



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la gestión energética del sistema.

Battery lifetime estimation in PV systems.  
Influence of the energy management of the system.

Autor/es

Alfonso López de Lacalle Sanvicente

Director/es

Ángel Antonio Bayod Rújula

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Curso 2017-2018



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Alfonso López de Lacalle Sanvicente,

con nº de DNI 72832485-H en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la  
gestión energética del sistema.

Battery lifetime estimation in PV systems. Influence of the energy  
management of the system.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada  
debidamente.

Zaragoza, 16 de enero de 2018

Fdo: Alfonso López de Lacalle Sanvicente

# Estimación de la vida útil de baterías en sistemas fotovoltaicos. Influencia de la gestión energética del sistema.

## RESUMEN

Cada día se le da más importancia a la sostenibilidad energética, teniendo así una gran importancia las energías renovables. En este trabajo se analiza una parte de la energía solar, concretamente de la energía solar fotovoltaica. Un sistema de energía solar fotovoltaica está formado por diferentes elementos entre los que se encuentran los paneles fotovoltaicos, el inversor y las baterías de acumulación. Especialmente se centra en las baterías de acumulación, ya que tienen una gran importancia en el correcto funcionamiento del sistema.

Para ello, tras comentar cómo funciona un sistema de energía solar fotovoltaica y sus elementos, se detallan los parámetros y las características de operación de las baterías de acumulación. Además, se relacionan éstos parámetros con el estado de carga y la vida útil de las propias baterías ya que tienen gran influencia sobre las mismas. Se analizan los diferentes tipos de baterías, centrándose en las de uso en energía fotovoltaica.

El análisis y estimación de la vida útil de las baterías es un proceso complejo de realizar, pero muy importante a la hora del correcto funcionamiento del sistema. Dimensionar correctamente la batería para un uso concreto en un sistema es muy importante para poder abastecer el consumo correctamente. La batería es una parte cara del sistema y por tanto un correcto dimensionamiento y mantenimiento es esencial desde el punto de vista económico. Se evalúan diferentes técnicas y estimaciones de la vida útil de las baterías a lo largo del trabajo. Se analizan de manera profunda los métodos de Rainflow Cycle counting y Nciclos\*DOD.

También se analiza un caso concreto sobre la gestión de energía solar fotovoltaica en un sistema híbrido en Zaragoza. Se explican las diferentes estrategias de gestión de la energía para abastecer una demanda media de una vivienda en Zaragoza. Se comparan y analizan la vida de las baterías, el precio de la instalación, el porcentaje de energía renovable utilizada y demás variables en función de la estrategia elegida y sus parámetros.

Por último, se exponen las conclusiones extraídas tras la realización del trabajo. Se ha desarrollado un método teórico de estimación de la vida útil de las baterías de acumulación. Este método se ha denominado Nciclos\*DOD y su resultado ha sido satisfactorio. Sirve para su utilización en las mismas condiciones en las que se han obtenido los valores que aparecen en la hoja de características proporcionada por el fabricante. Se comentan y analizan las conclusiones obtenidas acerca del caso de estudio en Zaragoza.

## TABLA DE CONTENIDO:

1. Introducción.....	6
2. Energía solar fotovoltaica.....	8
2.1. Historia.....	8
2.2. Componentes de un sistema fotovoltaico.....	8
Generador fotovoltaico.....	9
Baterías de acumulación.....	9
Regulador de carga.....	10
Inversor.....	10
3. Baterías de acumulación.....	11
3.1. Parámetros de las baterías.....	11
Tensión de vacío:.....	11
Tensión de la batería:.....	11
Capacidad.....	12
Profundidad de descarga.....	12
Estado de carga.....	12
SOH estado de salud.....	13
Vida útil.....	13
Rendimiento energético.....	14
4. Estimación del estado de carga.....	15
4.1. Método de conteo de Coulomb.....	15
4.2. Método de voltaje.....	16
4.3. Método de filtro de Kalman.....	16
4.4. Método de densidad del electrolito.....	18
5. Estimación de la vida útil.....	19
5.1. Nciclos*DOD.....	19
5.2. Rainflow cycle counting.....	24
6. Caso de estudio.....	27
6.1. Descripción sistema.....	27
6.2. Estrategia de gestión.....	28
6.3. Parámetros del sistema.....	28
Parámetros de la batería de acumulación.....	28
Balance de energía.....	28
Cálculo porcentaje reducción de vida útil de la batería.....	29

6.4.	Implementación del sistema.....	30
	Datos de entrada al sistema.....	30
	Datos de salida del sistema .....	30
6.5.	Análisis y resultados .....	32
	Producción.....	32
	Demanda.....	33
	Profundidad de descarga máxima.....	34
	Condiciones de recarga nocturna.....	35
	Días de autonomía (D) .....	37
	Comparación de estrategias .....	38
	Análisis económico .....	39
7.	Conclusiones .....	43
8.	Bibliografía.....	44
9.	Índice de figuras .....	46

## **1. Introducción**

Actualmente se le está dando mucha importancia a las energías renovables y a la sostenibilidad energética. En este trabajo se exponen diferentes temas acerca de la energía solar fotovoltaica, centrándose principalmente en las baterías de acumulación. La energía solar fotovoltaica transforma la luz solar en electricidad de manera directa. Las placas solares son su parte principal, ya que son las encargadas de crear una diferencia de potencial entre sus caras para conseguir la electricidad. Este tipo de generación de energía se basa en la teoría de los semiconductores. Las baterías de acumulación son otro componente de los sistemas fotovoltaicos, en el cual se almacena la energía generada para usarla en un futuro.

En el trabajo se analizan las baterías en los sistemas de energía solar fotovoltaica. Tiene como objetivo exponer diferentes métodos para estimar la vida útil de las mismas, además de plantear un modelo de gestión de un sistema híbrido en la ciudad de Zaragoza.

Lo primero que se describe es en qué consiste la energía solar fotovoltaica. También es necesario explicar cómo funciona un sistema de energía solar fotovoltaica y cuáles son los componentes que la forman. Entre ellos destacan las células fotovoltaicas, las baterías, el regulador de carga y el inversor de corriente. Entre esos componentes se hace especial hincapié en las baterías de acumulación, elemento analizado de manera exhaustiva en este trabajo. Para ello se enumeran y explican los parámetros y las características de operación de las baterías en sistemas fotovoltaicos. Muchos de esos parámetros y características de operación están directamente o indirectamente relacionados entre sí, y tienen influencia sobre la vida de las mismas.

La vida útil de las baterías es el tiempo en el cual pueden dar servicio al consumo sin que sus prestaciones bajen más de un valor determinado. Generalmente se toma el valor límite como el 80% de la capacidad de la batería en comparación con la capacidad nominal. Poder conocer la vida útil es una de las mayores dificultades a la hora de analizar los sistemas fotovoltaicos, pero obtener ese dato es de gran importancia. Para estimar la vida útil, lo primero es saber obtener el estado de carga o SOC de las baterías. En el trabajo se cuentan cuatro métodos de estimación del SOC, basados en los artículos y trabajos [23], [28] y [31]. El método de conteo de Coulomb calcula el SOC acumulando la carga transferida o cedida en la batería al SOC inicial. El método del voltaje convierte la lectura de la tensión de la batería al valor equivalente del SOC utilizando la curva de carga y descarga. El algoritmo de Kalman es una técnica de estimación de estado basada en modelos que emplea un mecanismo de corrección de errores para proporcionar predicciones en tiempo real del SOC. El método de la densidad del electrolito permite relacionar la densidad de manera directa con el SOC, aunque a veces es necesario utilizar un término de corrección de temperatura.

A continuación, se aborda el problema de la estimación de la vida útil de estos componentes. Para ello se analizan dos métodos diferentes para poder calcular el tiempo de vida útil.

El primer método consiste en observar que el producto del número de ciclos hasta el fallo por la profundidad de descarga o DOD es constante. Por lo tanto, en las mismas condiciones en las que se han obtenido esos datos es posible estimar la vida útil

de la batería. Se traslada ese producto a términos de energía (Wh) para un mejor manejo de los datos. Se puede relacionar las diferentes combinaciones de ciclos de carga y descarga de la batería y estimar el porcentaje de vida consumida por esos ciclos. Para desarrollar esta teoría se han analizado diferentes baterías con los datos de sus hojas de características. Con la ayuda de Excel se ha podido verificar el método y se han realizado varios ejemplos, entre los cuales uno se expone en el trabajo.

El segundo método es el Rainflow cycle counting. Para desarrollarlo se han tenido en cuenta diferentes artículos, tales como [32], [33] y [34]. Este método se utiliza para analizar los datos de fatiga de diferentes materiales. En el caso de las baterías, se obtiene el número de ciclos hasta el fallo en la batería ensayada en función del DOD y del índice de carga. A partir de esta primera aproximación se ha desarrollado un modelo de estimación de vida útil de las baterías. Este modelo consiste en hallar el número de ciclos hasta el fallo corregidos, y a partir de esos valores obtener la degradación de la batería con cada ciclo experimentado. Con la suma de la degradación de cada ciclo se puede obtener la vida que se ha consumido de la batería.

Después de haber estudiado y explicado con detalle las baterías fotovoltaicas, se analiza un caso concreto de gestión de un sistema fotovoltaico. El sistema está situado en la ciudad de Zaragoza y se utilizan los datos de demanda y producción del año 2016 en esta región. Se narran los diferentes tipos de gestión utilizados, todos ellos son sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. También se tienen en cuenta diferentes tamaños de baterías de acumulación con un mismo sistema de gestión. Este apartado tiene como finalidad ver cómo evolucionan y varían los resultados obtenidos en un ejemplo concreto. Los resultados conseguidos se basan en el porcentaje de autoconsumo utilizado, el precio del sistema, la reducción de la vida útil de la batería, etc. Para realizar este estudio se ha utilizado el método de  $N_{\text{ciclos}} \cdot \text{DOD}$  para estimar la vida útil de las baterías explicada anteriormente. Para poder llevar a cabo el estudio se ha utilizado el programa Excel. En él se ha analizado hora a hora a lo largo de todo el año 2016 la producción y demanda de electricidad y el estado de carga de la batería principalmente. Para poder obtener estos datos es necesario conseguir datos intermedios como la carga o descarga de la batería, DOD mínimo, etc.

Por último, se exponen las conclusiones del trabajo. Se han tratado de desarrollar dos métodos teóricos para estimar la vida útil de las baterías. Uno de ellos se explica en el trabajo ya que su resultado ha sido satisfactorio, al contrario que el método mediante las series de Fourier. Se ha demostrado que el método  $N_{\text{ciclos}} \cdot \text{DOD}$  es válido para las mismas condiciones en las que se han obtenido los valores que aparecen en la hoja de características proporcionada por el fabricante. Además, se exponen las conclusiones obtenidas del análisis de los diferentes sistemas de gestión utilizados en el caso de estudio anteriormente comentado. Se analizan también la importancia y la conexión entre los diferentes parámetros de las baterías.

## **2. Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable que aprovecha la luz solar. Transforma de manera directa la luz del sol en electricidad, utilizando para ello una tecnología basada en el efecto fotovoltaico. El elemento principal de esta tecnología son las placas fotovoltaicas que están formadas por células fotovoltaicas. Al incidir la radiación del sol en dichas células se crea una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras. Debido a este potencial generado, los electrones son capaces de saltar de un lugar a otro creando corriente eléctrica.

### **2.1. Historia**

En el año 1954 fue desarrollado el primer panel solar fotovoltaico. Fue un proyecto de la NASA con el propósito de poder alimentar de manera autónoma los equipos de comunicaciones de los satélites. En la década de los 70 se desarrolló, también en la NASA, el primer panel fotovoltaico para uso en aplicaciones terrestres. A partir de ese momento se inició la fabricación a nivel industrial de módulos fotovoltaicos. Se desarrolló esta tecnología para abordar diferentes problemas, tales como proporcionar energía eléctrica a viviendas aisladas, sistemas de regadío o señalización marítima. En la actualidad la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una alternativa firme al empleo de combustibles fósiles para generación de energía. Es una fuente de energía inagotable que no contamina, por lo cual contribuye al desarrollo sostenible del planeta. Según diferentes estudios la energía solar se convertirá en la fuente de electricidad más barata en muchos lugares del planeta en los próximos quince años. Esto es debido a que con el desarrollo de esta tecnología se espera reducir los costes de producción. Se requiere de una alta inversión inicial, pero una vez instalado el sistema fotovoltaico solo genera pequeños gastos de operación, lo que implica un coste muy bajo en la producción de electricidad. Desde la década de los 80, los paneles para generar electricidad a partir del sol han ido abaratándose un 10% por año. Una tendencia que capacitaría a esta tecnología para atender en 2027 el 20% de las necesidades energéticas globales. Por todo lo anteriormente comentado se puede decir que la energía solar fotovoltaica tendrá una gran importancia en el futuro e incluso que ya la tiene en el presente.

### **2.2. Componentes de un sistema fotovoltaico**

Los sistemas de generación de energía fotovoltaica constan de varios componentes esenciales:

- Generador fotovoltaico
- Sistema de baterías de acumulación
- Regulador de carga
- Inversor

También forman parte del sistema el cableado entre componentes y sus elementos de seguridad correspondientes. Entre ellos se encuentra el propio conductor, los interruptores, los diferenciales, las puestas a tierra, etc.

## Generador fotovoltaico

El generador fotovoltaico o panel fotovoltaico se encarga de transformar la energía proveniente del sol en energía eléctrica. Está constituido por uno o varios módulos fotovoltaicos conectados en serie, en paralelo o en serie y paralelo. Cada uno de esos módulos se forma con la unión de células fotovoltaicas. Como se ha comentado anteriormente, son las células fotovoltaicas las que se encargan de la transformación de la luz del sol en electricidad.

Se basa en la teoría de los semiconductores, en la posibilidad de generar un par electrón-hueco que después se recombina a través de la absorción de fotones. Para conseguir energía eléctrica se necesita fabricar una unión pn, es decir, fabricar un semiconductor en el que una parte de él sea de tipo n y otra de tipo p. Los semiconductores tipo n tienden a ceder electrones y los de tipo p a recibirlos. Con esta configuración de la célula fotovoltaica, cuando la luz del sol irradia sobre ella se genera un electrón-hueco en la zona tipo n, es decir se desprende un electrón. Ese electrón liberado se recibe y se recombina en la zona p, creando así un movimiento de electrones que produce energía eléctrica.

Los parámetros más relevantes de las células fotovoltaicas son la intensidad de cortocircuito, la tensión en circuito abierto y la potencia pico. La intensidad de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) se define como el máximo valor de corriente que puede circular por la célula fotovoltaica, que coincide con la corriente que circula a tensión cero por la misma. La tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ) es la tensión máxima que puede haber entre los bornes de la célula fotovoltaica. Por último, la potencia pico ( $W_p$ ) es la potencia máxima que puede generar a  $25^{\circ}\text{C}$  y con una irradiancia de  $1000\text{ W/m}^2$ .

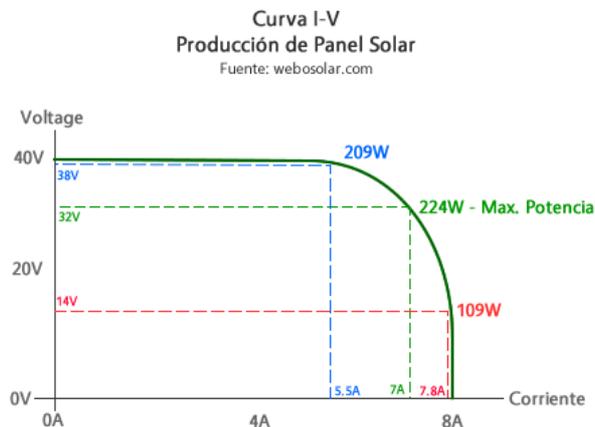


Figura 1. Gráfico de la curva I-V de la producción de un panel fotovoltaico.

## Baterías de acumulación

Debido a que este tipo de energía es muy variable, ya que necesita la luz del sol, es necesario poder acumular energía para utilizarla más adelante. Principalmente se acumula la energía en horas de sol, por el día, para poder abastecer el consumo nocturno, en ausencia de sol y de generación de energía. Para almacenar o acumular esa

energía se diseñan las baterías. Si el diseño de las baterías es correcto garantizan un suministro estable de energía, ya que son capaces de suministrar picos de demanda elevados, además de suministrar energía durante un periodo prolongado de tiempo independientemente de la generación de energía en ese momento. Existen muchos tipos de baterías, como puede ser de plomo ácido, de Níquel-Cadmio o de gel. En este documento se han tenido en cuenta las baterías de plomo ácido.

## **Regulador de carga**

El regulador de carga se coloca entre los paneles fotovoltaicos y las baterías de acumulación. Este componente se encarga de realizar el proceso óptimo de carga y descarga de la batería para conseguir alargar su vida útil. Para ello este componente limita la descarga de la batería de tal forma que no sobrepase un valor determinado y puede cortar el suministro a los consumos si es necesario. En el proceso de carga el regulador controla que no se generen sobrecargas ni se produzcan gases incontrolados que afectan a la vida de la batería. Antes de llegar a la sobrecarga el regulador pone el generador fotovoltaico en circuito abierto para evitar que llegue excesiva corriente a las baterías. Desconecta los consumos de la batería cuando el estado de carga de la misma ha superado el nivel mínimo permitido. Tienen la opción de establecer un control de consumos prioritarios. A pesar de suponer alrededor del 5% de la inversión del sistema fotovoltaico, debido a su gran influencia en las baterías su valor es más importante, puede influir entre un 20% y un 30% del coste total por la sustitución prematura de las baterías de acumulación. El regulador de carga está muy relacionado con la vida útil de la batería y con el buen funcionamiento del sistema fotovoltaico.

Los parámetros principales de un regulador de carga son la tensión nominal y la intensidad máxima de trabajo. La intensidad máxima de trabajo es la máxima corriente que puede pasar del sistema de regulación al consumo durante el proceso de descarga o la máxima corriente que admite el regulador desde los paneles fotovoltaicos.

## **Inversor**

El inversor es un dispositivo electrónico que se encarga de transformar energía eléctrica de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) y viceversa. La electricidad generada en los paneles fotovoltaicos es de DC y la mayoría de los consumos a abastecer son en AC. Se pueden conectar directamente a la red o a las baterías de acumulación, según las necesidades del sistema. Además, pueden modular la onda alterna de salida y regular el valor eficaz de la tensión de salida. Se clasifican en función de la forma de la onda de la tensión de salida, que puede ser cuadrada, modificada o senoidal.

### 3. Baterías de acumulación

Como se ha comentado anteriormente, en la mayoría de los sistemas fotovoltaicos se utilizan las baterías, que son las encargadas de almacenar la energía para su posterior uso. Esto es debido a la variabilidad de la energía solar, que fluctúa constantemente debido a las horas de sol y de ausencia de él. Es un elemento indispensable en sistemas fotovoltaicos autónomos para poder dar abasto al consumo cuando no hay generación de energía solar.

#### 3.1. Parámetros de las baterías

En este apartado se explican los diferentes parámetros y características de operación de las baterías de acumulación. Son los valores que determinan las propiedades y el funcionamiento de las mismas.

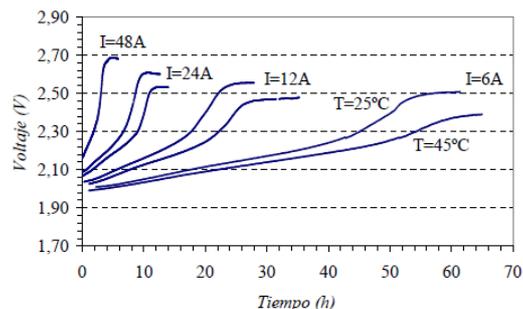
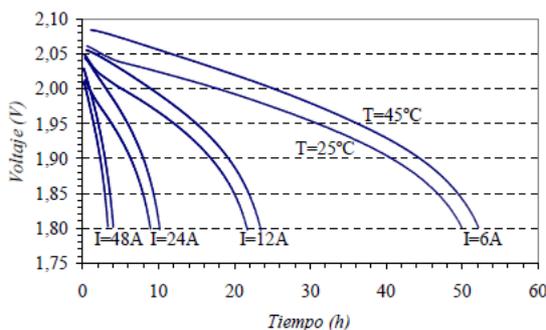
##### Tensión de vacío:

Se denomina tensión de vacío a la tensión que tiene la batería entre sus terminales cuando se encuentra en circuito abierto. El valor depende de la naturaleza y concentración del electrolito, de los electrodos, de la temperatura de trabajo y del estado de carga de la propia batería. La tensión de vacío se mide en voltios (V).

##### Tensión de la batería:

La tensión de la batería es la diferencia de potencial entre sus bornes en circuito cerrado, ya sea en carga o descarga de la misma. Su unidad de medida son los voltios (V). Si la batería está en un proceso de carga la tensión aumenta con respecto a la tensión de circuito abierto, al contrario que en el proceso de descarga donde la tensión es menor. Durante la descarga de la batería se producen unas reacciones electroquímicas que disminuyen tanto el potencial del electrodo negativo como el del positivo, haciendo que disminuya la tensión de la celda al acercarse el valor de ambos potenciales. En los procesos de carga ocurre lo contrario y aumenta el potencial de la celda.

El valor de la tensión de la batería en los procesos de carga y descarga viene muy influenciado por la densidad de corriente que circula por la misma. A mayor régimen de corriente en ambos procesos la tensión de la batería varía más rápido, aumentando la tensión en la carga y disminuyéndola en la descarga. Este efecto se puede observar en las Figuras 2 y 3.



Figuras 2 y 3. Influencia del régimen de corriente en la tensión de carga.

## Capacidad

La capacidad de un batería es la cantidad de electricidad que puede suministrar o almacenar. Se mide en amperios-hora (Ah) y viene definida como la integral de la corriente a lo largo de un tiempo determinado como se puede ver en la siguiente fórmula.

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i \, \delta t$$

Los términos más empleados de la capacidad son los siguientes:

- Capacidad nominal: Se le denomina a la cantidad de corriente que puede suministrar una batería durante una descarga desde plena carga hasta una tensión de descarga determinada. Todo ello a una temperatura fijada, en un tiempo específico y con una tensión de corte determinada.

- Capacidad real: Es la cantidad de corriente que puede suministrar la batería desde plena carga hasta la tensión de descarga de la capacidad nominal, pero con las condiciones de funcionamiento diferentes. La capacidad real puede ser mayor o menor que la nominal, dependiendo de las condiciones de trabajo.

- Capacidad disponible: Se le denomina a la capacidad que puede entregar una batería hasta alcanzar una tensión de finalización de carga no normalizada que va fijada por una aplicación específica.

## Profundidad de descarga

La profundidad de descarga o DOD (Depth of Discharge) es la relación entre la capacidad entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Por definición la profundidad de descarga y el estado de carga o SOC (State of Charge) suman el 100%.

$$DOD(\%) = 100 - SOC$$

La profundidad de descarga disponible es el máximo porcentaje de la capacidad a plena carga que se puede utilizar. La DOD disponible depende de la tensión de corte y del régimen de descarga. Dependiendo del tipo de batería de acumulación utilizada y su uso, el DOD que se puede utilizar varía desde el 15% hasta el 85%. La profundidad de descarga disponible viene relacionada con la autonomía de la batería, a mayor DOD disponible mayor autonomía de la misma. Esta característica tiene una gran importancia en sistemas de energía solar aislados.

## Estado de carga

El estado de carga de una batería o SOC (State of Charge) se define como la cantidad de energía disponible en la misma, expresada en porcentaje (%). Es la relación entre la cantidad de energía disponible y la energía almacenada en una batería completamente cargada. El proceso de descarga de la batería da lugar a una disminución del SOC, mientras que el proceso de carga aumenta el SOC de la misma.

## **SOH estado de salud**

Se calcula el estado de salud o SOH (State of Health) comparando el estado actual de la batería con sus condiciones iniciales. En el momento de fabricación de la batería, si cumple las especificaciones requeridas, tiene una SOH del 100%. A medida que pasa el tiempo y la batería es utilizada el SOH va disminuyendo. Este parámetro cuantifica el grado de degradación y el envejecimiento de las baterías. Los principales causantes del envejecimiento son la degradación de las placas, la sulfatación, la estratificación y la autodescarga.

- Degradación de placas positivas: Este fenómeno ocurre debido a los procesos cíclicos de carga y descarga de las baterías fotovoltaicas. Los materiales se contraen y dilatan también de manera cíclica y con el tiempo se reduce la adhesión del material activo en la rejilla, provocando su desprendimiento. A este proceso se le denomina degradación.

- Sulfatación: Se da la sulfatación cuando una batería permanece mucho tiempo con poca carga o cuando no se recarga completamente de manera asidua. En estos casos se pierde materia activa dentro de la batería debido al proceso de recristalización. Se forman cristales de sulfato de plomo de gran tamaño que en la siguiente carga no se pueden deshacer, aumentando así la resistencia interna y disminuyendo la capacidad.

- Estratificación: Cuando una batería permanece cierto tiempo inactiva, debido a la gravedad, la densidad del electrolito aumenta en la parte de abajo de la misma creando un gradiente de densidad. Para evitar este problema se suele agitar el electrolito en las baterías de plomo-acido.

- Autodescarga: Se le denomina a la pérdida de capacidad de una batería mientras se encuentra en circuito abierto. Cuando una batería no tiene consumo va perdiendo poco a poco algo de capacidad, proceso que se llama de autodescarga. Se expresa en términos de la relación entre la pérdida de capacidad en un periodo de un mes y la capacidad nominal en porcentaje (%).

## **Vida útil**

La vida útil de una batería se define como el tiempo en el cual la batería puede dar servicio sin que sus características y prestaciones bajen más de un valor determinado. Generalmente se dice que una batería sigue siendo útil si puede dar al consumo una capacidad del 80% comparada con la nominal, a valores menores que ese se puede decir que la batería ya no está dentro del periodo de su vida útil. Poder estimar la vida útil de las baterías es un gran reto hoy en día debido al gran número de variables que le afectan. La vida útil depende en gran manera de las condiciones de funcionamiento de la batería, el DOD, la temperatura y los regímenes de carga y descarga, así como del estado medio de carga de la batería. También tiene influencia los materiales y elementos constructivos de cada batería de acumulación.

La temperatura de trabajo es un factor muy importante a la hora de estimar la vida útil. A mayor temperatura se dan más reacciones químicas en el interior de la celda y disminuye el tiempo de vida. Por el contrario, trabajar a bajas temperaturas aumenta la vida útil pero disminuye la capacidad de la batería.

Dependiendo de la profundidad de descarga en los ciclos de la batería, ésta será capaz de aguantar un mayor o menor tiempo proporcionando energía al consumo. Descargas demasiado profundas provocan la pérdida de material activo dentro de la

celda y se reduce la vida útil de la batería. Por el contrario, a bajo DOD en sus ciclos es capaz de vivir más tiempo. En sistemas fotovoltaicos cuanto más autonomía tiene la batería, menor es la profundidad de descarga diaria sufrida por la batería y por tanto mayor su vida útil. Para conseguir esa mayor autonomía es necesario aumentar la capacidad de la batería y eso conlleva un aumento considerable del coste inicial del sistema.

La sobrecarga de la batería produce un gaseo mayor del recomendable y se pierde parte del electrolito situado en la celda. El gaseo aumenta la erosión de la materia activa de las placas y reduce la vida de la batería. Además, durante la sobrecarga se produce un mayor calentamiento de la celda provocando una mayor corrosión que conlleva una disminución de la vida útil de la batería.

Por último, un correcto o incorrecto mantenimiento de toda la instalación, incluida la batería, afecta a la vida útil de la misma. Mediante un buen mantenimiento se pueden controlar el nivel de electrolito y su concentración, disminuyendo la corrosión. Con un regulador de carga se pueden evitar las sobrecargas o ciclos con una profundidad de descarga demasiado elevada.

### **Rendimiento energético**

Se define rendimiento energético de una batería como la relación entre la energía obtenida durante un proceso de descarga con respecto a la energía necesaria suministrarle para volver a su estado de plena carga. Numéricamente se obtiene como el producto del rendimiento de voltaje y el rendimiento de carga. Generalmente el rendimiento energético de una batería es mayor cuando el estado de carga es bajo y va disminuyendo al acercarse a plena carga. Se expresa en porcentaje (%).

El rendimiento de voltaje se define como la relación entre la tensión durante el proceso de descarga y la tensión durante la carga. Viene influenciado por los regímenes de carga y descarga y por la temperatura de trabajo.

El rendimiento de carga se define como la relación entre la capacidad durante el proceso de carga y el de descarga. No es fácil determinar el rendimiento de carga en sistemas fotovoltaicos, pero suelen tomar un valor de alrededor del 90%. A bajos estados de carga el rendimiento es más alto que en estado de plena carga debido al gaseo y al calentamiento interno de la batería.

## **4. Estimación del estado de carga**

Como se ha comentado anteriormente el estado de carga (SOC) se define como la capacidad disponible expresada como un porcentaje de su capacidad nominal. La determinación del SOC de las baterías es una tarea muy complicada que depende de muchas variables. Tienen una gran influencia el tipo de batería y la aplicación para la que se utiliza, además de los regímenes de carga, temperatura y demás parámetros.

La estimación precisa del SOC es una tarea primordial en los sistemas de gestión de la batería, ya que ayuda a mejorar su rendimiento y a alargar la vida de la propia batería. Por ello, en los últimos años se han realizado muchas investigaciones y trabajos de desarrollo para determinar el SOC de las baterías. Determinando correctamente este parámetro se puede gestionar el sistema de una manera más eficaz, evitando sobrecargas y descargas demasiado elevadas que pueden causar daños permanentes en la batería. Sin embargo, los procesos de carga y descarga de la batería implican procesos físicos y químicos complejos que dificultan la determinación del SOC con precisión. Esta estimación es compleja y costosa debido al alto número de variables que le afectan.

Se han analizado cuatro métodos diferentes para la determinación del SOC. En los próximos puntos se exponen esos métodos.

### **4.1. Método de conteo de Coulomb**

El método de conteo de Coulomb es la técnica más utilizada para determinar el SOC de una batería. También se le conoce como recuento de amperios hora e integración de corriente. Es necesario realizar lecturas de corriente en la batería, concretamente la corriente cedida o absorbida y la corriente consumida por las pérdidas en la misma. Con estos datos se puede calcular el SOC de la siguiente manera:

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_1} (I_b - I_{loss}) \delta t$$

Siendo  $SOC(t_0)$  el estado de carga inicial,  $C_{rated}$  la capacidad nominal,  $I_b$  la corriente de la batería y  $I_{loss}$  la corriente debido a las pérdidas en el proceso.

Este método calcula el SOC acumulando la carga transferida o cedida en la batería a la carga que tenía en el SOC inicial. La precisión de este método se basa principalmente en una medición precisa de la corriente de la batería y una estimación precisa del SOC inicial. Con una capacidad conocida, que podría ser memorizada o estimada inicialmente por las condiciones de operación, el SOC de una batería puede calcularse integrando las corrientes de carga y descarga durante los períodos de operación. Pero hay que tener en cuenta las pérdidas en el proceso, la más importante de ellas es la autodescarga. Por tanto, cuanto mejor se precise la corriente de pérdidas mayor precisión tendrá la estimación del SOC de la batería.

## 4.2. Método de voltaje

Este método utiliza una curva de descarga conocida que relaciona la tensión de la batería frente al SOC de la misma. A modo de ejemplo, se puede observar la Figura 4.

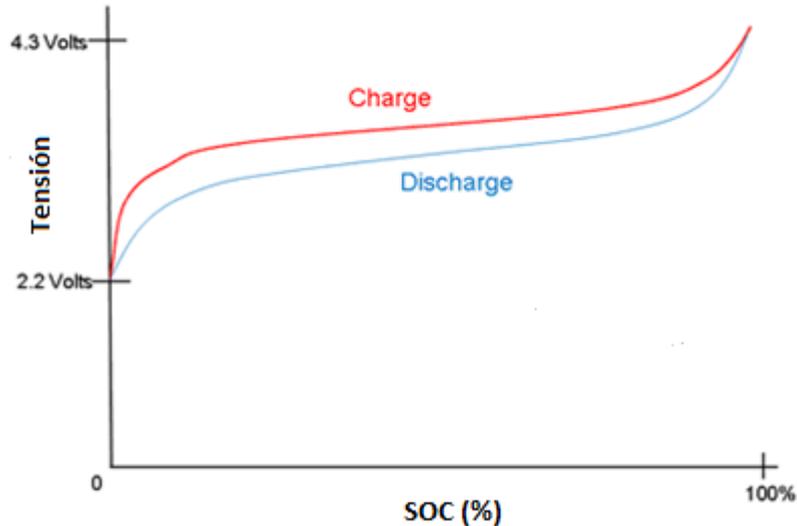


Figura 4. Perfil de carga y descarga.

El método del voltaje convierte la lectura de la tensión de la batería al valor equivalente del SOC utilizando la curva de descarga. Es necesario saber si está en un proceso de carga o de descarga porque no sigue la misma línea de la tensión en ambos casos, como puede observarse en la figura anterior. En los procesos de carga la tensión de la batería aumenta y en los de descarga disminuye. Sin embargo, la tensión de la batería se ve más significativamente afectada por la corriente de la batería debido a la temperatura y la cinética electroquímica de la batería. Para hacer este método más preciso se utiliza un término de corrección que relaciona la tensión con la intensidad y la temperatura. La necesidad de un rango estable de tensión para las baterías hace que el método de voltaje sea difícil de implementar y por ello no es muy utilizado.

## 4.3. Método de filtro de Kalman

Los filtros de Kalman se introdujeron en 1960 para proporcionar una solución recursiva al filtrado lineal óptimo para la observación del estado y los problemas de predicción. Es un método utilizado para la estimación dinámica del estado del sistema de estudio. Se compone de un conjunto recursivo de ecuaciones que se evalúan de manera constante. Este método proporciona una muy buena solución al problema del cálculo del estado de carga (SOC) de las baterías de acumulación.

Generalmente los sistemas dinámicos generan unas salidas en función de las entradas pasadas y las actuales. Para facilitar el cálculo se crea un vector de estado donde se tienen en cuenta y se resumen todas las entradas pasadas introducidas al sistema. Por tanto, la salida del sistema actual se puede calcular a partir del vector de estado anteriormente comentado y la entrada actual.

Para poder llevar a cabo este método es necesario implementar una versión en tiempo discreto del modelo anteriormente comentado. Cuanto menor sea el intervalo de tiempo mayor precisión tendrán los datos obtenidos a través del filtro de Kalman. Se pueden tomar las siguientes ecuaciones como un modelo de estado en tiempo discreto de un sistema dinámico lineal.

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + B_k \cdot u_k + w_k \quad (\text{ec 1})$$

$$y_k = C_k \cdot x_k + D_k \cdot u_k + v_k \quad (\text{ec 2})$$

A la ecuación 1 se le denomina ecuación de estado y a la ecuación 2 ecuación de salida. Donde  $x_k$  es el vector de estado en el tiempo,  $u_k$  es la entrada del sistema y  $y_k$  la salida. Los  $w_k$  y  $v_k$  evalúan el ruido o distorsión del sistema, es decir, tienen en cuenta las entradas al sistema que no se pueden medir. Las matrices  $A_k, B_k, C_k, D_k$  determinan el sistema dinámico y pueden variar con el tiempo. En la Figura 5 se describe este sistema mediante un diagrama de bloques.

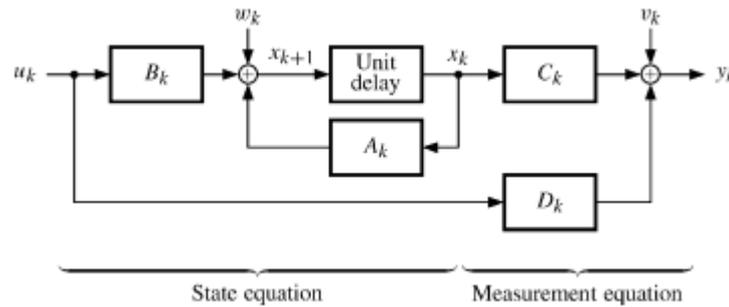


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema dinámico a estudiar.

A partir de un sistema determinado de esta manera se puede aplicar el filtro de Kalman para estimar el estado físico no medible asociado al sistema. En el análisis de las baterías de acumulación ese estado físico es el SOC de la misma. En el caso del cálculo del estado de carga las suposiciones del ruido con matrices  $w_k$  y  $u_k$  son nulas. Aplicando el método se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{State estimate time update: } \hat{x}_k^- = A_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} u_{k-1}$$

$$\text{Error covariance time update: } \Sigma_{\hat{x},k}^- = A_{k-1} \Sigma_{\hat{x},k-1}^+ A_{k-1}^T + \Sigma_w$$

$$\text{Kalman gain matrix: } L_k = \Sigma_{\hat{x},k}^- C_k^T [C_k \Sigma_{\hat{x},k}^- C_k^T + \Sigma_v]^{-1}$$

State estimate measurement update:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k [y_k - C_k \hat{x}_k^- - D_k u_k]$$

$$\text{Error covariance measurement update: } \Sigma_{\hat{x},k}^+ = (I - L_k C_k) \Sigma_{\hat{x},k}^-$$

Por tanto el mayor problema de este método es conseguir encontrar el mínimo error cuadrático  $\hat{x}_k$  para poder ser los más preciso posible en los cálculos.

Resumiendo, el filtro de Kalman proporciona automáticamente límites de error dinámicos en sus propias estimaciones de estado. Es una técnica de estimación de estado basada en modelos que emplea un mecanismo de corrección de errores para proporcionar predicciones en tiempo real del SOC. Aunque el filtrado de Kalman es un

método en línea y dinámico, necesita un modelo adecuado para la batería y una identificación precisa de sus parámetros. Es capaz de estimar el SOC únicamente con las mediciones de entrada actuales, el estado calculado previamente y su matriz de incertidumbre, no requiere ninguna otra información adicional.

#### **4.4. Método de densidad del electrolito**

La densidad del electrolito está directamente relacionada con el estado de carga de la batería dependiendo de la temperatura y de la concentración del electrolito en el diseño. Este método consiste en, si se puede acceder al electrolito, medir su densidad y relacionarlo con el SOC de manera directa. Durante el proceso de descarga disminuye la concentración del electrolito y durante la carga aumenta. Utilizando los datos del fabricante se relaciona la densidad medida con el SOC de la batería. En algunos casos es necesario la utilización del término de corrección de temperatura para conseguir unos valores más precisos.

## 5. Estimación de la vida útil

Como se ha comentado anteriormente la estimación de la vida útil de las baterías es un proceso complejo pero muy importante. Tiene una gran influencia en el dimensionado y elección de las baterías de los sistemas fotovoltaicos. Las baterías, económicamente tienen una gran importancia en estos sistemas, por lo que un correcto dimensionado y una correcta estimación de su vida útil son imprescindibles. A continuación, se van a explicar varios métodos de estimación de la vida útil de las baterías para sistemas fotovoltaicos. Tienen diferentes grados de exactitud y se pueden utilizar en circunstancias concretas. Esto se debe al gran número de variables que afectan a la vida útil de las mismas, como puede ser la temperatura, el DOD o los regímenes de carga y descarga. Se trata de técnicas que se utilizan actualmente o que se están desarrollando para poder aplicarlas en el futuro.

### 5.1. Nciclos\*DOD

Como se ha comentado anteriormente estimar la vida útil de las baterías es un proceso complejo pero de gran importancia. En el siguiente apartado se va a analizar la vida útil de las baterías en función del número de ciclos que son capaces de aguantar con las prestaciones mínimas requeridas.

En la hoja de características de las baterías de acumulación fotovoltaica aparecen diferentes datos y gráficas. Suelen aparecer los parámetros comentados en anteriores apartados como la tensión o la capacidad, además de características dimensionales de la batería. A partir de los datos que da el fabricante se ha propuesto analizar la vida útil de las baterías, sin la necesidad de hacer ningún experimento físico. El resultado ha sido satisfactorio, aunque su utilidad se reduce a unas situaciones de carga y descarga concretas y definidas.

El análisis se ha basado en la gráfica que relaciona el número de ciclos de la batería en función de su profundidad de descarga, como la que se puede observar en la figura 6. Si se analizan únicamente estos dos factores, sin tener en cuenta el régimen de carga o la temperatura, se puede obtener un modelo de la vida útil de la batería. Es decir, se puede saber la vida útil de la batería en un entorno similar al que se ha utilizado para obtener los datos anteriormente comentados. Para ello es necesario relacionar los ciclos a un determinado DOD con la capacidad o energía que ceden o admiten.

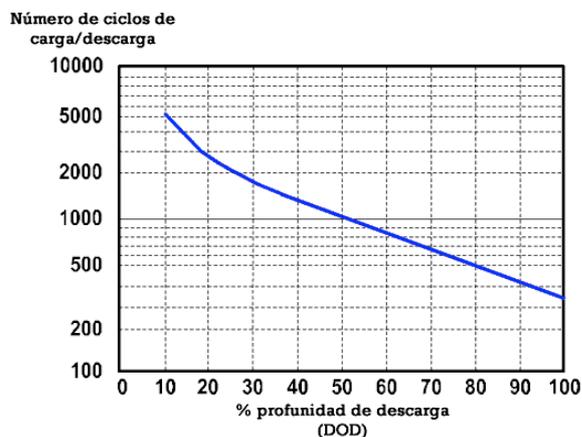


Figura 6. Gráfica de ciclos de carga vs DOD.

Habiendo analizado diferentes hojas de características de varias baterías, se ha observado que el producto del DOD y el número de ciclos correspondiente se mantienen prácticamente constantes durante el rango de DOD proporcionado por el fabricante. Este resultado se puede observar en las Figuras 7 y 8.

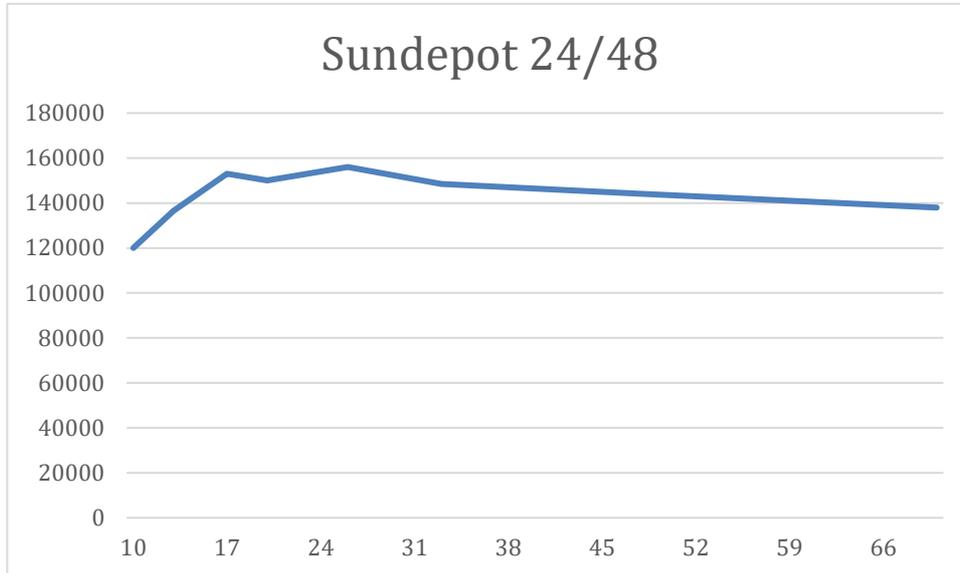


Figura 7. Nciclos\*DOD de una batería Sundepot 24/48.

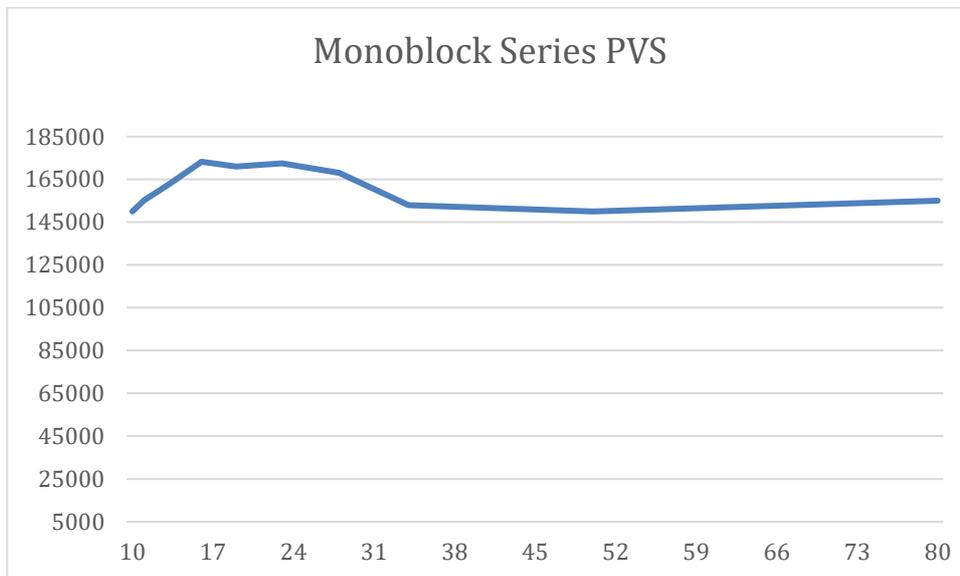


Figura 8. Nciclos\*DOD de una batería Monoblock PVS.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado se observa que la energía o capacidad total cedida y absorbida por la batería durante su vida útil es la misma, siendo indiferente la profundidad de descarga de sus ciclos. Es decir, la vida útil de la batería expresada en términos de energía se puede hallar de las gráficas que relacionan el número de ciclos y el DOD. Cogiendo cualquier valor de esa gráfica se obtiene la máxima energía intercambiable durante su vida útil de la siguiente manera:

$$E_{\max int} = E_{bat} \cdot N_{ciclos} \cdot DOD \cdot 2$$

Siendo  $E_{\max \text{ int}}$  la máxima energía intercambiable durante su vida útil,  $E_{\text{bat}}$  la energía máxima capaz de almacenar en la batería y  $N_{\text{ciclos}}$  los ciclos admisibles a un DOD determinado.

Se halla la energía que utiliza en una batería durante su vida útil utilizando un valor de número de ciclos y DOD. Como el producto del número de ciclos y el DOD es constante, se puede extrapolar el resultado a todas las combinaciones de número de ciclos y DOD. Es decir, solo contando la energía que cede o admite la batería podemos decir en qué estado de salud se encuentra la batería. Se utilizan las siguientes ecuaciones para obtener los cálculos correspondientes.

$$\% \text{ Reducción vida útil} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\text{ciclos}_i} \cdot 2 \cdot DOD_i \cdot E_{\text{bat}}}{E_{\max \text{ int}}}$$

$$\% \text{ Vida útil restante} = 100 - \% \text{ Reducción vida útil}$$

Para comprender mejor el resultado de esta teoría se analiza un ejemplo concreto. Para ello se utiliza una batería de la gama PowerSafe TS, que ofrece soluciones de alto rendimiento y larga vida útil para aplicaciones de la energía renovable. Este tipo de celdas se basan en una tecnología convencional diseñada en especial para instalaciones de energía solar, garantizando un suministro eléctrico continuo durante las horas de oscuridad o periodos con poca luz solar.

De la hoja de característica de esta gama de baterías se puede obtener el siguiente gráfico que aparece en la Figura 9.

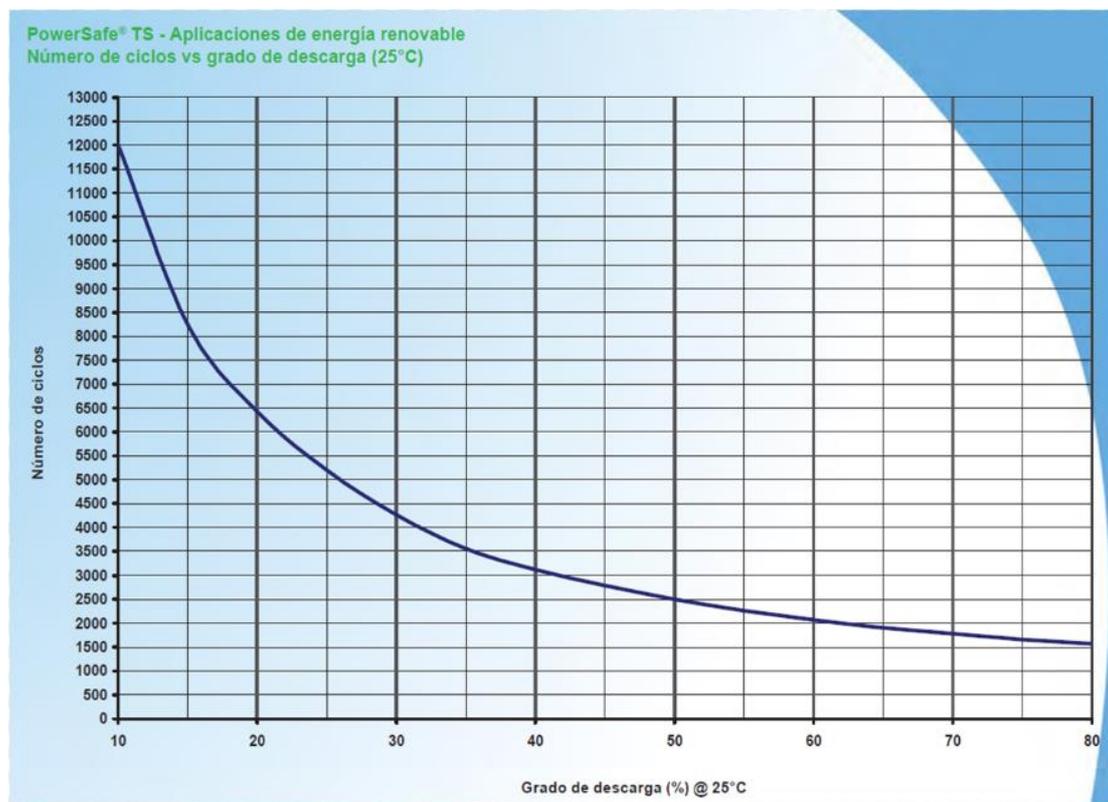


Figura 9. Ciclos de vida útil de una batería PowerSafe.

Se puede observar que a mayor profundidad de descarga la batería aguanta un menor número de ciclos. No aparecen datos más allá del 80% de DOD, debido a que ese es el límite de la máxima descarga sin afectar a la vida útil de esta batería. Analizando este tipo de gráficos se puede llegar a la conclusión de que el producto del DOD y el número de ciclos se mantiene prácticamente constante a lo largo de todas las profundidades de descarga admitidas por el fabricante.

N ciclos	DOD	Nciclos*DOD
12000	10	120000
11500	10,5	120750
11000	11	121000
10500	12	126000
10000	12,5	125000
9500	13	123500
9000	14	126000
8500	14,5	123250
8000	15,5	124000
7500	16,5	123750
7000	18	126000
6500	19,5	126750
6000	21,5	129000
5500	23,5	129250
5000	25,5	127500
4500	28,5	128250
4000	32	128000
3500	35	122500
3000	41,5	124500
2500	50	125000
2000	61	122000
1500	82	123000

Tabla 1. Nciclos\*DOD

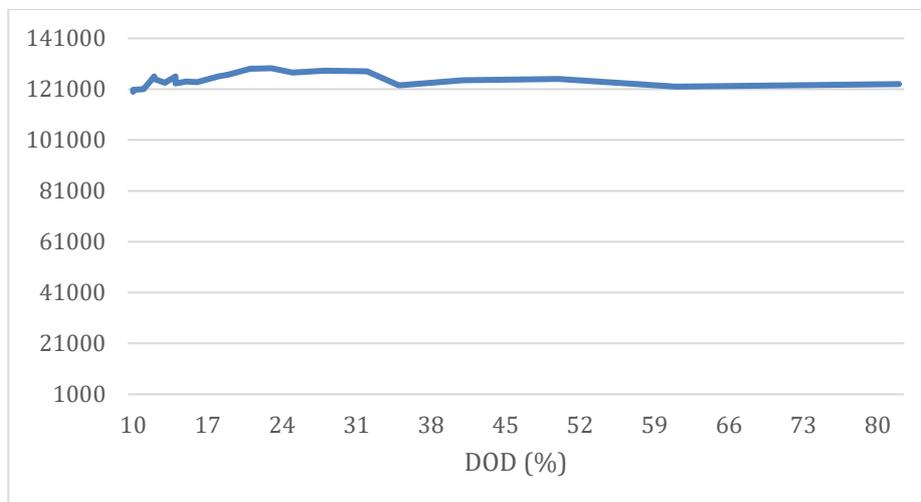


Figura 10. Relación número de ciclos y profundidad de descarga.

Se puede decir que la energía que admite o cede en total en sus cargas y descargas dentro de los límites del DOD es constante.

A partir de la energía de la batería se puede obtener del valor de la vida útil también en términos de energía. En este caso concreto la batería es de 6600 Wh. Tomando el valor de la tabla del 10% de DOD y 12000 ciclos se obtiene:

$$E_{\max int}(Wh) = 12000 \cdot 2 \cdot 0.1 \cdot 6600 = 15840000$$

Por tanto, esta batería estará dentro de su vida útil hasta que en los procesos de carga y descarga ceda o admita un total de 15840000 Wh. Se pueden realizar infinitas combinaciones de número de ciclos a un DOD concretos y estimar su grado de estado de vida de la batería.

Si esta batería ha realizado 500 ciclos al 10% de DOD, 200 al 20% y 100 al 50% en las mismas condiciones en las que se han obtenido los datos de la hoja de características se puede estimar la vida útil de la batería que se ha gastado y la que le queda. Se analizan estos datos en las Tablas 2 y 3 obteniendo como resultado un 11.67% de reducción de vida útil durante esos ciclos ya comentados.

$$\begin{aligned} \% \text{ Reducción vida útil} &= \\ &= \frac{500 \cdot 0.1 \cdot 2 \cdot 6600 + 200 \cdot 0.2 \cdot 2 \cdot 6600 + 100 \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 6600}{15840000} = 11.67 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Vida útil restante} = 100 - \% \text{ Reducción vida útil} = 88.33$$

Numero ciclos	DOD (%)	Energía (Wh)
500	10%	660000
200	20%	528000
100	50%	660000
TOTAL		1848000

Energía batería	6600 Wh
Vida útil (energía)	15840000 Wh
Energía gastada	1848000 Wh
% Reducción de vida útil	11,67%
% Vida útil restante	88,33%

Tablas 2 y 3. Resumen del ejemplo.

## 5.2. Rainflow cycle counting

Es complicado realizar o estimar modelos de vida útil de las baterías. El mecanismo de disminución de la capacidad es lo más complicado de estimar debido a la no linealidad de muchos procesos de envejecimiento de las baterías. Se han desarrollado diferentes modelos de estimación de la vida útil de las baterías y en este apartado se va a explicar el modelo Rainflow cycle counting.

Según diferentes estudios se ha mostrado que este modelo es bastante preciso y por ello ya se ha utilizado en varias aplicaciones de estimación de vida útil de la batería. Este método tiene en cuenta la profundidad de descarga y el índice de carga.

El Rainflow cycle counting se utiliza para analizar los datos de fatiga de diferentes materiales, y se usó por primera vez para analizar la fatiga en metales. En el caso de las baterías se analizan y se extraen los ciclos de carga y descarga irregulares que experimentan durante su uso. Mediante la simulación de carga y descarga de las baterías se obtiene una matriz de DOD que se utiliza como entradas del algoritmo.

El proceso de Rainflow cycle counting se puede explicar en tres pasos consecutivos:

1. Los datos de variación del DOD de la batería son pre-procesados. Para ello se buscan los puntos de datos con polaridad inversa de tal manera que se pueden encontrar y almacenar los máximos y mínimos locales en la matriz.
2. Después de recopilar la información se obtienen los ciclos completos mediante la suma de amplitudes y duraciones de tiempo de los subciclos obtenidos.
3. Se extraen y almacenan el número de ciclos en función de la amplitud y la duración del tiempo.

Con los datos obtenidos en el apartado 3 se puede hallar el índice de capacidad de cada número de ciclos hasta el fallo utilizando la siguiente ecuación.

$$C_{rate} = \frac{3600 \cdot A}{T}$$

Donde A es la amplitud del DOD y T el periodo del ciclo.

Mediante este método experimental se obtiene el número de ciclos hasta el fallo en la batería ensayada en función del DOD y del índice de carga.

Se ha diseñado un método de análisis de la vida útil de las baterías a partir del Rainflow cycle counting. Como se ha observado en otros apartados el fabricante de baterías nos proporciona diferente información en su hoja de características. Entre ellas se encuentra un gráfico que relaciona los ciclos de vida en función de la profundidad de descarga o DOD. Con este dato se puede saber cuántos ciclos a cierto DOD es capaz de realizar la batería sin bajar en un 80% sus prestaciones. Según el artículo [32] de la bibliografía la función de los ciclos hasta el fallo (CTF: cycles to failure) sigue una función logarítmica exponencial en función del DOD.

$$CTF = f_{CD}(DOD) = a_0 + a_1 \cdot DOD^{-1} + a_2 \cdot DOD^{-2} + a_3 \cdot DOD^{-3} \quad (\text{ec } 3)$$

Siendo  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son los coeficientes de ajuste de la curva y DOD la profundidad de descarga expresada en tanto por uno.

Según varios experimentos se puede relacionar el índice de descarga con la capacidad de la batería. La capacidad disminuye al aumentar el índice de descarga, como puede observarse en la fórmula que aparece el artículo [33].

$$Capacidad = f_{CC}(C_{rate}) = b_0 + b_1 \cdot e^{\frac{C_{rate}-b_2}{b_3}} \quad (\text{ec 4})$$

Donde  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  son los coeficientes de ajuste de la curva.

En diferentes trabajos ya realizados se ha demostrado que la capacidad de las baterías es proporcional a los ciclos de vida de las mismas. Según el artículo [34] se verifica la siguiente ecuación.

$$Capacidad = f_{CTFC}(CTF) = c_0 + c_1 \cdot CTF \quad (\text{ec 5})$$

Donde  $c_0$  y  $c_1$  son los coeficientes de ajuste de curva.

Como resultado, para un ciclo de carga o descarga con el rango dado de DOD y  $C_{rate}$  (índice de carga), la función objetivo puede obtenerse combinando las anteriores ecuaciones:

$$CTF_C = f_{CD}(DOD) \cdot f_{CTFC}^{-1} \cdot f_{CC}(C_{rate}) \quad (\text{ec 6})$$

Donde  $CTF_c$  es el número de ciclos hasta el fallo corregido.

Una vez obtenido el número de ciclos hasta el fallo corregido se puede realizar un modelo de vida de la batería. Para ello se define un factor de degradación ( $\eta$ ) para cada  $CTF_c$ . Para obtener la degradación total (D) de la batería se suman los factores de degradación de cada ciclo que desarrolla la batería. Por último, suponiendo que la duración de la simulación es T, se puede estimar la vida de la batería ( $L_B$ ). A continuación se encuentran las formulas a utilizar en este modelo.

$$\eta = \frac{1}{CTF_C} \quad (\text{ec 7})$$

$$D = \sum \eta_i \quad (\text{ec 8})$$

$$Vida\ batería\ (L_B) = \frac{T}{D} \quad (\text{ec 9})$$

A continuación se explica cómo se realiza este método paso a paso. También se puede observar la Figura 11 a modo de resumen para comprender mejor el proceso a seguir.

1. Aplicación del Rainflow cycle counting y se obtiene como resultados el número de ciclo hasta el fallo (CTF) con una profundidad de descarga (DOD) e índice de carga ( $C_{rate}$ )
2. Con el dato de  $C_{rate}$  y aplicando la ecuación 4 se obtiene el valor de  $f_{CC}(C_{rate})$ .
3. Con el dato de CTF se obtiene  $f_{CTFC}(CTF)$  aplicando la ecuación 5.
4. Con el dato de  $f_{CTFC}$  se obtiene el valor de  $f_{CTFC}^{-1}$  aplicando la inversa.
5. Se obtiene  $CTF_C$  aplicando la ecuación 6.

6. Conocido el número de ciclos hasta el fallo corregido, se halla el factor de degradación usando la ecuación 7.
7. Se aplica la ecuación 8 para analizar todos los ciclos y obtener la degradación total.
8. Por último, se aplica la ecuación 9 para estimar la vida de la batería.

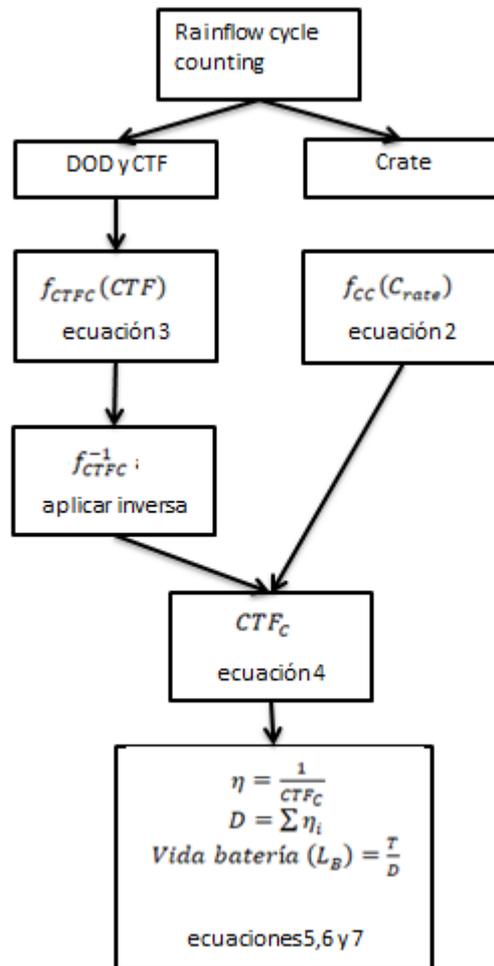


Figura 11. Esquema de la sistemática de análisis de la vida útil con el método Rainflow.

Este método tiene un problema de precisión para baterías que soportan ciclos de muy bajas profundidades de descarga. Se ha demostrado experimentalmente que los datos obtenidos con el modelo de estimación de vida útil de Rainflow cycle counting son correctos, excepto en la situación anteriormente comentada. Para baterías que experimentan pequeñas descargas superficiales no se puede utilizar este método de cálculo. Según el Rainflow cycle counting la vida de la batería sufre mucho mayor desgaste que lo que ocurre en la realidad. Por tanto, este método solo se recomienda utilizarlo en baterías que experimenten ciclos con una profundidad de descarga considerable para poder tomar como buenos los valores estimados.

## 6. Caso de estudio

### 6.1. Descripción sistema

Se ha analizado la gestión mediante un sistema híbrido para abastecer el consumo de una vivienda situada en la localidad de Zaragoza. Se ha estimado una demanda anual para una vivienda familiar de 3500 kWh. Para poder abastecer esta demanda se han elegido unas placas fotovoltaicas de 3 kWp con seguimiento a dos ejes. A la hora de obtener los resultados se han variado tanto parámetros de las baterías utilizadas como también se han utilizado métodos de gestión ligeramente diferentes.

Un sistema híbrido utiliza la energía fotovoltaica obtenida mediante los paneles fotovoltaicos y la energía suministrada por la red eléctrica. Consta de los paneles fotovoltaicos, un inversor híbrido y una batería (acumulador), además de los cables de conexión entre los diferentes elementos.

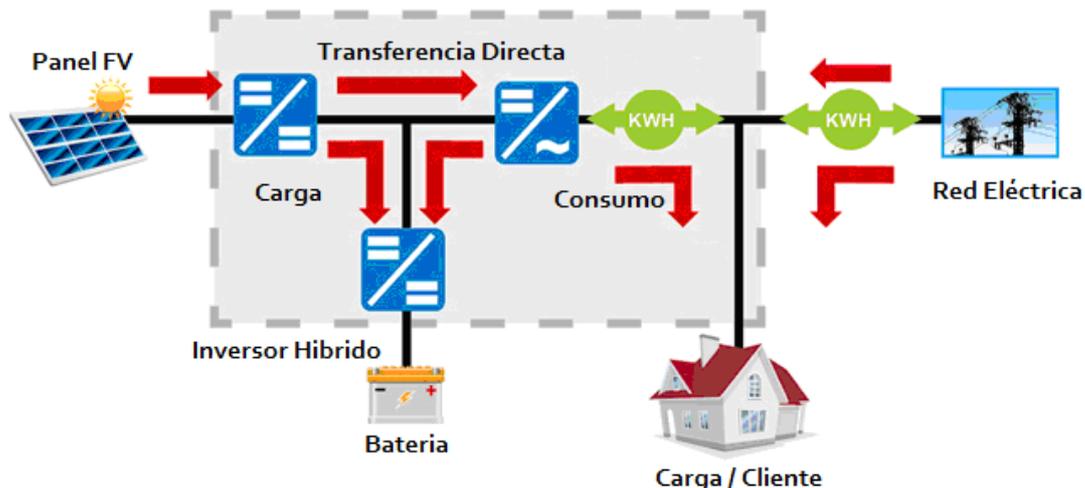


Figura 12. Esquema de un sistema híbrido.

Las placas fotovoltaicas están formadas por células fotovoltaicas que transforman la energía solar en energía eléctrica. La célula absorbe los fotones de la luz para liberar electrones que puede usar en una corriente eléctrica.

El inversor híbrido es el encargado de gestionar la energía, permite alimentar los consumos eléctricos desde la energía procedente de las placas fotovoltaicas, desde la energía de la red y desde la energía acumulada en las baterías o acumuladores. Transforma la corriente continua proveniente de los paneles fotovoltaicos y las baterías en corriente alterna. En caso de fallo en la conexión a la red eléctrica, este inversor es capaz de aprovechar la energía solar generada para abastecer el consumo necesario.

Las baterías son las encargadas de acumular la energía cuando la relación entre la energía producida y demandada lo permite. Cuando con la energía solar generada no se abastece la demanda, se utiliza la energía almacenada en las baterías. Describen ciclos de carga y descarga en función de las necesidades de la instalación.

## 6.2. Estrategia de gestión

La primera estrategia de gestión de energía seguida en este estudio es la siguiente:

- Si la demanda es menor que la producción de los paneles fotovoltaicos, se carga la batería si no está al 100%.
- Si la demanda es mayor que la producción y la batería tiene carga, se abastece la energía requerida mediante la energía producida por los paneles fotovoltaicos y la energía almacenada en las baterías.
- Si la demanda es mayor que la producción y la batería tiene carga pero no la suficiente para abastecer la demanda, se abastece la energía requerida mediante la energía producida por los paneles fotovoltaicos, la energía almacenada en las baterías y la restante se coge de la red eléctrica.
- Si la demanda es mayor que la producción y la batería está descargada, se utiliza la energía solar producida por los paneles fotovoltaicos y el resto de energía se absorbe directamente de la red eléctrica.
- No se contempla la venta de energía eléctrica en caso de que la batería este cargada y la producción de los paneles fotovoltaicos sea mayor que la demanda.

Además de esta gestión de la energía se han utilizado otras dos estrategias similares. En ellas cabe la posibilidad de cargar (hasta un valor definido) la batería por la noche directamente de la red eléctrica, cuando la electricidad es más barata. Se han seleccionado las 2:00 y las 3:00 de la mañana como las horas de posible carga de energía directa de la red eléctrica.

## 6.3. Parámetros del sistema

### Parámetros de la batería de acumulación

Como ya se ha comentado en otros apartados es necesario definir y dimensionar correctamente las baterías de acumulación. Para el desarrollo de este estudio se han definido y relacionado diferentes parámetros de la misma. Es necesario establecer el método de cálculo de la energía que se puede almacenar dentro de la batería. En este caso se ha utilizado la siguiente definición:

$$E_{bat}(Wh) = \frac{110 \cdot C_T \cdot D}{DOD(\%)}$$

Donde  $C_T$  es el consumo diario de batería en Wh/día, D son los días de autonomía de la batería y DOD la máxima profundidad de descarga. Todos estos datos se pueden obtener de la hoja de características que proporciona el fabricante. Como puede observarse, la energía capaz de almacenar en la batería es directamente proporcional al consumo diario de energía y a los días de autonomía de la misma. Por otro lado, es indirectamente proporcional a la profundidad de descarga.

### Balance de energía

Se define  $E_{red}$  como la energía que absorbe el sistema directamente de la red a lo largo de un año y es el sumatorio de la energía absorbida en cada hora. Se absorbe

energía de la red en dos situaciones diferentes; una cuando se produce una recarga nocturna y la otra cuando con la producción de energía y la energía almacenada en la batería no es capaz de abastecer el consumo. Se define  $E_{recarga}$  como la energía utilizada para recargar la batería durante la noche y  $E_{abs}$  a la energía de la red utilizada directamente para abastecer el consumo. Esta energía no es de carácter renovable.

$$E_{red,h} = E_{abs,h} + E_{recarga,h}$$

$$E_{red} = \sum_{h=1}^{8760} E_{red,h}$$

En el caso de la estrategia sin recarga  $E_{red}$  y  $E_{abs}$  coinciden ya que  $E_{recarga}$  es nulo.

Se define  $E_{luz}$  como la energía solar que utiliza el sistema para abastecer el consumo de manera directa, es decir, sin almacenarse en las baterías. Es de carácter renovable.

$$E_{luz} = \sum_{h=1}^{8760} E_{luz}$$

Se define  $E_{acum}$  como la energía utilizada gracias a almacenar la energía sobrante que proviene de la energía generada en los paneles fotovoltaicos. No entra en este apartado la energía almacenada en las baterías durante las recargas nocturnas. Por tanto, se considera energía de carácter renovable.

$$E_{acum} = \sum_{h=1}^{8760} E_{acum,h}$$

Se ha diferenciado entre dos tipos de energía, la renovable y la no renovable. La energía renovable es la utilizada proveniente de la luz solar, ya sea de manera directa o previo paso por la batería de acumulación. La energía no renovable coincide con la energía absorbida de la red, para consumo directo o para recarga nocturna de la batería.

$$E_{renovable} = E_{acum} + E_{luz}$$

$$E_{no\ renovable} = E_{red}$$

Para poder ver numéricamente la influencia del sistema fotovoltaico se ha definido el termino de porcentaje de autoconsumo. Da una idea del porcentaje de energía de carácter renovable utilizado en el sistema. A mayor porcentaje de autoconsumo, menor necesidad de energía proveniente de la red eléctrica.

$$\%Autoconsumo = \frac{E_{renovable}}{E_{renovable} + E_{no\ renovable}} \cdot 100$$

### **Cálculo porcentaje reducción de vida útil de la batería**

En el análisis del caso de estudio se tiene en cuenta la degradación por el uso de la batería de acumulación. Para ello se utiliza un modelo de vida útil de la misma. Como se ha explicado y analizado en apartados anteriores, existen diferentes métodos para

obtenerlo. Se ha elegido el método de Nciclos\*DOD que se ha desarrollado en el apartado 5.1. Es un método fácil de implantar y analizar de manera teórica.

#### 6.4. Implementación del sistema

Para desarrollar y gestionar este estudio se ha utilizado el programa Excel. Se han realizado tres plantillas con las tres estrategias anteriormente explicadas; sin carga directa desde la red, con carga a las 2:00 y con carga a las 3:00. Los datos de demanda y consumo en Zaragoza durante el año 2016 y precio de la electricidad se han obtenido de la página web de la Red Eléctrica de España. Se han implementado las fórmulas necesarias en el programa para poder obtener los resultados correctos.

Se analiza hora a hora, teniendo en cuenta la producción y la demanda de energía. Se obtienen de manera horaria datos de producción, demanda y gestión de la energía, así como el estado de la batería de acumulación. Al final, tras evaluar todas las horas del año se obtienen diferentes valores, los cuales se analizarán más adelante.

#### Datos de entrada al sistema

Se pueden diferenciar varios datos a introducir en la hoja Excel, principalmente los necesarios para dimensionar la batería. Se utiliza la fórmula que aparece en el apartado 6.3 para caracterizar la batería. Los datos que definen la batería se pueden ver en la siguiente tabla.

También hay que definir en la estrategia de gestión de la energía el estado inicial de la batería y el estado máximo de descarga de la misma que viene relacionado con la máxima profundidad de descarga. En la Tabla 4 se puede ver el resumen de las características que definen la batería en este estudio.

Datos Batería	D	0,5
	DOD	80%
	Energía batería	6600 Wh
	Estado inicial	100%
	Energía mínima	20%

Tabla 4. Datos de la batería utilizada.

#### Datos de salida del sistema

A partir de estos datos ya comentados se obtienen los resultados del sistema elegido utilizando las fórmulas correspondientes. El programa compara hora a hora el consumo y la demanda y siguiendo la estrategia elegida carga o descarga la batería o absorbe energía de la red eléctrica. Se realiza un resumen con los datos obtenidos a final de año como puede observarse en la Tabla 5 que aparece a continuación.

Resumen								
Datos batería	D	0,5				Datos energía	Energía producida por el sistema	5438373,96 Wh
	DOD	80%					Energía demandada	3518018 Wh
	Energía batería	6600 Wh						
	Estado inicial	100%	6600 Wh			N*DOD	7920000	
	Energía mínima	20%	1320 Wh					
Resultados		Wh	%					
	Energía absorbida de la red	668969,996	19,01553647		Reducción de vida útil (Wh)	2413087,574		
	Energía consumida de la batería	1209183,79	34,37116544		Reducción de vida útil (%)	15,24%		
	Energía absorbida del sistema PVE	1639864,22	46,61329808		Precio batería (€)	1500		
	TOTAL	3500000	100					
Gasto								
	Energía absorbida red (€)	73,328414						
	Batería (€)	228,512081						
	TOTAL (€)	301,840495						
Precio sin ER	TOTAL (€)	367,488396						

Tabla 5. Resumen de los datos obtenidos.

La tabla se divide en diferentes apartados, el primero de ellos es los datos de la batería que son los datos introducidos por el usuario. A la derecha aparecen los datos de la energía demandada y la energía producidas por las placas fotovoltaicas. Como puede observarse la producción es mayor que la demanda y aun así es necesario coger energía de la red para abastecer el consumo. Esto ocurre porque la energía solar es una energía muy variable y no es posible aprovechar todo lo generado, ya que se necesitarían unas baterías de acumulación demasiado grandes y no sería rentable económicamente. En el apartado de resultados aparecen los datos de energía absorbida de la red, la utilizada de las baterías y la aprovechada directamente de la luz solar mediante los paneles fotovoltaicos. También aparecen los Wh que absorbe o cede la batería, y utilizando el análisis de  $N \cdot DOD$  se calcula el porcentaje de reducción de vida útil de la batería. Por último aparece una comparativa del precio de la electricidad utilizando el sistema fotovoltaico o sin él. Solo se tiene en cuenta el precio de la electricidad y de la propia batería, ponderado con su reducción de vida útil.

## 6.5. Análisis y resultados

### Producción

En la Figura 13 se puede observar la producción de energía en intervalos horarios a lo largo del año 2016 en la población de Zaragoza según los parámetros anteriormente comentados.

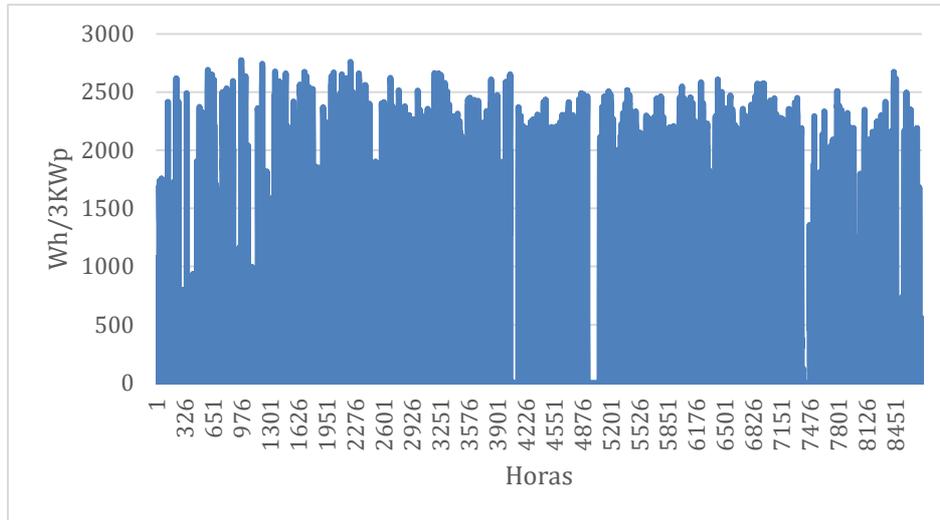
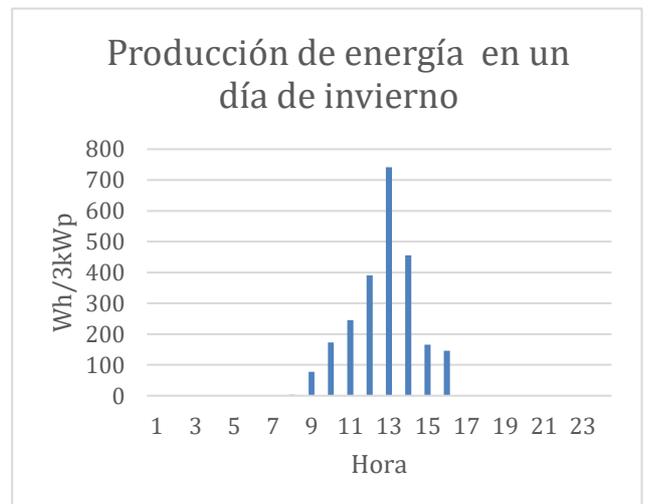
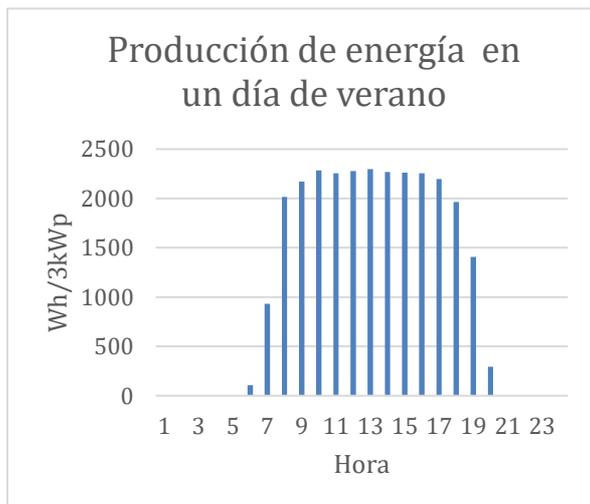


Figura 13. Datos de producción horaria de 2016.

Además, aparecen las producciones horarias de los paneles fotovoltaicos durante un día tipo de verano y otro de invierno. Haciendo una comparación entre ambos días, se puede decir que en verano se produce energía en más horas, nueve frente a quince, y más energía por hora, llegando hasta 2 kWh en verano mientras que en invierno apenas se rozan los 700Wh en el mejor de los casos. En un día de verano durante las horas de sol, exceptuando las primeras y últimas horas, la producción es prácticamente constante, mientras que la producción en un día de invierno es mucho más irregular debido a la climatología.



Figuras 14 y 15. Producción de un día tipo de verano y de invierno.

Como se puede observar en el histograma el intervalo de mayor producción de energía es el de entre 0 y 150 Wh con una gran diferencia. Esto se debe a que el sol solo aparece por el día y en las horas de noche la energía producida es nula que junto con las primeras y ultima horas de sol donde no se produce demasiada energía suman más de 5000 horas con poca o nula producción (menor de 150 Wh). Alrededor del 60% de las horas del año se encuentran en ese rango de prácticamente nula producción. Debido a esta gran diferencia de producción de energía solar fotovoltaica se hace indispensable el uso de baterías de acumulación para poder abastecer una mayor demanda de energía.

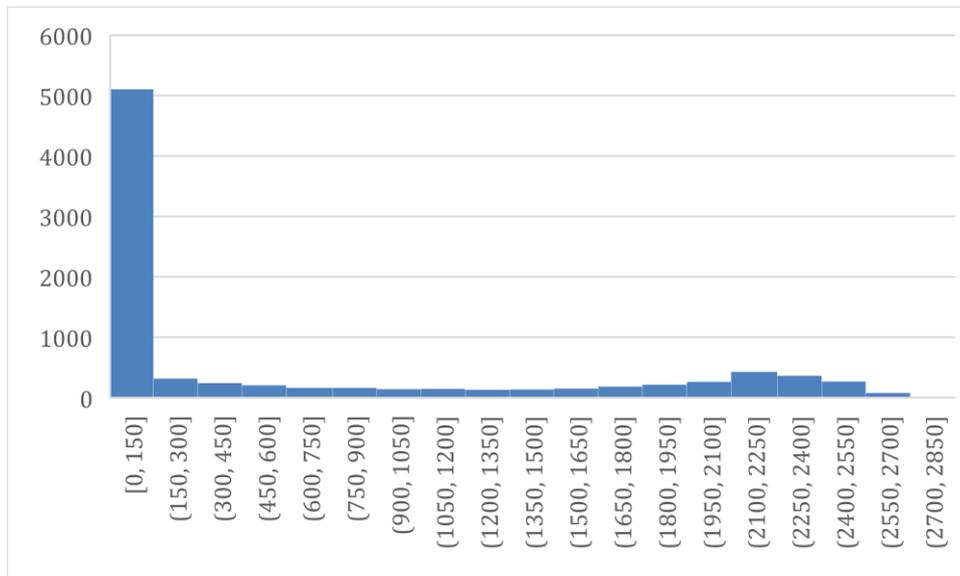


Figura 16. Histograma de producción de energía eléctrica horaria en 2016.

## Demanda

De manera similar a la producción se puede analizar la demanda. En la Figura 17 se detalla demanda horaria de un año se puede observar que la demanda varía durante el año manteniéndose entre los 300 y 800 Wh en la mayoría de las horas.

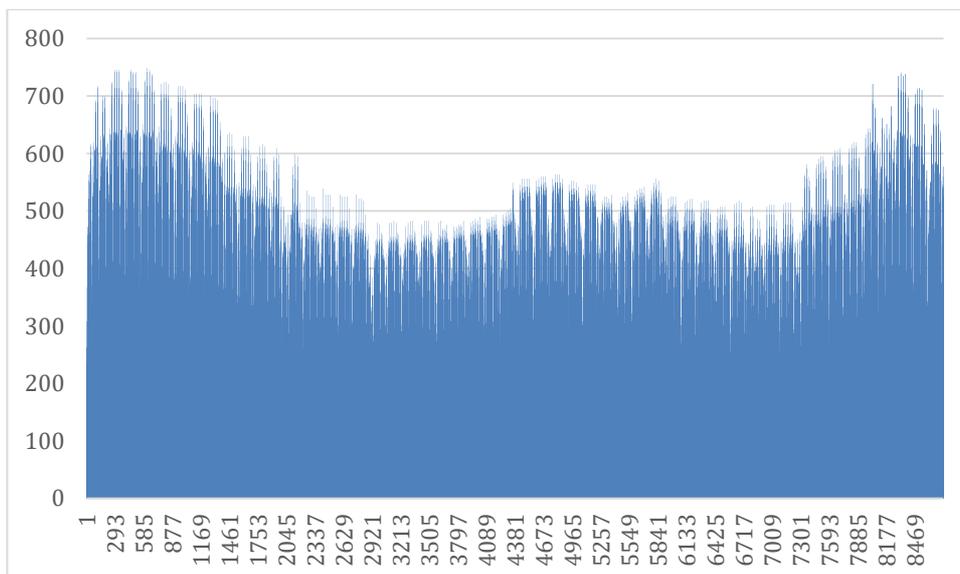
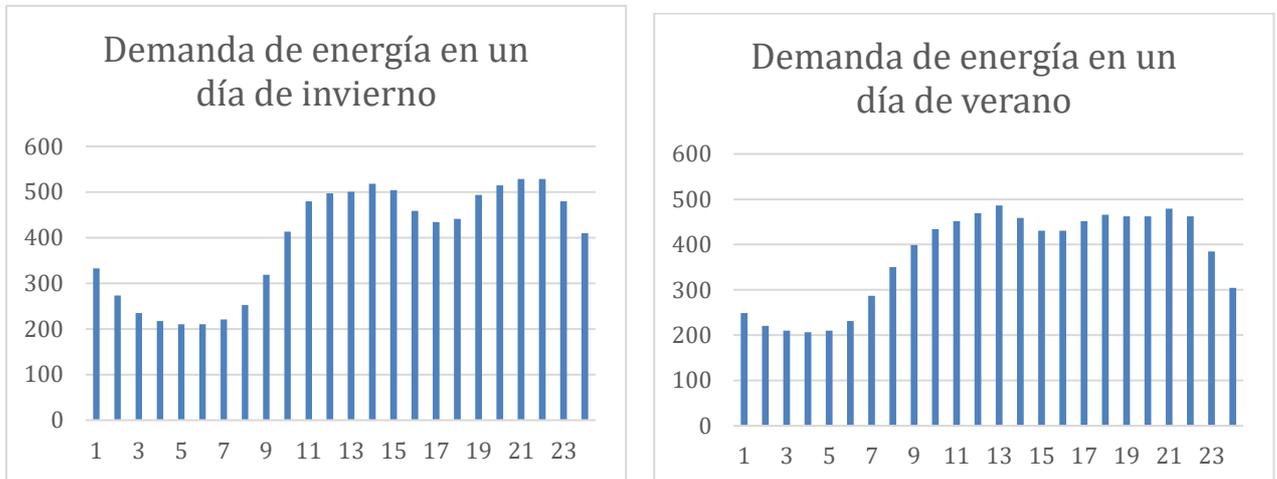


Figura 17. Datos de demanda horaria en Zaragoza durante 2016.

La diferencia entre un día tipo de verano y otro de invierno es la cantidad de energía demandada, algo superior en invierno. Esto se debe al mayor uso de luz y calefacción en invierno en comparación con la energía utilizada en verano para los ventiladores. Pero la forma de la curva de la demanda sigue la misma estructura en ambos días, como puede observarse en las Figuras 18 y 19.



Figuras 18 y 19. Demanda de un día tipo de verano y de invierno.

Teniendo en cuenta el histograma de la demanda se puede observar que en todas las horas del año se demanda más de 170 Wh, es decir existe demanda a cualquier hora del día durante todos los días de año. Esto difiere de manera considerable con la producción de energía solar. Los intervalos de demanda tienen diferentes frecuencias que dependen de la época y hora del año.

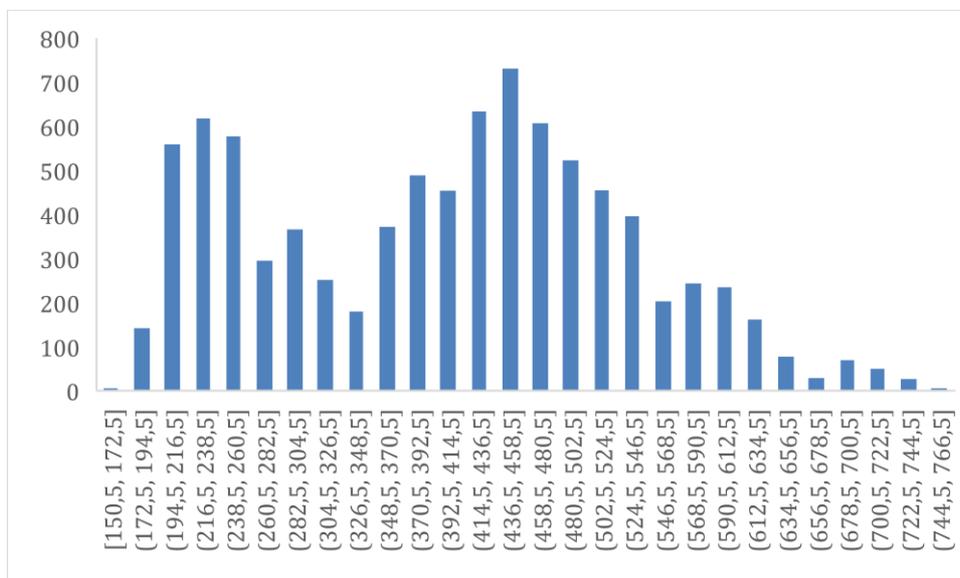


Figura 20. Histograma de la demanda horaria en 2016.

### Profundidad de descarga máxima

El primer parámetro analizado ha sido la profundidad de descarga máxima. Para ello se ha modificado el DOD manteniendo la energía de la batería constante. En las

siguientes imágenes se puede observar que al aumentar la profundidad de descarga máxima la batería puede absorber y ceder más energía y por tanto aumenta el porcentaje de autoconsumo y disminuye el de la absorbida de la red. Como consecuencia negativa de aumentar el DOD máximo se encuentra que aumenta el porcentaje de reducción de vida útil de la batería. Esto tiene una sencilla explicación, al aumentar la carga y descarga de energía en la batería, su uso aumenta y por tanto aumenta también su desgaste.

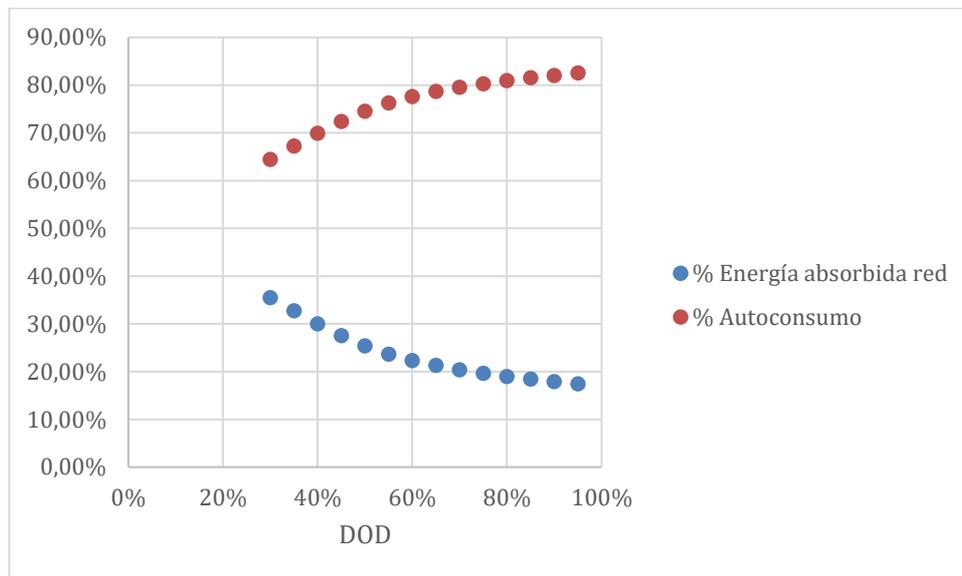


Figura 21. Evolución de la energía en función de la profundidad de descarga máxima.

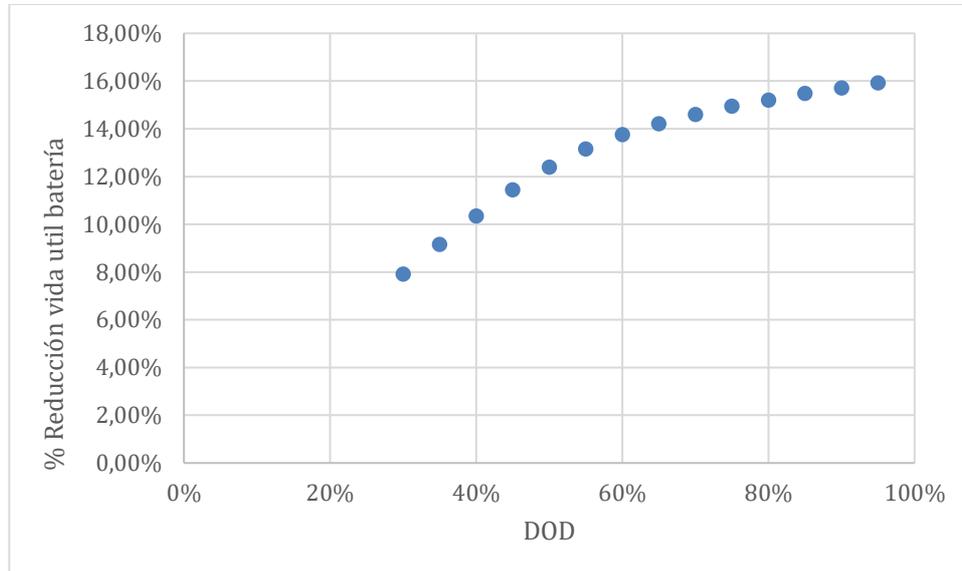


Figura 22. Porcentaje de reducción de vida útil vs profundidad de descarga máxima.

### Condiciones de recarga nocturna

Se ha analizado el comportamiento del sistema variando el porcentaje de la batería recargada durante la noche. Es decir, se ha variado el porcentaje de SOC al cual se deja la batería después de cada recarga nocturna realizada. Al aumentar el porcentaje de SOC en la recarga disminuye el número de días en el que se producen recargas

nocturnas, pero aumenta la energía absorbida de la red para recargar la batería. Debido a este hecho disminuye también el porcentaje de autoconsumo al aumentar el total de la energía absorbida de la red y aumenta el porcentaje de reducción de vida útil debido a un mayor uso de la batería. Estas tendencias se pueden apreciar en las Figuras 23, 24, 25 y 26.

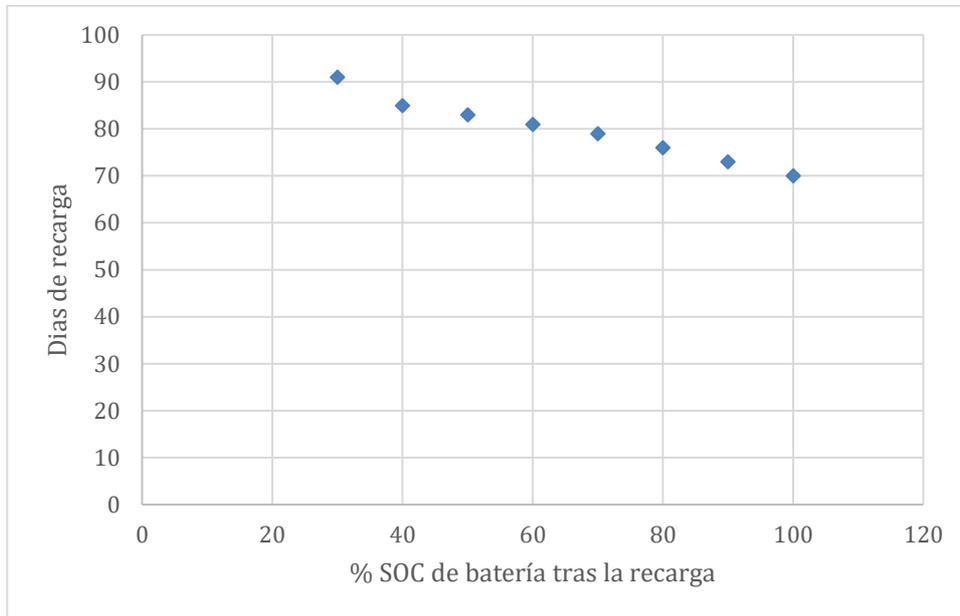


Figura 23. Días de carga nocturna en función del porcentaje de SOC tras la recarga.

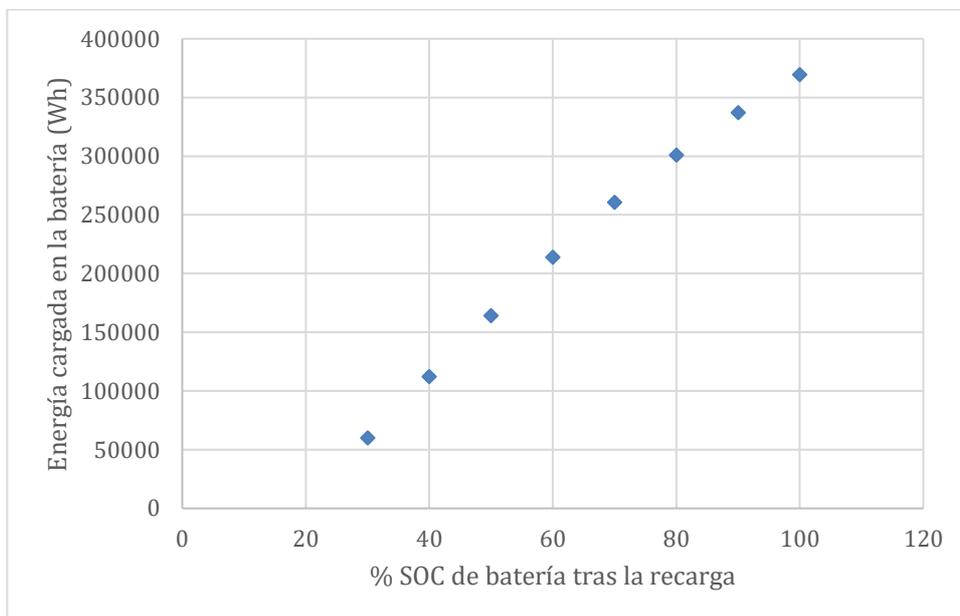


Figura 24. Energía recargada en la batería en función del porcentaje de SOC tras la recarga.

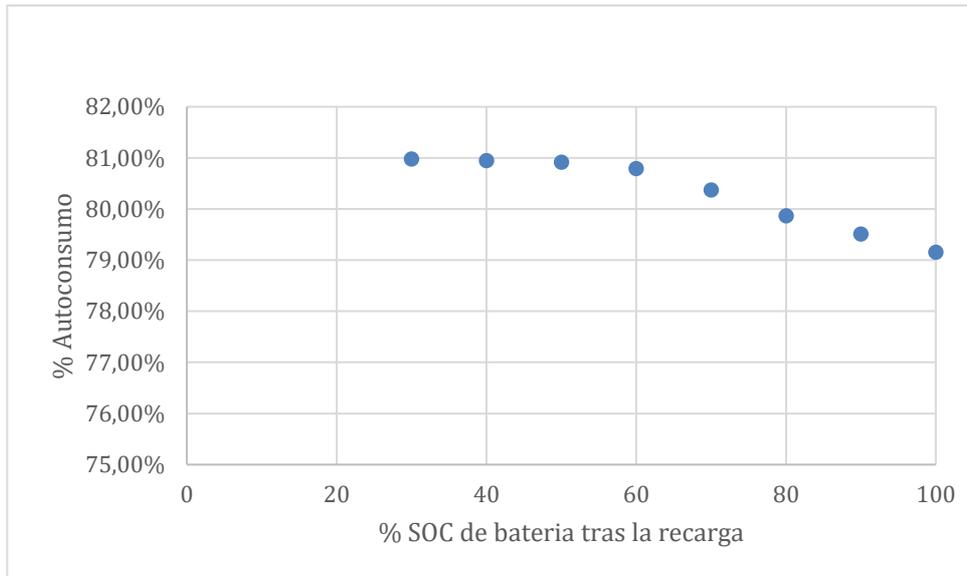


Figura 25. Variación del porcentaje de autoconsumo en función del porcentaje de SOC tras la recarga.

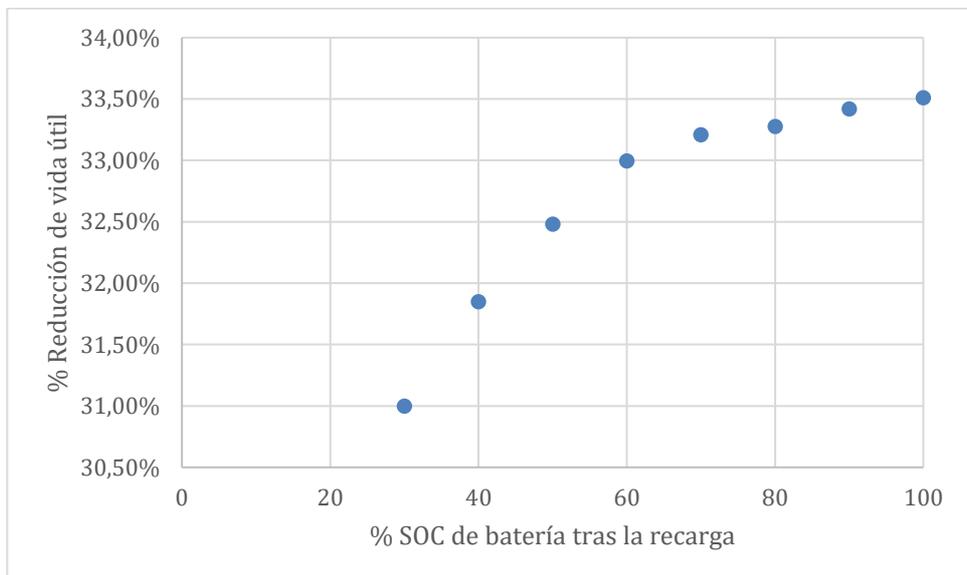


Figura 26. Variación del porcentaje reducción de vida útil en función del porcentaje de SOC tras la recarga.

### Días de autonomía (D)

Los días de autonomía de la batería tienen una gran importancia en los sistemas aislados principalmente. Pero en todos los casos un aumento en los días de autonomía implica una mayor capacidad de almacenar energía a costa de un aumento en el precio de la batería. Es importante encontrar una buena relación entre estas dos características, unidas a la estimación de la vida útil de la batería.

Como puede observarse en la Figura 27 al aumentar los días de autonomía aumenta el porcentaje de autoconsumo mientras que disminuye la energía absorbida de la red eléctrica. Si los días de autonomía son cero, es decir, no hay batería de acumulación, la energía o se absorbe de manera directa mediante los paneles fotovoltaicos o se absorbe de la red eléctrica.

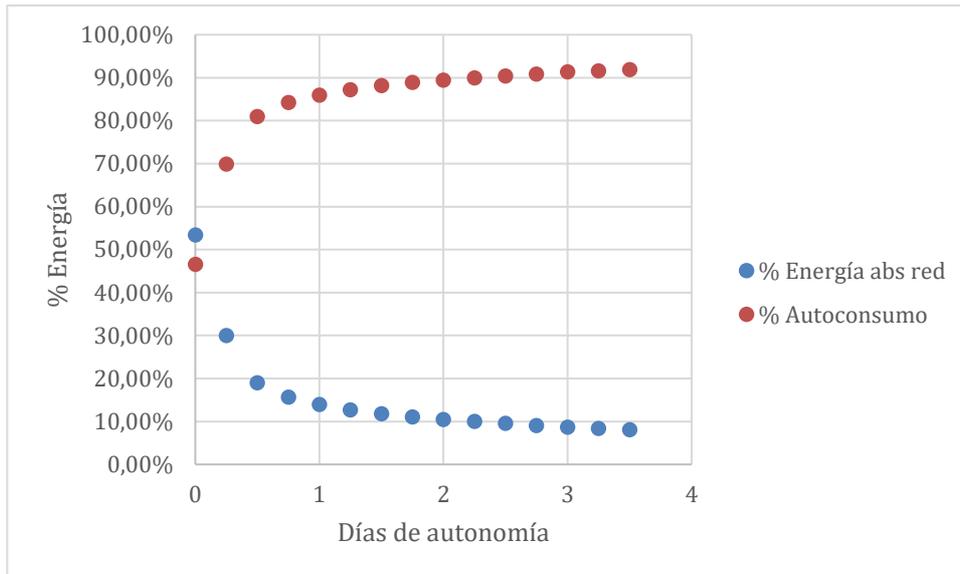


Figura 27. Reparto de energía en función de los días de autonomía de la batería.

Por otro lado, al aumentar los días de autonomía disminuye el porcentaje reducción de vida útil. Esto se debe a que aumenta el tamaño de la batería y por tanto una misma cantidad de energía supone un porcentaje menor.

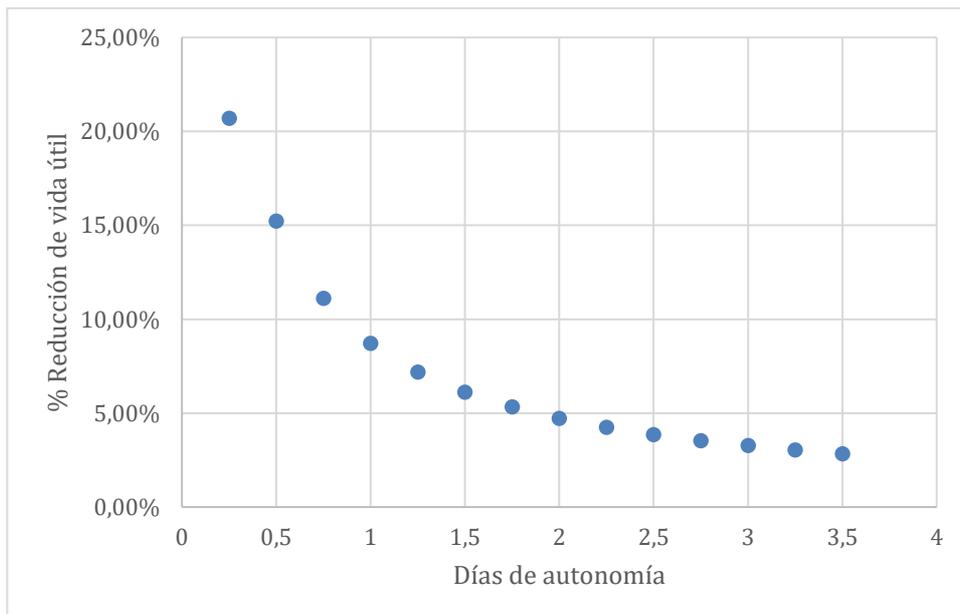


Figura 28. Reducción de vida útil de batería en función de los días de autonomía.

### Comparación de estrategias

En este apartado se analizan las diferencias entre las tres estrategias de gestión anteriormente comentadas. La primera de ellas es la gestión sin carga, la segunda gestión con carga a las 2:00 hasta el 50% si la batería está al 20% de su capacidad y la tercera con carga a las 3:00 en las mismas condiciones.

Al cargar la batería por la noche aumenta la cantidad y el porcentaje de energía absorbida de la red. Cuanto más tarde se cargue, más posibilidades hay de que la batería

este al 20% ya que ha de abastecer consumo durante más horas sin producción y por tanto más energía absorberá de la red.

Por otro lado, al cargar la batería durante la noche el porcentaje de autoconsumo disminuye. Esto se debe a que parte de la energía que se consume de la batería viene directamente de la red eléctrica, fuente no renovable. Cuanto mayor sea la carga nocturna mayor será el porcentaje reducción de la vida útil de la batería y menor el porcentaje de autoconsumo.

La única ventaja de carga la batería durante la noche reside en el aspecto económico como se puede observar en la tabla 6. Al cargar por la noche la batería, se obtiene una energía muy barata ya que el precio de compra de electricidad a esas horas es muy bajo. En el coste anual únicamente se tiene en cuenta el precio de la electricidad que absorbe de la red el sistema y el coste de la batería ponderado por su reducción de vida útil.

	Sin carga	Carga 2:00 al 50%	Carga 3:00 al 50%
Energía absorbida red	668969,99	671206,53	672380,79
Energía absorbida red%	19,01%	19,08%	19,11%
Energía consumida batería	1209183,787	1371287,3	1374073
Energía consumida (%)	34,37%	38,99%	39,06%
Energía absorbida del PVE	1639864,217	1639864,2	1639864,2
Energía absorbida del PVE %	46,61%	46,61%	46,61%
Reducción vida útil batería(%)	15,23%	16,24%	16,25%
% Autoconsumo	80,98%	80,92%	80,89%
Coste anual (€)	301,84	299,28	298,59

Tabla 6. Resultados de las diferentes estrategias seguidas.

## Análisis económico

En este apartado se realiza un análisis económico de la instalación. Para ello solo se tiene en cuenta el precio de la electricidad que se compra de la red y el precio de la batería de acumulación ya que se consideran los factores más importantes. No se tiene en cuenta el precio de la instalación de los paneles fotovoltaicos, ya que solo influyen en la inversión inicial y no en el gasto anual del sistema. Se define el gasto anual como la suma del coste de compra de electricidad y el coste de batería utilizada a lo largo del año.

$$\text{Coste compra electricidad}(\text{€}) = \sum_{i=1}^{8760} \text{Pelec}_i \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot q_i(\text{kWh})$$

Siendo  $\text{Pelec}$  el precio de compra horaria de electricidad del sistema de red y  $q_i$  la cantidad absorbida por el sistema en cada hora.

$$\text{Coste batería(€)} = \% \text{ Reduccion de vida útil} \cdot \text{Precio batería(€)}$$

El precio de la batería viene determinado por el tamaño de la misma, es decir por los días de autonomía (D). Se ha supuesto una relación lineal del precio de la batería con D.

$$\text{Gasto anual(€)} = \text{Coste compra electricidad} + \text{Coste batería}$$

A medida que la tecnología de energía solar fotovoltaica se va desarrollando, el precio de las baterías de acumulación va disminuyendo. Por tanto resulta muy interesante realizar un análisis de sensibilidad del gasto anual en función de precio de la batería y su tamaño. Si el precio de la batería (o el precio de cada día de autonomía D) es bajo, el gasto anual disminuye al aumentar el tamaño de la misma. También aumenta la inversión inicial ya que una batería de mayor tamaño implica un mayor coste de la misma. Estos datos quedan reflejados en la Figura 29 que aparece a continuación.

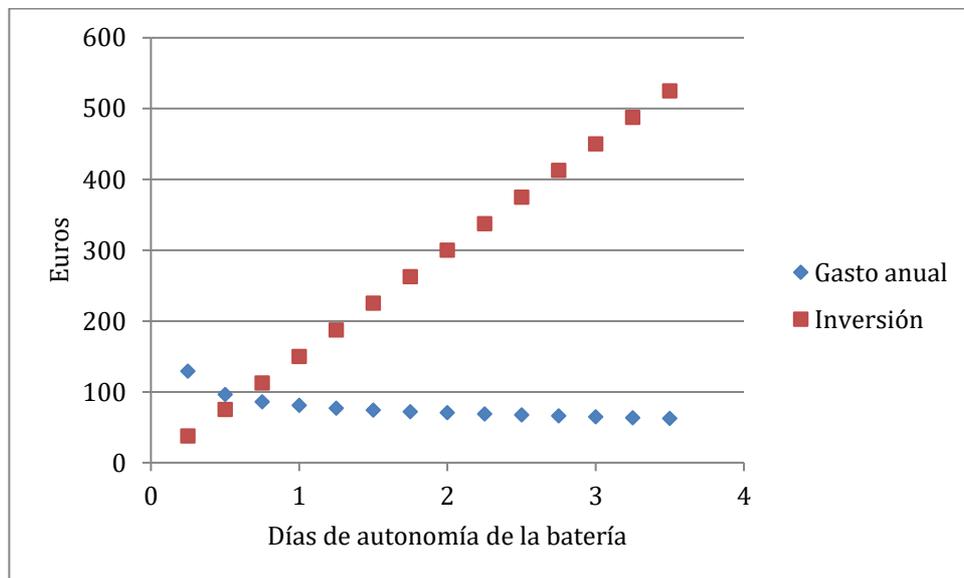


Figura 29. Gasto anual e inversión en función de los días de autonomía. (D=150€)

Por otro lado si el precio de cada día de autonomía de la batería es muy elevado, el gasto anual puede aumentar al aumentar el tamaño de la batería. En la siguiente figura se pueden observar estos hechos. Para precios de D mayores que 800€ no siempre es rentable aumentar el tamaño de batería ya que aumenta el gasto anual. Sin embargo para precios menores sí que lo es.

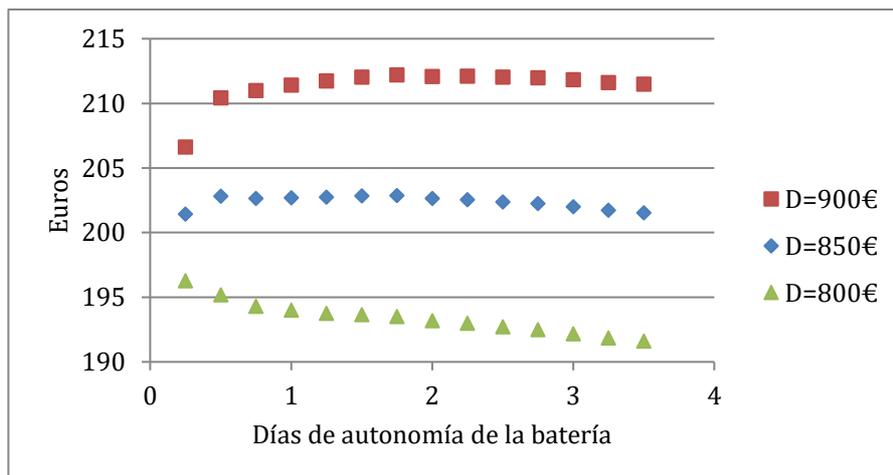


Figura 30. Análisis de sensibilidad del gasto anual en función del precio de D.

Tras realizar este análisis se puede decir que al desarrollarse la tecnología necesaria y disminuir el coste de las baterías, el tamaño de las mismas irá en aumento. Pero habrá que tener en cuenta la relación entre el gasto anual y la inversión inicial. Será necesario encontrar una proporción adecuada entre ambos parámetros para cada caso particular. Ya que llega un momento en el que la disminución del gasto anual es tan pequeña que no interesa aumentar más el tamaño de la batería y por tanto la inversión inicial.

Por último, se analiza la influencia de la potencia instalada junto con los parámetros anteriormente comentados. En la figura 31 se puede observar el gasto anual de la instalación en función de la potencia instalada y del tamaño de la batería.

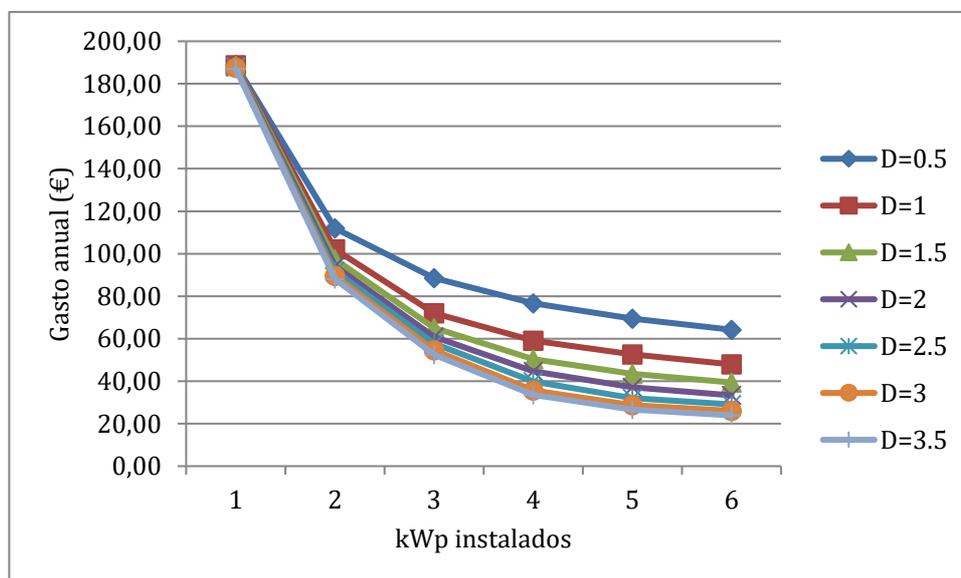


Figura 31. Análisis del coste anual en función de D y potencia instalada.

Lo primero que se puede comentar es la influencia de la potencia instalada en el sistema. Al aumentar los kWp instalados el gasto anual disminuye ya que aprovecha más energía fotovoltaica de las placas y disminuye la necesidad de absorber energía de la red eléctrica para abastecer el consumo. Para el precio de la batería estimado en este caso, 200 € por cada día de autonomía, con una potencia fija instalada el gasto anual es menor al aumentar el tamaño de la batería. Cabe recordar que un aumento en el tamaño

de la batería y en la potencia instalada hacen que aumente la inversión inicial de la instalación.

Como puede observarse para poca potencia instalada el tamaño de la batería tiene muy poca influencia en el gasto anual. A medida que se aumentan los kWp de los paneles fotovoltaicos la influencia del tamaño de la batería es más relevante. Como se ha explicado anteriormente, es necesario encontrar una relación adecuada entre el ahorro del gasto anual y la inversión inicial necesaria.

## **7. Conclusiones**

El trabajo realizado se ha focalizado en las baterías de acumulación en sistemas de energía solar fotovoltaica. Las baterías tienen una gran importancia en este tipo de sistemas, tanto para su correcto funcionamiento como para determinar el rendimiento económico del sistema. Además tienen una gran influencia en la gestión de la energía de los sistemas fotovoltaicos.

El primer punto a tener en cuenta tras la realización del trabajo es el cálculo de la vida útil de las baterías en sistemas fotovoltaicos mediante el método de  $N_{ciclos} \cdot DOD$ . Es un método teórico nuevo, obtenido en base a la hoja de parámetros de las baterías. Se ha observado que el producto del número de ciclos por la profundidad de descarga se mantiene aproximadamente constante. Teniendo en cuenta este hecho se ha desarrollado un método del cálculo de la vida útil de las baterías. Se ha confirmado que el método es correcto, siempre y cuando la batería se use en las mismas condiciones en las que se han obtenido los valores que aparecen en la hoja de características proporcionada por el fabricante. Esta observación limita mucho el uso de este método a la hora de analizar sistemas reales. Este trabajo puede ser un inicio para poder desarrollar este método en el futuro de manera más profunda y poderlo emplear en situaciones no tan concretas.

Por último, se ha realizado el estudio de un caso concreto de gestión de un sistema solar fotovoltaico de una vivienda familiar en la ciudad de Zaragoza. Se han utilizado tres sistemas de gestión diferentes y se han analizado los resultados. Al aumentar la máxima profundidad de descarga (DOD) aumenta el porcentaje de autoconsumo, disminuye el de la energía absorbida de la red y aumenta la de reducción de vida útil de la batería. Al aumentar los días de autonomía (D) aumenta el porcentaje de autoconsumo mientras y disminuye la energía absorbida de la red y el porcentaje de reducción de vida útil. Su principal inconveniente es que un aumento en los días de autonomía implica un aumento en el coste de la batería, y por tanto del sistema. Variando las condiciones de la recarga nocturna se pueden obtener varias conclusiones. Al aumentar el porcentaje de la recarga disminuye el número de días en el que se producen recargas nocturnas, pero aumenta la energía absorbida de la red para recargar la batería. También disminuye el porcentaje de autoconsumo y aumenta el porcentaje de reducción de vida útil. Comparando las tres estrategias explicadas en el trabajo se puede decir que son bastante similares entre ellas. Principalmente se diferencia en un aumento en la reducción de la vida útil en los casos de carga nocturna. En cuanto al tema económico se puede concluir diciendo que con el desarrollo de esta tecnología bajará la inversión inicial en estos sistemas y se conseguirá una energía muy barata. A la hora de implantar un sistema híbrido fotovoltaico es necesario encontrar una buena relación entre la inversión inicial y el gasto anual del sistema.

## 8. Bibliografía

- [1] Stephen Drouilhet, P.E. "A Battery Life Prediction Method for Hybrid Power Applications". January 1997.
- [2] Chao Lyu, Qingzhi Lai, Tengfei Ge, Honghai Yu, Lixin Wang, Na Ma. "A lead-acid battery's remaining useful life prediction by using electrochemical model in the Particle Filtering framework". December 2016.
- [3] Jianwei Li, Anthony M. Gee, Min Zhang, Weijia Yuan. "Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model". May 2015.
- [4] Carlos Mario Giraldo Yepes. "Estrategia de gestión de un sistema de producción de energía solar fotovoltaica con almacenamiento para autoconsumo y conexión a la red eléctrica". Septiembre 2011.
- [5] Javier Guembe Zabaleta, Idoia San Martin Biurrun, Julio María Pascual Miqueleiz. "Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental. Junio 2016.
- [6] Jaime Hamel Fonseca. "Cells, Batteries And Lithium-Ion Batteries for an Alternative ....?? "
- [7] Myungchin Kim, Sungwoo Bae. "Decentralized control of a scalable photovoltaic (PV)-battery hybrid power system". December 2016.
- [8] Georg Angenendt, Sebastian Zurmühlen, Ramin Mir-Montazeri, Dirk Magnor, Dirk Uwe Sauer. "Enhancing Battery Lifetime In PV Battery Home Storage System Using Forecast Based Operating Strategies". March 2016.
- [9] I. Tegani, A. Aboubou, M.Y. Ayad, R. Saadi, M. Becherif, M. Bahri, M. Benaouadj, O. Kraa. "Experimental validation of differential flatness-based control applied to stand alone using photovoltaic/fuel cell/battery hybrid power sources". August 2016.
- [10] Florian Wankmüllera, Prakash R. Thimmapuram, Kevin G. Gallagher, Audun Botterud. "Impact of battery degradation on energy arbitrage revenue of grid-level energy storage". December 2016.
- [11] Qunying Long, Guozheng Ma, Qiqin Xu, Cheng Ma, Junmin Nan, Aiju Li, Hongyu Chen. "Improving the cycle life of lead-acid batteries using three-dimensional reduced graphene oxide under the high-rate partial-state-of-charge condition". January 2017.
- [12] Mats Zackrisson, Kristin Fransson, Jutta Hildenbrand, Gorazd Lampic, Colm O'Dwyer. "Life cycle assessment of lithium-air battery cells". June 2016.
- [13] Toufik Madani Layadi, Gerard Champenois, Mohammed Mostefai, Dhaker Abbas. "Lifetime estimation tool of lead-acid batteries for hybrid power sources design". March 2015.
- [14] A. Abdollahi, X. Han, N. Raghunathan, B. Pattipati, B. Balasingam, K.R. Pattipati, Y. Bar-Shalom, B. Card. "Optimal charging for general equivalent electrical battery model, and battery life management". December 2016.
- [15] Yang Zhang, Anders Lundblad, Pietro Elia Campana, F. Benavente, Jinyue Yan. "Battery sizing and rule-based operation of grid-connected photovoltaic-battery system: A case study in Sweden". November 2016.
- [16] G. Velasco, F. Casellas, F. Guinjoan, R. Piqué, H. Martínez, A. Pineau, A. Graillet. "Gestión de Energía en Sistemas Híbridos Red-FV-Diésel en el proyecto MED-Solar".

- [17] Bindner, Henrik W.; Cronin, T.; Lundsager, P.; Manwell, J.F.; Abdulwahid, U.; Baring-Gould. "Lifetime modelling of lead acid batteries". 2005.
- [18] Ángel A. Bayod-Rújula, Marta E. Haro-Larrode, Amaya Martínez Gracia. "Sizing criteria of hybrid photovoltaic-wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid". November 2013.
- [19] Malek Zaibi, Gérard Champenois, Xavier Roboam, Jamel Belhadj, Bruno Sareni. "Smart power management of a hybrid photovoltaic/wind stand-alone system coupling battery storage and hydraulic network". August 2016.
- [20] Ying WANG, Zhi ZHOU, Audun BOTTERUD, Kaifeng ZHANG, Qia DING. "Stochastic coordinated operation of wind and battery energy storage system considering battery degradation".
- [21] Jochen Linssen, Peter Stenzel, Johannes Fleer. "Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles". December 2015.
- [22] James F. Manwell, Jon G. McGowan, Utama Abdulwahid, and Kai Wu. "Improvements to the Hybrid2 Battery Model". May 2005.
- [23] Adel Ghazel, Martin Murnane. "A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries.
- [24] Bentley, P, B.S. Bhangu, C.M. Bingham, and D.A. Stone. "Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries for Hybrid-Electric Vehicles". 2005.
- [25] Chen, Yi-Ping, Chin-Sien Moo, Kong Soon Ng, and Yao-Ching Hsieh "Enhanced Coulomb Counting Method for Estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lithium-ion Batteries".2009.
- [26] Fang, Lijin, Fei Zhang, and Guangjun Liu. "A Battery State-of-Charge Estimation Method with Extended Kalman Filter". 2008.
- [27] He, Lei, Bingjun Xiao, and Yiyu Shi. "A Universal State-of-Charge Algorithm for Batteries". 2010.
- [28] Miguel Alonso Abella. "Sistemas fotovoltaicos".
- [29] Candial Benavente, Ismael. "Análisis de un sistema fotovoltaico híbrido doméstico".
- [30] Juan Carlos Viera Pérez. "Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos". 2003.
- [31] Daniel Guasch Murillo. "Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos". 2003.
- [32] Gee AM, Robinson FVP, Dunn RW. "Analysis of battery lifetime extension in a small-scale wind-energy system using supercapacitors".
- [33] Wang D, Li H, Shi S, Huang X, Chen L. "Improving the rate performance of LiFePO<sub>4</sub> by Fe-site doping".
- [34] Zhang Q, White RE. "Capacity fade analysis of a lithium ion cell".

## 9. Índice de figuras

- Figura 1. Gráfico de la curva I-V de la producción de un panel fotovoltaico.  
Figuras 2 y 3. Influencia del régimen de corriente en la tensión de carga.  
Figura 4. Perfil de carga y descarga.  
Figura 5. Diagrama de bloques del sistema dinámico a estudiar.  
Figura 6. Gráfica de ciclos de carga vs DOD.  
Figura 7. Nciclos\*DOD de una batería Sundepot 24/48.  
Figura 8. Nciclos\*DOD de una batería Monoblock PVS.  
Figura 9. Ciclos de vida útil de una batería PowerSafe.  
Figura 10. Relación número de ciclos y profundidad de descarga.  
Figura 11. Esquema de la sistemática de análisis de la vida útil con el método Rainflow.  
Figura 12. Esquema de un sistema híbrido.  
Figura 13. Datos de producción horaria de 2016.  
Figuras 14 y 15. Producción de un día tipo de verano y de invierno.  
Figura 16. Histograma de producción de energía eléctrica horaria en 2016.  
Figura 17. Datos de demanda horaria en Zaragoza durante 2016.  
Figuras 18 y 19. Demanda de un día tipo de verano y de invierno.  
Figura 20. Histograma de la demanda horaria en 2016.  
Figura 21. Evolución de la energía en función de la profundidad de descarga máxima.  
Figura 22. Porcentaje de reducción de vida útil vs profundidad de descarga máxima.  
Figura 23. Días de carga nocturna en función del porcentaje de SOC tras la recarga.  
Figura 24. Energía recargada en la batería en función del porcentaje de SOC tras la recarga.  
Figura 25. Variación del porcentaje de autoconsumo en función del porcentaje de SOC tras la recarga.  
Figura 26. Variación del porcentaje reducción de vida útil en función del porcentaje de SOC tras la recarga.  
Figura 27. Reparto de energía en función de los días de autonomía de la batería.  
Figura 28. Reducción de vida útil de batería en función de los días de autonomía.  
Figura 29. Gasto anual e inversión en función de los días de autonomía. (D=150€)  
Figura 30. Análisis de sensibilidad del gasto anual en función del precio de D.  
Figura 31. Análisis del coste anual en función de D y potencia instalada.  
Figura 32. Célula electroquímica.  
Figura 33. Esquema de una batería de Vanadio.  
Figura 34. Esquema de una batería Zinc-Bromo.