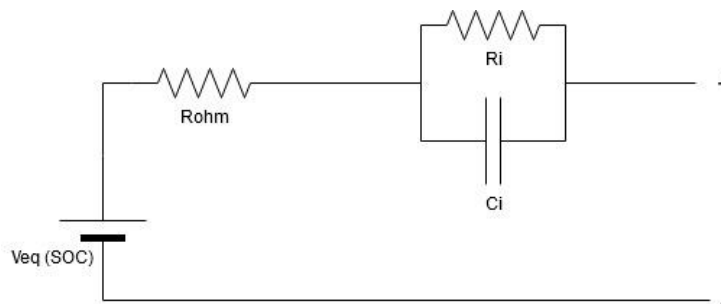


Figura 32- Circuito interno equivalente de la batería

Por otra parte, el número de ciclos equivalente para cada ensayo se ha calculado según la ecuación (8):

$$EFC = \frac{Q}{2 \cdot C} = \frac{\int P dt}{2 \cdot 250Wh} \quad (8)$$

Desarrollándolo, en primer lugar se ha obtenido el valor neto de la potencia segundo a segundo, y a continuación se ha utilizado la función *trapz*, que realiza la integral trapezoidal del vector. El histograma se ha obtenido mediante el comando *Rainflow*, que realiza un conteo de ciclos de fatiga al introducirle valores energéticos en este caso por unidad respecto de la capacidad nominal de la batería.

```

for i=1:n
    if Power(i)>0
        NetPower(i)=Power(i);
    else
        NetPower(i)=(-1)*Power(i);
    end
end
Q=trapz(NetPower); %integra la variable NetPower mediante el método
trapezoidal
EFC=(Q/3600)/(2*250); %250=capacidad de una celda ambos en Wh
%Histograma
[C,hist,extremos]=rainflow(Energy_bat);
numciclos=sum(hist,2);
extremos2=extremos';
histogram('BinEdges',extremos2,'BinCounts',numciclos);
    
```

3.2 Resultados para regulación primaria de frecuencia

Por último, se adjuntan aquí los resultados individuales para cada ensayo, a partir de los cuales se han obtenido las medias representativas según el tipo de ensayo. Todas las tablas están estructuradas de forma que se aportan tanto el valor de la caracterización inicial, el de la caracterización final, y la diferencia porcentual con respecto al valor final

Tabla 4- RFP 24kWh para módulo BP247

EFC	DOD MEDIA	Δ Efici. (%)	Δ Efici. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
0,5079	3.3-3.6 Wh	0,20371	-0,02581	-3,41085	0,10945
	inicio	94,41937 Wh	99,9945 Ah	4,85531 m Ω	42,1621 Ah
	fin	94,61211 Wh	99,968736 Ah	4,69516 m Ω	42,2083 Ah

Tabla 5- RFP 24kWh para módulo BP106

EFC	DOD MEDIA	Δ Efici. (%)	Δ Efici. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
0,4796	2-3 Wh	0,04285	0,03206	2,78371	0,99476
	inicio	93,99324 Wh	99,70021 Ah	5,18581 m Ω	40,32810 Ah
	fin	94,03353 Wh	99,73218 Ah	5,33430 m Ω	40,73330 Ah

Tabla 6- RFP 6kWh para módulo BP110

EFC	DOD MEDIA	Δ Efici. (%)	Δ Efici. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,8877	45-50 Wh	-0,46705	0,28961	-5,77817	0,14953
	inicio	94,29751 Wh	99,62491 Ah	5,60263 m Ω	40,53400 Ah
	fin	93,85914 Wh	99,91427 Ah	5,29658 m Ω	40,59470 Ah

Tabla 7- RFP 6kWh para módulo BP108

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,891	45-48 Wh	0,36767	0,22260	-0,66675	0,02376
	inicio	94,35801 Wh	99,67639 Ah	4,92841 m Ω	41,65520 Ah
	fin	94,70622 Wh	99,89877 Ah	4,89577 m Ω	41,66510 Ah

Tabla 8- RFP 6kwh para módulo BP110 (repetición)

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,7979	45-50 Wh	-0,09437	0,11523	-5,50600	2,61943
	inicio	93,80084 Wh	99,55440Ah	5,21248 m Ω	39,92350 Ah
	fin	93,71240 Wh	99,66925Ah	4,94046 m Ω	40,99740 Ah

Tabla 9- RFP 4Kwh para módulo BP247

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
3,3672	65-70 Wh	0,52715	0,21920	-6,20056	0,25837
	inicio	93,98161 Wh	99,75523 Ah	5,64568 m Ω	42,04000 Ah
	fin	94,47966 Wh	99,97438 Ah	5,31606 m Ω	42,14890 Ah

Tabla 10- RFP 4kWh para módulo BP56

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
3,394	60-65 Wh	0,19673	0,15069	4,69696	0,11463
	inicio	94,73645 Wh	99,76994 Ah	3,41458 m Ω	46,62040 Ah
	fin	94,92320 Ah	99,92051 Ah	3,58287 m Ω	46,67390 Ah

3.3- Resultados para *peak shaving*

Tabla 11- PS 24kWh para módulo BP241

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
3,5083	20-40 Wh	0,13264	-0,11358	4,13734	-0,74220
	inicio	94,39428 Wh	99,97568 Ah	4,56881 m Ω	40,29940 Ah
	fin	94,51965 Wh	99,86226 Ah	4,76600 m Ω	40,00250 Ah

Tabla 12- PS 24kWh para módulo BP56

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
3,5333	20-40 Wh	0,45960	0,04970	1,25685	-0,13251
	inicio	0,94606 Wh	99,84171 Ah	5,19981 m Ω	47,00210 Ah
	fin	0,95043 Wh	99,89135 Ah	5,26600 m Ω	46,93990 Ah

Tabla 13- PS 24kWh para módulo BP106

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
3,5152	20-40 Wh	-0,10722	0,01004	-2,60399	-0,25473
	inicio	93,96115 Wh	99,95111 Ah	5,55249 m Ω	41,52120 Ah
	fin	93,86051 Wh	99,96114 Ah	5,41158 m Ω	41,41570 Ah

Tabla 14- PS 6kWh para módulo BP106

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
12,1046	50-100 Wh	-0,07704	0,21904	7,93618	1,89758
	inicio	94,03353 Wh	99,73218 Ah	5,33430 m Ω	40,73330 Ah
	fin	93,96115 Wh	99,95111 Ah	5,79414 m Ω	41,52120 Ah

Tabla 15- PS 6kWh para módulo BP241

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
13,876	40-80 Wh	-0,19668	-0,00650	5,59569	2,24428
	inicio	94,13015 Wh	99,70872 Ah	4,37816 m Ω	45,04310 Ah
	fin	93,94537 Wh	99,70224 Ah	4,63767 m Ω	46,07720 Ah

Tabla 16- PS 4kWh para módulo BP56

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
18,3024	50-100 Wh	0,07797	0,02247	16,37729	-0,49912
	inicio	94,92320 Wh	99,92051 Ah	3,58287 m Ω	46,67390 Ah
	fin	94,99726 Wh	99,94297 Ah	4,28457 m Ω	46,44210 Ah

Tabla 17- PS 4kWh para módulo BP247

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
18,3146	60-90 Wh	-0,07655	0,00468	0,01218	-0,10024
	inicio	94,47966 Wh	99,97438 Ah	5,31606 m Ω	42,04000 Ah
	fin	94,40739 Wh	99,97906 Ah	5,32823 m Ω	41,99790 Ah

3.4- Resultados para stacked services

Tabla 18- Stacked services 24kWh con módulo BP207

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,8311	22-26 Wh	-0,29705	0,04517	-8,88167	-0,41030
	inicio	0,94059 Wh	99,84697 Ah	6,14712 m Ω	39,08270 Ah
	fin	0,93780 Wh	99,89209 Ah	5,64568 m Ω	38,92300 Ah

Tabla 19- Stacked services 24kWh para módulo BP108

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,7649	27-30 Wh	-0,39767	0,05432	2,36155	1,23805
	inicio	94,70622 Wh	99,89877 Ah	4,89577 m Ω	41,66510 Ah
	fin	94,33109 Wh	99,95307 Ah	5,01418 m Ω	42,18740 Ah

Tabla 20- Stacked services 24kWh para módulo BP241

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
2,7808	18-27 Wh	-0,00620	0,45515	3,59123	-0,43857
	inicio	93,08857 Wh	99,49506 Ah	5,99888 m Ω	39,80300 Ah
	fin	93,08280 Wh	99,94998 Ah	6,22234 m Ω	39,62920 Ah

Tabla 21- Stacked serices 6kWh para módulo BP110

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
4,785	54-63 Wh	0,52670	-0,04450	11,81890	1,50614
	inicio	93,80084 Wh	99,66925 Ah	4,94046 m Ω	39,92350 Ah
	fin	94,29751 Wh	99,62491 Ah	5,60263 m Ω	40,53400 Ah

Tabla 22- Stacked services 6kWh para módulo BP241

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
6,1606	54-57 Wh	0,036680	-0,502420	0,808496	0,579353
	inicio	93,054422 Wh	99,994946 Ah	5,950382 m Ω	39,57240 Ah
	fin	93,088566 Wh	99,495063 Ah	5,998882 m Ω	39,80300 Ah

Tabla 23- Stacked services 4kWh para módulo BP207

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
8,4294	60-63 Wh	0,18173	0,06640	7,22935	2,57169
	inicio	93,78040 Wh	99,89209 Ah	5,64568 m Ω	38,92300 Ah
	fin	93,95114 Wh	99,95847 Ah	6,08564 m Ω	39,95040 Ah

Tabla 24- Stacked services 4kWh para módulo BP73

EFC	DOD MEDIA	Δ EFICI. (%)	Δ EFICI. (%)	Δ Ri (%)	Δ CAPAC. (%)
8,4	57-66 Wh	-0,35543	0,12517	1,53013	0,56938
	inicio	94,82139 Wh	99,86231 Ah	4,83162 m Ω	43,58740 Ah
	fin	94,48556 Wh	99,98746 Ah	4,90670 m Ω	43,83700 Ah

3.5- Datos característicos de los módulos

Por último, se adjuntan en las Tabla 25 Tabla 26 Tabla 27 también las medidas tomadas de forma previa y posterior a la realización del ensayo en cuanto a tensión en los bornes, resistencia óhmica y terminales ensayados.

Tabla 25- Características de los ensayos de los cicladores

Módulo	Celda	Ensayo	Fecha inicio	Fecha fin
BP246	28-2.4	Superior	14-oct	04-nov
BP241	28-2.3	Superior	13-oct	26-oct
BP247	28-2.2	Superior	25-sep	18-oct
BP106	29-1.6	Superior	07-oct	17-dic
BP108	29-1.7	Superior	07-oct	12-dic
BP110	29-1.8	Superior	07-oct	13-dic
BP56	29-2.1	Superior	13-oct	26-oct
BP56	29-2.1	Superior	19-nov	02-dic
BP61	29-2.3	Superior	13-oct	16-dic
BP73	29-2.5	Superior	13-oct	23-dic
BP207	29-2.2	Inferior	14-oct	23-dic
BP247	29-2.6	Superior	16-nov	20-dic

Tabla 26- Medidas tomadas de forma anterior al ensayo

Módulo	V _{SUP} (V)	V _{INF} (V)	V _{MOD} (V)	R _{SUP} (mΩ)	R _{INF} (mΩ)	R _{MOD} (mΩ)
BP246	3,8577	3,868	7,726	1,437	1,304	2,451
BP241	3,8163	3,8163	7,617	1,503	1,598	2,901
BP247	3,8565	3,858	7,713	1,33	-	-
BP106	3,5445	3,5429	7,083	1,48	1,67	2,66
BP108	3,5368	3,5386	7,074	1,41	1,58	2,54
BP110	3,5511	3,5492	7,098	1,48	1,56	2,7
BP56	3,4383	3,4386	6,87	1,26	1,4	2,27
BP56	3,905	3,4382	7,344	1,19	1,39	2,26
BP61	3,5255	3,5203	7,041	1,28	1,41	2,33
BP73	3,4382	3,44	6,881	1,35	1,46	2,43
BP207	3,7519	3,8275	7,578	2,63	1,35	3,78
BP247	3,9296	3,8519	7,776	-	-	-

Tabla 27- Medidas tomadas de forma posterior al ensayo

Módulo	V _{SUP} (V)	V _{INF} (V)	V _{MOD} (V)	R _{SUP} (mΩ)	R _{INF} (mΩ)	R _{MOD} (mΩ)
BP246	3,9349	3,8647	7,798	1,44	1,72	2,33
BP241	3,9537	3,8161	7,768	1,44	1,63	2,76
BP247	3,9344	3,8537	7,786	1,34	1,5	2,33
BP106	3,9368	3,5349	7,469	1,52	1,54	2,68
BP108	3,9327	3,5295	1,449	1,4	1,53	2,51
BP110	3,9399	3,54	7,748	1,67	1,56	2,79
BP56	3,905	3,4382	7,344	1,19	1,39	2,26
BP56	3,902	3,5136	7,414	1,24	1,45	2,36
BP61	3,902	3,5136	7,414	1,24	1,45	2,36
BP73	3,9128	3,438	7,35	1,23	1,5	2,39
BP207	3,7432	3,9522	7,694	2,62	1,51	3,65
BP247	3,946	3,8485	7,793	1,45	1,56	2,46

Anexo 4- organización de archivos

A continuación, se explica la estructura seguida para la organización de los ficheros utilizados a lo largo de este trabajo.

- Bibliografía: Esta carpeta contiene los documentos citados en la sección Bibliografía, así como los utilizados de forma previa como documentación.

- Datos sistema eléctrico: Contiene los datos de los que se parte para la programación tanto de frecuencia de red como de generación FV de la instalación simulada en los cicladores y de la microrred de la Upna.

- Experimental: Incluye la programación de cada uno de los archivos relatada en el Anexo 1- programación en Matlab organizada según subcarpetas de servicios para las diferentes capacidades. Igualmente contiene los archivos txt. de premisa de potencia de cada ensayo organizados por servicios que se llevan a los cicladores y por último, los archivos Excel utilizados para la organización de ensayos.

- Microrred: Comprende datos relativos a la microrred instalada en la Upna (Generación, control y baterías) así como los perfiles utilizados en Matlab para prever los estados de carga que debía seguir, los resultados obtenidos en la microrred y su posterior análisis en Matlab.

- Resultados ensayos: Abarca por un lado los documentos Excel utilizados para el cálculo de los parámetros de degradación y pérdidas. Por otro lado, dentro de la subcarpeta "Resultados finales" se incluyen organizados según servicio y capacidad los resultados proporcionados por los cicladores tanto en formato Excel como en Matlab y los archivos correspondientes utilizados para el análisis de datos. Se incluye también una carpeta extra que contiene los ensayos fallidos.