



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO SOBRE EL CONTROL ELECTRÓNICO Y GESTIÓN
ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE BATERÍAS PARA USO
PARTICULAR

STUDY OF THE ELECTRONIC CONTROL AND ENERGY
MANAGEMENT OF A BATTERY SYSTEM FOR
PARTICULAR USE

Autor: Rubén Pardo Martínez

Tutor: José Guillermo Rosas Mayoral

(Julio, 2022)



UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Rubén Pardo Martínez

TUTOR: José Guillermo Rosas Mayoral

TÍTULO: Estudio sobre el control electrónico y gestión energética de un sistema de baterías para uso particular

TITLE: Study of the electronic control and energy management of a battery system for particular use

CONVOCATORIA: Julio, 2022

RESUMEN

El concepto de batería surge ante la necesidad de domar a la electricidad, de retener su potencial y de saber cómo utilizarlo posteriormente. Por ello, el primer capítulo de este estudio se destina al análisis de la trayectoria y del funcionamiento de las baterías, centrándose posteriormente en uso particular. El ámbito doméstico, junto con los vehículos eléctricos; es uno de los sectores que más está evolucionando en lo referente a baterías. La causa viene dada por la cada vez más necesaria transición energética que, en los temas mencionados anteriormente, tiene como objetivo la sustitución de los vehículos de combustión interna a la vez que gestionar los excedentes de generación renovable para su máximo aprovechamiento. Para ello, se estudiará el caso de una vivienda estándar que cuente con un sistema de generación renovable fotovoltaica combinado con un sistema de almacenamiento de tecnología ion-litio. No obstante, para que estos sistemas alcancen una eficiencia óptima; es necesario un profundo estudio que permitan establecer unas técnicas de control y monitorización avanzadas. De esta manera, se mejorará el rendimiento de la instalación a la vez que se cuida por la seguridad y prolongación de su vida útil. Por otra parte, se contemplan las actuales



tarifas de la energía de cara a su uso inteligente en caso de instalación híbrida conectada a la red eléctrica pública. Por último, se cierra el trabajo con un análisis y recomendaciones de buenas prácticas que resultarían clave para el óptimo mantenimiento del sistema de baterías de cara al futuro.

ABSTRACT

The concept of battery appeared from the need of manage the electricity, keep its potential and know how to use it in the future. Due to this reason, the first chapter of this study is dedicated to the analysis of the trajectory and the operation of the batteries, focusing later on the particular use. The domestic field in addition to electric vehicles is one of the most evolutive sectors referring to batteries. The reason is due to the increasingly necessary energy transition which, in the in the above-mentioned areas, has as scope the substitution of the internal combustion vehicles as well as the maximization of renewable energy production. To reach that, a case of a standard housing with photovoltaic renewable generation combined with a lithium-ion technology storage system. Nevertheless, for these systems to achieve optimum efficiency; a deep study that enables the establishment of control and monitoring of advanced techniques is needed. In this way, the performance of the installation will improve at the same time ensuring safety and extending its lifetime. On the other hand, the electricity tariffs of energy are discussed for smart usage in case of a hybrid installation connected to the public electricity grid. Last but not least, the paper is concluded with an analysis and recommendations of essential practices that are key for the optimal maintenance of the battery system in the future.

Palabras clave: sistema, batería, control, gestión, energética, análisis.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:



Índice

| | |
|---|----|
| Índice de figuras | 6 |
| Índice de tablas | 8 |
| Glosario | 9 |
| Introducción..... | 11 |
| Alcance y objetivo | 13 |
| 1. Estado del arte | 14 |
| 1.1. Concepto de batería..... | 14 |
| 1.2. Marco histórico | 16 |
| 1.3. ¿Cómo funciona una batería de litio? | 18 |
| 1.4. Especificaciones de las baterías ion-litio | 22 |
| 2. Tipos de instalaciones domésticas | 25 |
| 2.1. Instalaciones aisladas (off-grid)..... | 25 |
| 2.2. Instalaciones conectadas a la red (on-grid)..... | 26 |
| 2.3. Instalaciones híbridas..... | 27 |
| 2.4. Posibles configuraciones de conexión a red | 29 |
| 2.5. Sistema de emergencia <i>back-up</i> o caja de respaldo | 29 |
| 3. Sistema de gestión de baterías (BMS) | 32 |
| 3.1. ¿Qué es el BMS?..... | 32 |
| 3.2. ¿Por qué las baterías de litio tienen sistema de gestión? | 33 |
| 3.3. Importancia del BMS | 33 |
| 3.4. Factores de control..... | 35 |
| 3.4.1. Gestión de la protección eléctrica: Corriente | 35 |
| 3.4.2. Gestión de la protección eléctrica: Voltaje..... | 36 |
| 3.4.3. Gestión de la protección térmica: Temperatura..... | 38 |
| 3.4.4. Gestión de la capacidad de carga..... | 39 |
| 3.5. Visión global del BMS | 41 |
| 4. Relación baterías-tarifas eléctricas..... | 44 |
| 4.1. Análisis del mercado eléctrico y sus tarifas..... | 44 |
| 4.2. Adición de generación renovable..... | 49 |
| 4.3. ¿Cómo pueden las baterías ayudar a mitigar los precios de la energía?..... | 49 |
| 4.4. Periodos ideales de carga y descarga..... | 52 |



| | | |
|--------|--|----|
| 5. | Comportamiento carga-descarga de baterías..... | 54 |
| 5.1. | Comportamiento de la batería dentro del intervalo de carga | 54 |
| 5.2. | Comportamiento de la batería fuera del intervalo de carga | 55 |
| 6. | Estudio de una instalación tipo | 56 |
| 6.1. | Condiciones de la instalación..... | 56 |
| 6.2. | Estudio de necesidades de la instalación | 57 |
| 6.3. | Selección de componentes | 58 |
| 6.3.1. | Sistema fotovoltaico | 58 |
| 6.3.2. | Regulador de carga | 59 |
| 6.3.3. | Inversor..... | 61 |
| 6.3.4. | Baterías | 61 |
| 6.4. | Resultados finales | 62 |
| 7. | Perspectivas de futuro | 65 |
| 8. | Conclusiones | 66 |
| | Bibliografía..... | 68 |



Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Configuración de las celdas de una batería. Fuente: [3] | 14 |
| Figura 1.2. La pila eléctrica de Alessandro Volta. Fuente: [6]..... | 16 |
| Figura 1.3. Uso global de baterías ion-litio. Fuente: [8]..... | 17 |
| Figura 1.4. Esquema del funcionamiento batería ion-litio. Fuente: [12]..... | 18 |
| Figura 1.5. Estructura y funcionamiento batería ion-litio. Fuente: [14]..... | 19 |
| Figura 1.6. Energía específica de las baterías de plomo, níquel y litio. Fuente: [16]..... | 21 |
| Figura 1.7. Energía por masa y carga específica del litio, cadmio y plomo. Fuente: [12] .. | 23 |
| Figura 1.8. Crecimiento de dendritas en las baterías de litio-metal. Fuente: [17]..... | 24 |
| Figura 2.1. Instalación aislada (off-grid). Fuente: [20] | 25 |
| Figura 2.2. Instalación conectada a red (on-grid). Fuente: [20] | 27 |
| Figura 2.3. Instalación híbrida. Fuente: [20] | 28 |
| Figura 2.4. Sistema back-up para cargas críticas. Fuente: [25]..... | 30 |
| Figura 3.1. Módulo sistema de gestión de baterías. Fuente: [26]..... | 32 |
| Figura 3.2. Balance energético en baterías ion-litio. Fuente: [28] | 34 |
| Figura 3.3. Rango de corriente típico de una célula ion-litio. Fuente: [26]..... | 36 |
| Figura 3.4. Rango tensión células de litio. Fuente: [29]..... | 37 |
| Figura 3.5. Rango de temperaturas células de litio. Fuente: [26]..... | 38 |
| Figura 3.6. Balance del voltaje de un conjunto de celdas. Fuente [26]..... | 39 |
| Figura 3.7. Control y monitorización de las células. Fuente: [26] | 40 |
| Figura 3.8. Proceso de equilibrado del SOC de las células. Fuente: [26] | 41 |
| Figura 3.9. Rango de acción del BMS. Fuente: [30] | 43 |
| Figura 4.1. Funcionamiento del sistema marginalista. Fuente: [32] | 44 |
| Figura 4.2. Tarifa con discriminación horaria antigua. Fuente: [34]..... | 46 |
| Figura 4.3. Tarifa con discriminación horaria actual. Fuente: [37]..... | 48 |
| Figura 4.4. Precio horario de la electricidad a día 13/06/22. Fuente: [38] | 48 |
| Figura 4.5. Configuración para tarifa eléctrica con discriminación horaria. Fuente: [36] .. | 50 |
| Figura 4.6. Configuración para el intervalo de carga de la batería. Fuente: [36]..... | 51 |
| Figura 6.1. Disposición de los módulos solares. Fuente: Resultados del estudio | 59 |
| Figura 6.2. Regulador de la instalación. Fuente: Resultados del estudio | 60 |
| Figura 6.3. Inversor de la instalación. Fuente: Resultados del estudio | 61 |



| | |
|---|----|
| Figura 6.4. Batería de la instalación. Fuente: Resultados del estudio | 62 |
| Figura 6.5. Esquema de vivienda hipotética. Fuente: Elaboración propia | 63 |
| Figura 6.6. Visión global de la instalación. Fuente: Resultados del estudio | 64 |
| Figura 7.1. Escaneo de baterías metal-litio mediante rayos X. Fuente: [45]..... | 65 |



Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Geometría de las celdas de una batería. Fuente: [4]..... | 15 |
| Tabla 1.2. Características técnicas de las principales baterías de litio en el mercado. Fuente: [16] | 20 |
| Tabla 3.1. Rangos tensión células de litio. Fuente: [29]..... | 37 |
| Tabla 4.1. Periodos horarios de la electricidad respecto a su demanda y precio..... | 47 |
| Tabla 4.2. Parámetros de configuración en SunnyPortal. Fuente: [36]..... | 51 |
| Tabla 4.3. Recomendaciones de programación con tarifa con discriminación horaria. Fuente: Elaboración propia..... | 53 |
| Tabla 6.1. Características geográficas de la instalación. Fuente: [41] | 56 |
| Tabla 6.2. Lista de consumos eléctricos de la vivienda. Fuente: Elaboración propia..... | 57 |
| Tabla 6.3. Características de los módulos solares. Fuente: Resultados del estudio | 58 |
| Tabla 6.4. Simbología del esquema eléctrico. Fuente: Elaboración propia | 63 |



Glosario

En este apartado se recoge una serie de términos como siglas, símbolos o acrónimos con sus correspondientes significados, siendo su objetivo la posibilidad de consulta durante la lectura la clarificación.

EV - Electric Vehicle; vehículos totalmente eléctricos.

HEV - Hibrid Electric Vehicle, vehículos con una mecánica combinada de combustión y eléctrica.

Ah - Amperio-Hora; unidad de carga eléctrica a través de terminales de una batería durante una hora.

kWh - kilovatio-hora; unidad de energía (kW) por período de tiempo (hora).

Li-Ion - Lithium-Ion; tecnología fabricación de baterías que basa su funcionamiento en los iones de litio.

PPA - Power Purchase Agreement; convenio recíproco de compraventa de energía entre cliente y comercializadora.

BMS - Battery Management System; sistema inteligente de gestión de baterías para el control de la seguridad y rendimiento de una unidad de almacenamiento.

SOA - Safe Operating Area; condiciones de funcionamiento donde debe trabajar un dispositivo para evitar ser dañado.

SOC - State of Charge; medida de la cantidad de energía disponible en una batería en un momento determinado expresada en tanto por cien (%).

NiMh - Níquel-Hidruro Metálico; tipo de pila recargable formado por un ánodo de oxihidróxido de níquel (NiOOH) y un cátodo una aleación de hidruro metálico (Mh).

TUR - Tarifa de Último Recurso; tarifa eléctrica entre el consumidor y una comercializadora que mediante un contrato establece el suministro de electricidad a precios fijados.



CC - Corriente Continua; corriente eléctrica constante que fluye en un sentido único.

CA – Corriente Alterna; corriente eléctrica que circula periódicamente fluctuando en ambos sentidos de un circuito, negativo y positivo.



Introducción

El desarrollo humano en los últimos siglos ha alcanzado unas dimensiones nunca antes vistas, adquiriendo un ritmo exponencial en las últimas décadas. Este proceso socioeconómico ha catapultado los avances tecnológicos con el fin de continuar mejorando la calidad de vida humana, a la vez que aproxima a límites todavía por descubrir. Como consecuencia del notable crecimiento, se hace cada vez más notorio la necesidad de evolucionar energéticamente y a nivel de recursos. Y es que, en un mundo tan “electrificado” como el actual, en el que desde en el trabajo hasta el ocio se puede encontrar el uso de energía eléctrica; surge la necesidad de optimizar al máximo los recursos que generamos para poder seguir prestando servicios a la población.

El progreso ha creado una sociedad nómada, buscando la expansión y liberando a las personas de las costumbres estacionarias. Por ello, miles de aviones, millones de coches y billones de personas se mueven diariamente, portando, en muchos casos; un elemento en común a todos ellos, una batería. Desde el motor de arranque de un coche hasta los pequeños auriculares de bolsillo comparten sistemas almacenamiento de energía. Esta elevada producción de dispositivos ha aumentado la demanda de fuentes de energía portátiles que puedan abastecer las necesidades actuales.

Asimismo, la investigación en nuevos sistemas capacitivos comienza a adquirir una importancia vital de cara a la búsqueda de la autonomía y eficiencia energética. En los tiempos que corren, con subidas de precios descontroladas tanto en combustibles como en energía eléctrica, el ciudadano de a pie está indefenso ante las abusivas condiciones de las grandes multinacionales. Como una posible respuesta ante este problema, surge la idea del autoabastecimiento energético del hogar, promovido por la generación de energía renovable propia. De esta manera, se consigue suministrar la electricidad consumida diariamente por la vivienda, cumpliendo los crecientes objetivos de sostenibilidad mientras se generan beneficios económicos para el núcleo familiar.

Esta idea autárquica requiere de un meticuloso análisis tanto de sistemas de producción eléctrica como de almacenamiento de energía, siendo esta última el principal objeto de estudio de este trabajo. Numerosos son los parámetros a investigar para maximizar el



rendimiento de una batería eléctrica, y es que cada detalle de la misma importa, desde los procesos de fabricación hasta los ciclos de carga y descarga producidos. Por ello, se analizarán los sistemas de control y monitorización presentes en las baterías domésticas con el objetivo de alcanzar su máxima eficiencia y prolongar su vida útil.



Alcance y objetivo

El estudio busca mostrar la situación actual de los sistemas de almacenamiento tras su desarrollo tecnológico, el cual ha destacado sobre todo en las últimas décadas. Los avances en baterías han permitido la incorporación de estos dispositivos en el ámbito particular, ofreciendo a los usuarios la posibilidad de evolucionar energéticamente hacia una vivienda más eficiente y sostenible. Para lograrlo, se expondrán las diferentes tecnologías actuales de baterías, ofreciendo un estudio más exhaustivo sobre la batería de ion-litio. El análisis engloba las diversas técnicas de control implantadas para la gestión eficiente de las baterías, buscando cuales son los puntos más importantes a supervisar. Además, se muestran las diferentes configuraciones que podrían optimizar los procesos de carga de las baterías, logrando un mayor aprovechamiento de la energía acompañado con un ahorro económico sustancial. Así, el objetivo principal es el acercamiento de las tecnologías de baterías y sus componentes, que convierten a las instalaciones en una excelente opción energética, tanto económicamente como ecológicamente.

1. Estado del arte

1.1. Concepto de batería

“Las baterías o también denominadas pilas eléctricas, son dispositivos que convierten energía química en energía eléctrica por un proceso químico transitorio llamado reacción redox (reducción-oxidación) [1].”

En temas de terminología y como curiosidad, en castellano se ha acostumbrado a denominar a estos artefactos como pilas primarias y a los de tipo recargable o secundarias como baterías. Estos términos provienen de las primeras investigaciones sobre la electricidad, donde juntaban varios elementos llamados celdas para la creación de los prototipos [1].

Las celdas son, en realidad, pequeñas pilas que conectadas entre sí formando un módulo, que, a su vez, varios módulos conforman una batería en su totalidad [2]. Véase la *Figura 1.1*, la cual contiene ejemplos de celdas y módulos de la marca coreana LG Chem.

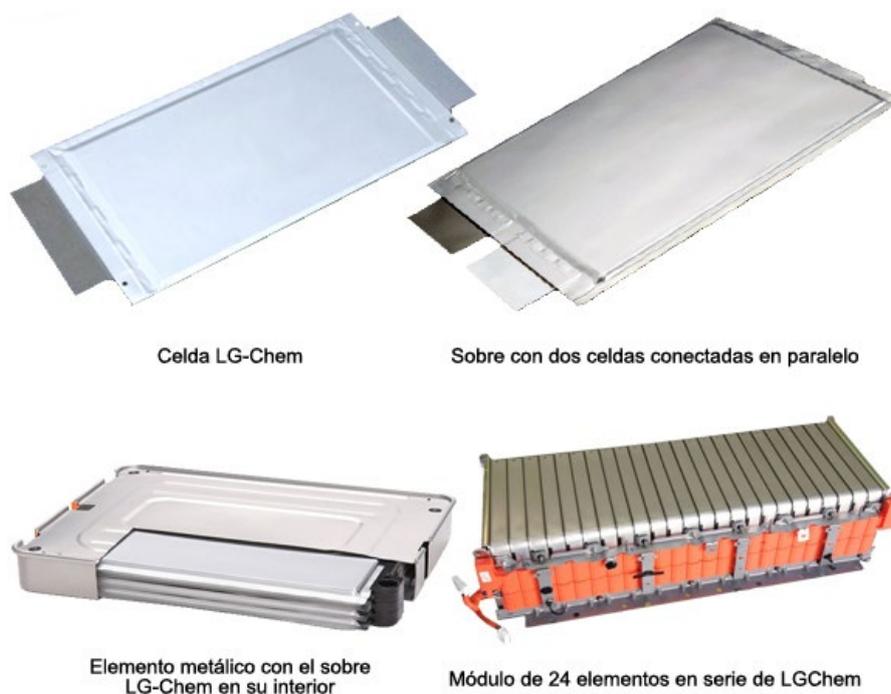


Figura 1.1. Configuración de las celdas de una batería. Fuente: [3]

Estas pequeñas unidades de almacenamiento pueden ser diseñadas de diferentes maneras en función de los ámbitos y aplicaciones en los que se vayan a implementar. Por ello, su forma dependerá de las prestaciones que se estén procurando, como la disipación de calor, la resistencia física o el costo económico de fabricación (*Figura 1.2*).

Tabla 1.1. Geometría de las celdas de una batería. Fuente: [4]

| GEOMETRÍA | CILÍNDRICA | PRISMÁTICA | TIPO BOLSA |
|---------------------------------|---|--|---|
| Aspecto |  |  |  |
| Disipación térmica | Reducida área externa, menor disipación | Elevada área externa, mayor disipación | |
| Densidad del empaquetado | Baja | Elevada | Elevada |
| Rigidez estructural | Robusta | Robusta | Vulnerable |
| Costo | Bajo | Elevado | Bajo |

Primeramente, las celdas se disponían apiladas una encima de otro para más tarde ser adosadas lateralmente en “batería”, dando origen a su nombre. En la actualidad, el término “batería” se sigue utilizando mayoritariamente, sobre todo cuando nos referimos a almacenamiento de energía, aunque realmente se usan indistintamente ambos nombres para su identificación [1].

1.2. Marco histórico

En 1799, aparece el primer diseño de pila eléctrica por el químico y físico italiano Alessandro Volta. Sus investigaciones se centraron en la electricidad haciendo uso de metales gracias a la experiencia de su amigo Luigi Galvani, el que diseccionando una rana con dos utensilios de metálicos; observó la contracción de un músculo del animal. Volta relacionó el fenómeno con la aparición de una corriente eléctrica, motivándole a estudiar el efecto hasta conseguir diseñar y demostrar el funcionamiento del primer prototipo de batería de la historia [5]. Véase *Figura 1.2*.

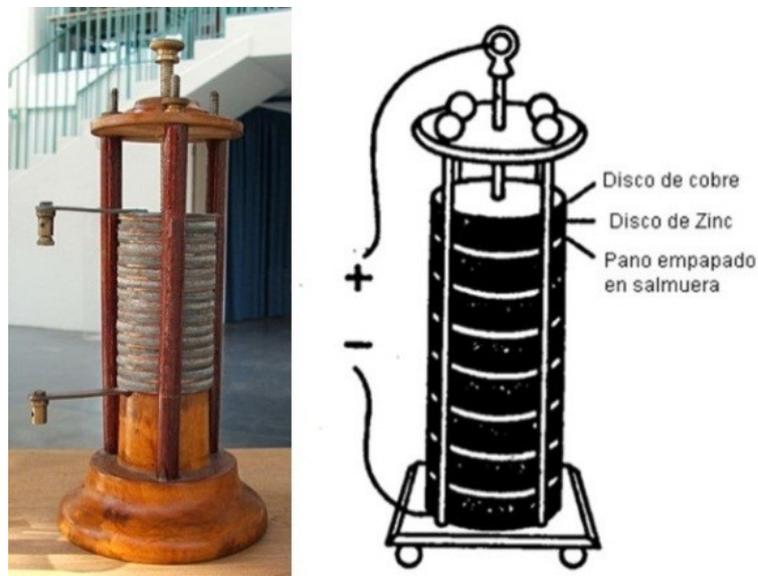


Figura 1.2. La pila eléctrica de Alessandro Volta. Fuente: [6]

Seguidamente, en 1803 destaca el alemán Johann Wilhelm Ritter, gracias al diseño de un acumulador eléctrico para el cual en su momento no se encontró aplicación práctica, debido a que todavía no existían dispositivos en los que se pudieran implementar.

Unas décadas después, en 1860, Gaston Planté comenzó a trabajar en el diseño del primer acumulador de plomo-ácido con la intención de crear un invento servible de cara a usos reales, sin lograr su objetivo.

Más adelante, en 1879 el modelo de Planté comenzó a estudiarse como una potencial batería, pasando por un intenso proceso de mejoras y rectificación de errores, el cual llegaría hasta la actualidad tras superar diversas adversidades en el camino. Por otra parte, Thomas Alva Edison diseñó un tipo diferente de acumulador de energía, hecho con electrodos de hierro y

níquel. Este prototipo empezó a aparecer en el mercado a partir de 1908, constituyendo la sólida base de los modelos alcalinos, como se conocen hoy en día. Muchas décadas después, en la época de los 90 se diseñó la batería de níquel y cadmio; el cual reemplazaría los ánodos de hierro por ánodos de cadmio [1].

Cada tipo tienen sus ventajas y, por consiguiente, también sus inconvenientes; los cuales se intentan solventar con diseños adecuados a su categoría. Sin embargo, en la actualidad, las baterías de litio junto probablemente con las de hidruro metálico son las que están adquiriendo un mayor protagonismo en el mercado global. Esto es debido a su gran potencial tecnológico, incentivando su investigación y motivando el desarrollo a nivel mundial [7].

Tan destacable ha sido su trayectoria y evolución en el mercado actual, que actualmente los podemos encontrar en la gran mayoría de ámbitos tecnológicos que necesitan una batería como fuente de almacenamiento de energía, desde pequeños dispositivos electrónicos hasta vehículos de transporte eléctricos de uso público o particular. Véase *Figura 1.3*.

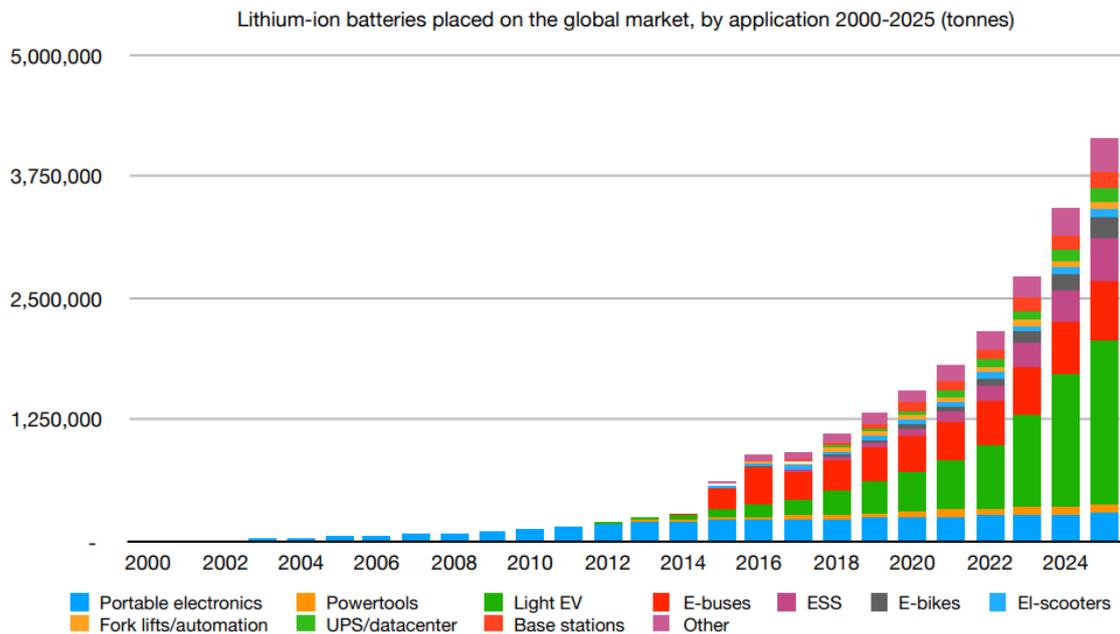


Figura 1.3. Uso global de baterías ion-litio. Fuente: [8]

Como tema principal de estudio se seleccionarán las punteras baterías de litio entre las posibilidades actuales del mercado, detallándose a continuación las características que han hecho que se decantase la balanza a su favor.

1.3. ¿Cómo funciona una batería de litio?

Las baterías de iones de litio funcionan de manera similar a una batería tradicional. Sin embargo, cuentan con una ventaja muy destacable frente al resto: la energía entregada es máxima en todo momento, independientemente de la cantidad de carga restante en la batería. En cambio, en el caso de una batería de plomo ácido clásica, la capacidad de conducción del dispositivo disminuye proporcionalmente a la carga de la batería, afectando a la potencia y energía entregada [9].

Este tipo de baterías tienen una peculiaridad en su funcionamiento; los iones de litio. Estas partículas están cargadas eléctricamente, de manera que no son neutros, habiendo perdido electrones a través del llamado proceso de ionización. Como resultado, los iones tendrán una carga positiva y se les podrá identificar como Li^+ , adquiriendo el símbolo “+” como vestigio de la pérdida de un electrón [10]. Como consecuencia el litio no será estable, siendo los iones muy reactivos y tendiendo a combinarse con otros iones, átomos o moléculas a través de interacciones electrostáticas [11].

A continuación, se muestran y describen los procesos de carga y descarga de una batería de ion-litio a través del esquema incluido en la *Figura 1.4*.

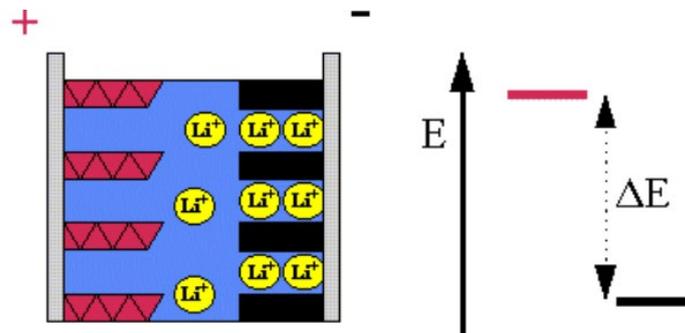


Figura 1.4. Esquema del funcionamiento batería ion-litio. Fuente: [12]

Durante el proceso de descarga, los iones de litio (representados en amarillo) se desplazan espontáneamente debido a una diferencia de potencial del electrodo negativo o ánodo (negro) a través del electrolito (azul) hacia el electrodo positivo o cátodo (rojo). El electrolito es el medio físico que permite el paso de iones, sin embargo, no el de electrones. Ante esta barrera, los electrones circulan del ánodo al cátodo a través del camino paralelo por el cual si pueden fluir: el circuito eléctrico. Proporcionalmente a la descarga, el potencial eléctrico

(E) de ambos electrodos va variando, disminuyendo la diferencia de potencial entre ellos y, consecuentemente el voltaje de la celda (ΔE) a medida que se extrae la carga eléctrica (Q) de la batería.

Durante la carga, ocurre el proceso contrario, se transportan electrones desde el cátodo o electrodo positivo hasta el ánodo o electrodo negativo. De esta manera, el ánodo se hace cada vez más negativo por la presencia de electrones y el cátodo más positivo por la falta de los mismos, aumentando la diferencia de potencial entre ellos, es decir, el propio voltaje de la celda. Al mismo tiempo, este proceso fuerza a los iones de litio a abandonar el electrodo positivo y volver al electrodo negativo [7].

El movimiento de los iones mediante el electrolito y el de los electrones por el circuito eléctrico son procesos interconectados y dependientes el uno del otro. En caso de que uno de ellos se detenga, el otro lo hará en consecuencia. Por ejemplo, si los iones se dejasen de mover debido a una descarga completa de la batería, el movimiento de electrones tampoco se produciría en el circuito eléctrico, perdiéndose la energía. Del mismo modo, si se apaga el dispositivo que la batería está alimentando, el flujo de electrones se detiene y por lo tanto también el de iones [13].

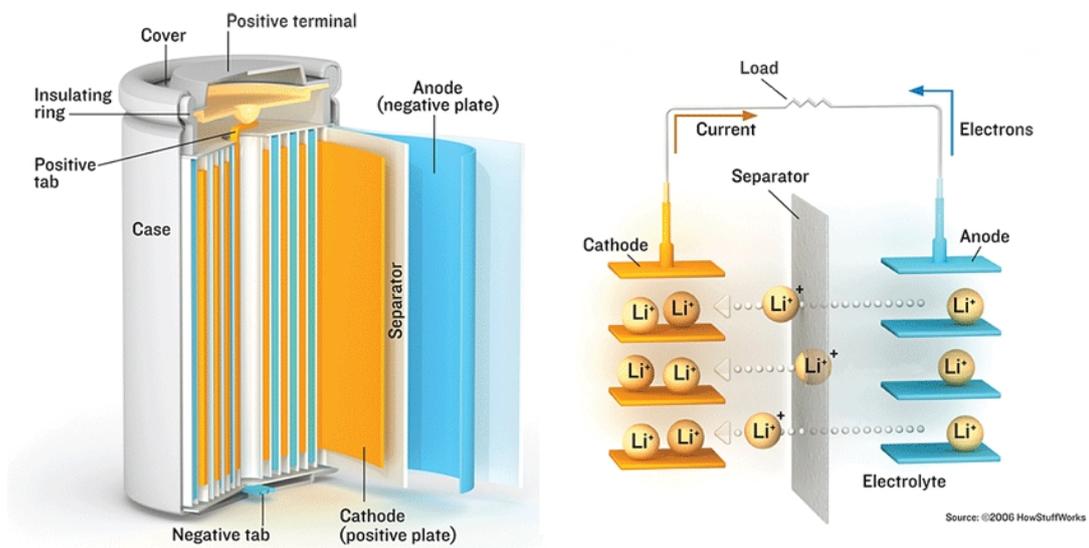


Figura 1.5. Estructura y funcionamiento batería ion-litio. Fuente: [14]

Este proceso ocurre en las múltiples celdas de una pila o batería, las cuales habitualmente están formadas por una estructura de láminas metálicas que se alternan el papel de ánodo y cátodo (Figura 1.5).

Además, en las baterías secundarias o recargables la reacción es reversible. Esto implica que, tras haberse descargado, la batería puede volver recargarse un número de ciclos determinado en función de su vida útil.

“Como ventaja respecto a máquinas térmicas o motores de combustión que se basan en el ciclo de Carnot, las pilas no están sujetas a las limitaciones impuestas por la segunda ley de la termodinámica, siendo, por lo tanto, energéticamente más eficientes [15].”

El ánodo, el cátodo y el electrolito como partes principales de la celda electroquímica puede ser fabricadas utilizando diferentes materiales, lo que derivará en una gama variopinta de propiedades eléctricas y energéticas. En la siguiente *Tabla 1.2* se sintetizan las principales baterías actualmente junto con sus aplicaciones más comunes.

Tabla 1.2. Características técnicas de las principales baterías de litio en el mercado.

Fuente: [16]

| Tipo de batería de litio | Voltaje nominal | Energía específica | Ciclos de vida | Aplicaciones |
|--|------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Litio y óxido de cobalto (LiCoO₂) - LCO | 3.60 V | 150 - 200 Wh/kg | 500-1000 | Móviles, portátiles, tabletas |
| Óxido de litio y manganeso (LiMn₂O₄) — LMO | 3.8 V | 100 - 150 Wh/kg | 300-700 | Herramientas, dispositivos médicos |
| Litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto (LiNiMnCoO₂) — NMC | 3.7 V | 150 - 220 Wh/kg | 1000-2000 | EVs, scooters, bicicletas |
| Litio fosfato de hierro (LiFePO₄) — LFP | 3.3 V | 90 - 120 Wh/kg | > 2000 | EVs, scooters, herramientas |
| Litio, níquel, cobalto y óxido de aluminio (LiNiCoAlO₂) — NCA | 3.6 V | 200 - 260 Wh/kg | 500 | EVs |
| Titanato de litio (Li₂TiO₃) — LTO | 2.40 V | 50 - 80 Wh/kg | 3000-7000 | EVs, baterías solares y de emergencia |

En la siguiente ilustración, *Figura 1.6*, se presenta gráficamente una comparativa de baterías en términos de energía específica. Sin embargo, existen otras propiedades de igual importancia. Cabe destacar la superioridad del LMO y el LFP en cuanto a estabilidad térmica, factor clave en específicos ámbitos tecnológicos. Por otra parte, en el área de motores de vehículos eléctricos, la seguridad y la vida útil ganarán terreno sobre la capacidad, convirtiéndose el LCO en el favorito de la familia de baterías ion-litio.

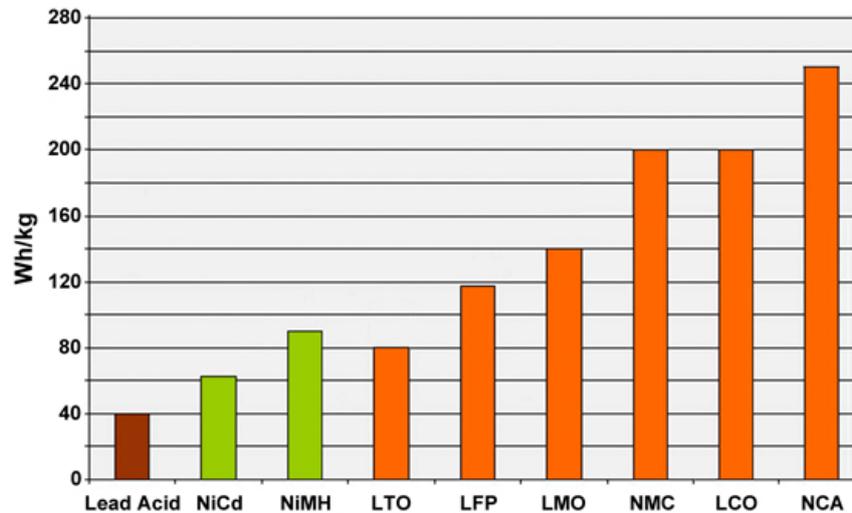


Figura 1.6. Energía específica de las baterías de plomo, níquel y litio. Fuente: [16]

Como vencedor de la comparación en términos de energía específica destaca el NCA, siendo compensado con su bajo número de ciclos de vida.

Como se remarcó antes, una batería está formada por una o más celdas conectadas en serie, en paralelo o bien una combinación de ellas en función de las características eléctricas resultantes deseadas y de la capacidad de almacenamiento a alcanzar. Los parámetros voltaje teórico o potencial estándar de dichas celdas depende en gran medida de los materiales usados en su fabricación y puede estimarse a partir de los potenciales estándar de las diferentes configuraciones de electrodos ya estudiadas. Por definición, la capacidad teórica de una celda depende directamente de la cantidad de material reactivo (litio) que contiene, siendo expresado en Ah (Amperio-hora) o culombios (C) y determina la cantidad total de energía eléctrica comprendida en la reacción electroquímica.

A partir del voltaje y la capacidad teóricos, es posible calcular el valor máximo de energía que, teóricamente, la celda es capaz de proporcionar. El valor teórico de la energía de una



celda o bien de la batería se expresa en relación al volumen (densidad energética) o al peso (energía específica).

$$E_{\text{teórica}} [\text{Wh}] = V_{\text{teórico}} [\text{V}] \times C_{\text{teórica}} [\text{Ah}] \quad (1.1)$$

A fines prácticos, la energía que proporciona una unidad de almacenamiento real es menor que la energía teórica debido a la consideración del peso o volumen del electrolito y demás componentes empleados en su fabricación. Por otra parte, la batería nunca llega a descargarse hasta un voltaje nulo ni los materiales reactivos son ideales, no estando totalmente equilibrados desde el punto de vista de la estequiometría. Como resultado, el valor de energía específica resultante se ve reducida en las baterías y celdas reales. La cantidad de energía a almacenar en una batería va a depender en gran medida de los materiales de manufacturación y sus dimensiones: a mayor energía a acumular, mayor tamaño y cantidad de materiales son necesarios [15].

1.4. Especificaciones de las baterías ion-litio

Las baterías de Li-Ion (iones de litio) dotan de una elevada densidad energética junto con un buen rendimiento en altas temperaturas y, además, suelen ser reciclables. Las ventajas más destacables son su reducido efecto de memoria, elevada potencia específica (W/kg) y una alta energía específica (Wh/kg), además de una larga vida útil. Estas propiedades sitúan estas baterías como una excelente opción para usos en sistemas de carga y descarga habitual como pueden ser los vehículos eléctricos e híbridos (HEVs y EVs) o el uso doméstico para el abastecimiento de viviendas, entre otros. [15]

En cuanto a la naturaleza física del litio, destaca su ligereza, coronándose como el elemento metálico más ligero de la naturaleza (*Figura 1.4*). Esta relevante característica no le limita en absoluto de aportar una alta capacidad específica (*Figura 1.5*). Así, el litio permite producir la misma cantidad de energía con un peso mucho menor al de otros metales utilizados en la construcción sistemas de almacenamiento.

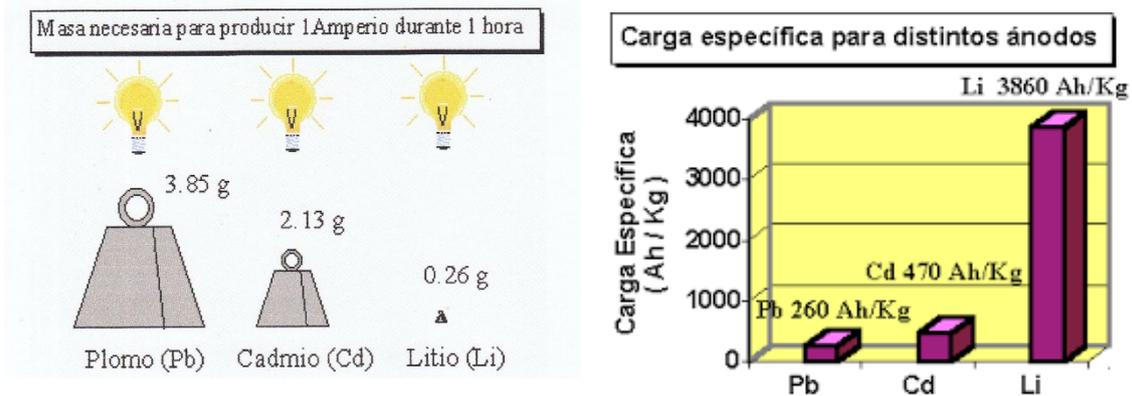


Figura 1.7. Energía por masa y carga específica del litio, cadmio y plomo. Fuente: [12]

Cuando el ánodo de metal de litio se combina con el cátodo de un óxido de metal de transición particular, la celda electroquímica resultante alcanza unos rangos de voltaje más alta que otras configuraciones, contribuyendo a dotar a la batería de una elevada densidad energética.

Por otra parte, la tecnología de litio es una de las más versátiles, con aplicaciones comerciales en una amplia variedad de áreas, desde baterías pequeñas y finas para aplicaciones portátiles hasta baterías de alto rendimiento para vehículos automóviles y hogares. Además, la principal diferencia con el plomo y el cadmio es que los materiales que forman las baterías de litio más avanzadas no suponen un problema respecto a una posible contaminación del ambiente.

Los primeros prototipos de baterías de litio generalmente usaban óxidos o sulfuros metálicos capacitivos como cátodo para almacenar o liberar iones de litio de manera reversible durante la carga y descarga de la pila.

Para poder llegar a ser realmente útiles y funcionales, este tipo de baterías de litio, tuvieron que superar una serie de inconvenientes y problemas. El principal obstáculo para la comercialización de baterías recargables derivaba de una propiedad intrínseca del material: la gran reactividad del litio metálico. Esto podría resultar en graves problemas de seguridad asociados al crecimiento de dendritas en el litio del cátodo durante los reiterados procesos de carga (Figura 1.6). Las dendritas son microestructuras irregulares que aparecen de forma descontrolada pudiendo provocar cortocircuitos o explosiones. Dicho fenómeno se convirtió en una de las mayores causas de problemas de funcionamiento y seguridad para los usuarios.

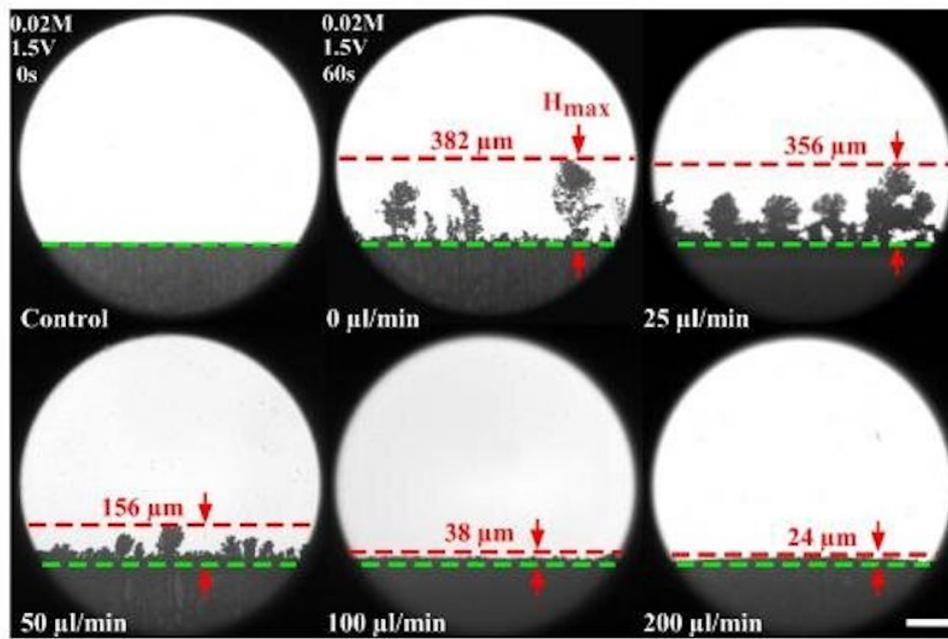


Figura 1.8. Crecimiento de dendritas en las baterías de litio-metal. Fuente: [17]

Gracias a la investigación y el desarrollo, estos problemas se resolvieron satisfactoriamente introduciendo variaciones tecnológicas de las versiones previas: las actuales baterías de iones de litio y el uso de electrolitos de polímero plástico mucho menos reactivos que su previa versión líquida. Así, al ánodo no lo conforma el metal de litio como anteriormente, en su defecto se usan materiales mucho más seguros, siendo un ejemplo el grafito, almacenando los iones de litio de manera mucho menos reactiva que anteriormente, sin una notable disminución de su densidad energética [7].

Como todo, también tiene inconvenientes que conviene remarcar y es que, a causa de las reacciones químicas del litio y su naturaleza, las pilas de ion litio no soportan sobrecargas, pudiendo resultar dañadas con facilidad si la monitorización y el control sobre las celdas no es la adecuada, siendo un problema presente en la seguridad. Con el objetivo de evitar estas críticas fallas, las baterías comerciales suelen incorporar sistemas de control y protección en la propia batería. Se consigue así una protección activa que regula los voltajes carga y descarga, desconectando las celdas pertinentes en el caso de que se den intervalos de sobrecargas o temperaturas excesivas [15].

2. Tipos de instalaciones domésticas

2.1. Instalaciones aisladas (off-grid)

Se trata de una instalación totalmente independiente de la red eléctrica pública, sin contar con una conexión a la misma y por lo tanto no se abastecen de su electricidad. Estas instalaciones a menudo se dan en lugares remotos donde no llega la línea eléctrica como por ejemplo pueblos adentrados en las montañas. Suelen contar con una potente fuente de energía renovable, mayoritariamente placas fotovoltaicas para la generación de energía. Los módulos fotovoltaicos producen electricidad en corriente continua, que se almacena fácilmente en las baterías, pero que debe convertirse en corriente alterna a través de un inversor para su uso en el hogar [18]. Véase *Figura 2.1*.

En estos sistemas es imprescindible contar con baterías de una capacidad adecuada para poder almacenar la energía y poder utilizarla durante las noches o periodos de fenómenos atmosféricos desfavorables como los días nublados, lluviosos o de nieve [19].



Figura 2.1. Instalación aislada (off-grid). Fuente: [20]



En este tipo de instalaciones, es bastante frecuente la existencia de generador adicional diésel para compensar la intermitencia de energía solar y suplir las necesidades del hogar (*Figura 2.1*).

La eficiencia en la carga de la batería es muy importante en instalaciones aisladas para no desperdiciar la valiosa energía generada. Además, las baterías necesitan una elevada potencia para alimentar el inversor que en el caso de las instalaciones conectadas a red es alimentado con electricidad de la red pública [21].

En los sistemas no conectados a la red, los inversores están diseñados para alimentar directamente las cargas eléctricas de la vivienda a través del centro de carga ante la falta de la regulación de la red pública. Esto requiere un dimensionamiento diferente de los inversores en función de la tecnología de inversores utilizada, siendo en general un tipo de instalación con un nivel de complejidad mayor [18].

2.2. Instalaciones conectadas a la red (on-grid)

Este tipo de instalaciones cuenta también con generación de energía renovable normalmente solar, siendo la principal diferencia la conexión a la red eléctrica pública. Este hecho permite a las viviendas llegar a cubrir todos los consumos en caso de no disponer de energía propia a través de la compra de electricidad a una empresa de servicios energéticos. La principal fuente de alimentación durante el día son los módulos fotovoltaicos y en su defecto, la red eléctrica. Por este motivo, no se dispondrá de baterías de almacenamiento, sino que se alternará la generación de energía solar con la electricidad proporcionada por la red, implicando en una inversión inicial de menor costo. Este sistema se suele implementar en edificios comerciales o residenciales que generan la mayor parte de su consumo durante el día [20].

ON GRID

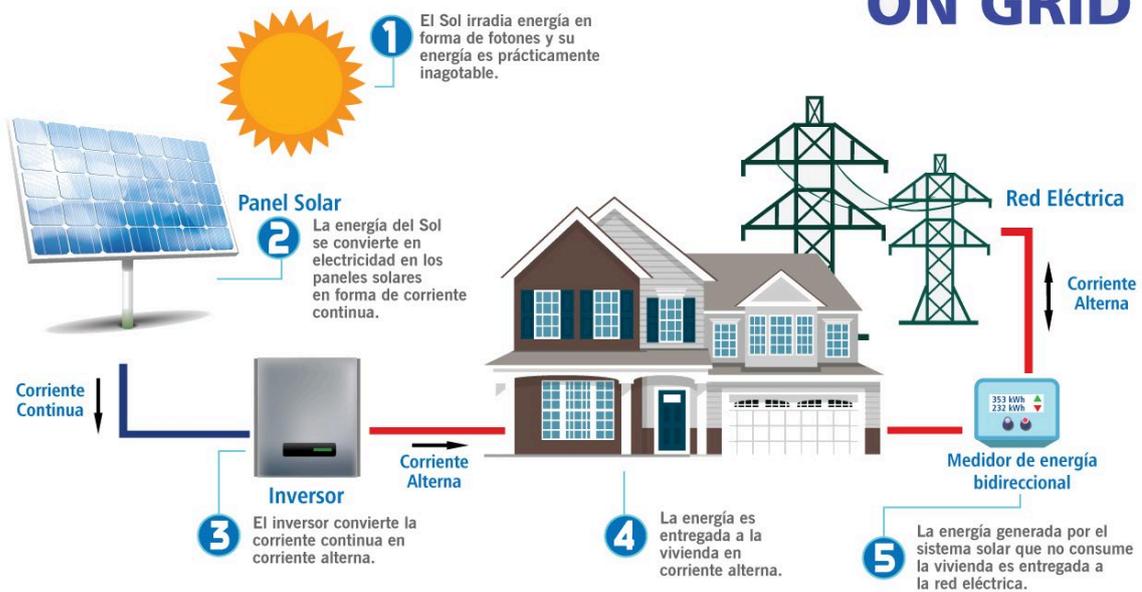


Figura 2.2. Instalación conectada a red (on-grid). Fuente: [20]

En este caso, los sistemas de regulación y control de la corriente como el inversor, son alimentados directamente por la red eléctrica, generando una dependencia de la misma. Sin la electricidad proporcionada de la red no será posible aprovechar la energía que está siendo generada ya que el inversor y las baterías no se encuentran en funcionamiento [18].

2.3. Instalaciones híbridas

Estas instalaciones constan con un sistema energético híbrido mediante energía renovable y generalmente conexión a la red pública pero además cuentan con un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías eléctricas. Durante las horas de irradiación solar, los paneles fotovoltaicos serán la fuente de abastecimiento de los consumos de la vivienda de forma directa, es decir desde la captación de la energía solar en las placas hasta su uso en los electrodomésticos, tras haber pasado las pertinentes conversiones eléctricas.

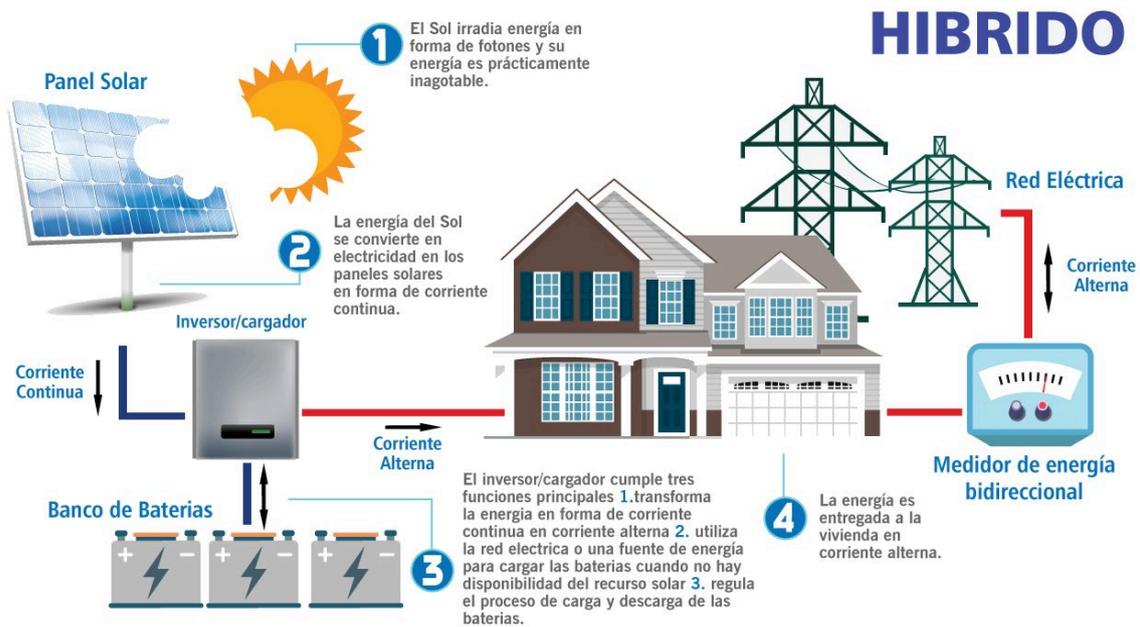


Figura 2.3. Instalación híbrida. Fuente: [20]

En caso de que la producción solar sea elevada y exista un excedente, esta energía se redireccionará a las baterías siendo almacenada para su uso en horas de poca actividad solar, aprovechando eficientemente la energía producida. Además, en caso de no ser suficiente, el sistema de baterías también podrá ser cargado a través de la red pública. En este caso, las horas nocturnas con menor coste por kWh se consideran preferentes para lograr un ahorro económico notable y poder disponer de energía eléctrica almacenada [22].

Diferentes configuraciones son posibles desde la selección de la fuente de alimentación de las baterías en determinados momentos hasta el establecimiento de periodos de carga y carga en función de las necesidades y precios de la red pública. Estas posibilidades serán tratadas más profundamente en el *Capítulo 4*.



2.4. Posibles configuraciones de conexión a red

En caso de las instalaciones conectadas a red, tanto los sistemas *on-grid* como los sistemas híbridos disponen de dos posibilidades respecto al flujo de energía eléctrica que conecta la vivienda con la red pública.

▪ CONTRATO DE COMPRA

Son los servicios más comunes entre la comercializadora y el cliente. Se trata de un acuerdo a través del cual la compañía eléctrica vende su energía a modo de suministro eléctrico al cliente. Existen diferentes tipos de contratos en función de las necesidades de la instalación, tema que será tratado en el *Capítulo 4*.

▪ CONTRATO DE COMPRAVENTA

También como PPA (Power Purchase Agreement), es un convenio recíproco que además de incluir la compra de electricidad por parte del cliente, también permite la venta de energía renovable producida por parte de la vivienda. Esta situación se daría cuando la producción renovable supera a la demanda energética del hogar y se decide inyectar la energía en la red, de manera análoga al suministro por parte de la red hacia el hogar. El kWh es vendido a un precio preestablecido y como resultado los usuarios finales verán reflejado los beneficios en forma de descuento en la factura eléctrica mensual [23].

2.5. Sistema de emergencia *back-up* o caja de respaldo

A nivel de funcionamiento es imprescindible destacar que las baterías solamente logran su funcionamiento conectadas al inversor, encargado de transformar y dirigir la electricidad producida por los paneles solares. Sin este elemento, las baterías pueden disponer de energía eléctrica en su interior, pero no es posible extraerla para su uso.

Como norma general, el inversor está conectado directamente a la red eléctrica, por lo que un corte en el suministro, resultará en una caída y como consecuencia una parada en el sistema. A pesar de que las placas solares mantendrían su producción, no sería posible transformar la energía debido a la falta del inversor, resultando en la pérdida de la misma.

Un sistema de emergencia o back-up podrá reiniciar la actividad del inversor y con ello el aprovechamiento de la generación solar, proporcionando energía directa a la vivienda, además de reactivar la disponibilidad de las baterías y utilizar su electricidad en caso de necesitarla.

Como excepción, puede existir la posibilidad de que el inversor no se abastezca a través de la red, sino a través de las placas fotovoltaicas directamente, tratándose de una instalación fuera de red. Estas instalaciones aisladas suelen darse en lugares donde no hay acceso a la electricidad y por tanto la vivienda no tendrá conexión a la red eléctrica pública. Esta condición supone la imposibilidad de comprar/vender electricidad proveniente de la misma, pero a su vez estar exentos de las repercusiones de los fallos en la red [24].

En la *Figura 3.1* se muestra un breve esquema de conexiones para una instalación con un sistema de emergencia diseñado para poder suplir las necesidades energéticas esenciales de la vivienda en caso de fallo en la red.

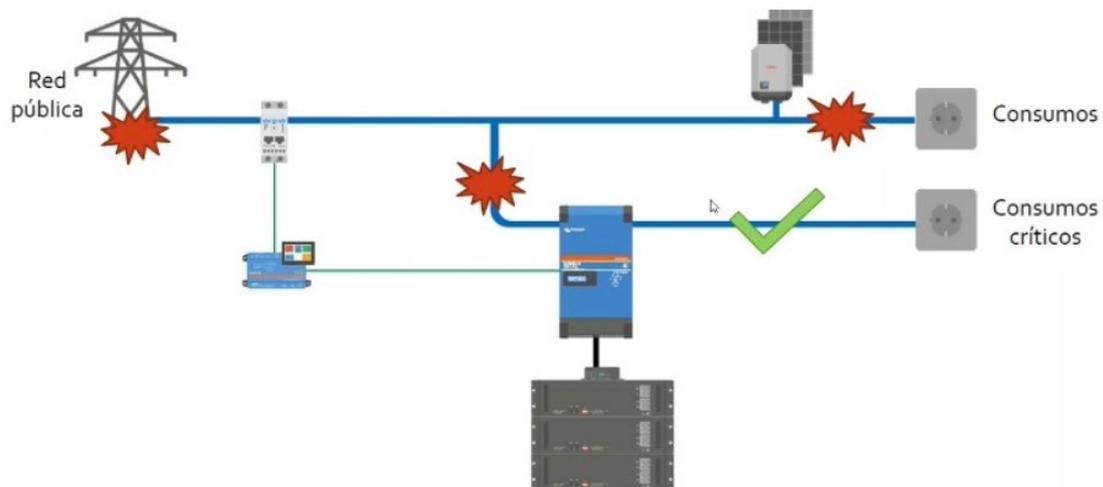


Figura 2.4. Sistema back-up para cargas críticas. Fuente: [25]

Esta energía para el funcionamiento del *back-up* provendría de la producción de las placas solares durante el día. Por la noche o en caso de no ser suficiente la irradiación solar en el momento del apagón, serán las baterías las encargadas de suministrar la electricidad para el iniciar el sistema de emergencia.



Este sistema es clave de cara al abastecimiento en casos de caída del funcionamiento de la red eléctrica, permitiendo a la batería actuar de manera autónoma como fuente de energía durante un tiempo limitado. Gracias a este sistema de *back-up* y baterías, se podrá garantizar una autonomía finita, abasteciendo el hogar para el uso de electrodomésticos más imprescindibles mientras se reestablece el suministro de la red eléctrica [24].

3. Sistema de gestión de baterías (BMS)

Tras haber visto los posibles entornos donde la incorporación de una batería podría resultar una idea potencialmente rentable, toca adentrarse en el funcionamiento de los sistemas de baterías. Como se ha expuesto en el *Capítulo 1*, las baterías de litio son una de las tecnologías más punteras en el ámbito del almacenamiento de energía, no obstante, para lograr un correcto funcionamiento que garantice tanto eficiencia como seguridad; es necesaria la monitorización y control del sistema de la mano del BMS.

3.1. ¿Qué es el BMS?

El BMS (Battery Management System) o sistema de gestión de baterías es un componente inteligente que tiene como objetivo el control y gestión avanzada del sistema de almacenamiento; podría equipararse con la función del cerebro en el cuerpo humano. Su papel es crucial e imprescindible a nivel de seguridad, rendimiento, flujos de carga y longevidad.



Figura 3.1. Módulo sistema de gestión de baterías. Fuente: [26]



3.2. ¿Por qué las baterías de litio tienen sistema de gestión?

Primeramente, conviene fijarse en el propio material, siendo el litio utilizado en las baterías Li-Ion (iones de litio) más activo que el plomo de una batería tradicional plomo-ácido, tanto, que el litio del electrodo negativo es combustible. Por lo tanto, para lograr la misma seguridad que una batería de plomo-ácido, la celda de la batería de litio necesitaría un separador o una carcasa. El dispositivo se hace más fuerte y más grueso, por lo que la batería de litio sería más pesada y más grande incluso que la de plomo-ácido. Esto contrarrestaría una de las propiedades más destacadas de las baterías de litio, su ligereza. Por ello, los fabricantes no permiten que esto suceda, incorporando habitualmente el BMS.

Mayoritariamente, las baterías de litio tienen más ventajas que otros tipos de baterías, sin embargo; su calidad está afectada por materiales y los actuales procesos de fabricación de celdas. Considerando estas causas, pueden llegar a causar desde ciertas resistencias internas no deseadas hasta variaciones de capacidad y de voltaje entre las propias celdas de la batería. Como consecuencia, en aplicaciones reales, las celdas pueden verse afectadas por una disipación heterogénea de calor o cargas y descargas excesivas. Como consecuencia, con el paso del tiempo, es probable que las baterías en malas condiciones de trabajo se deterioren con anterioridad y la vida útil general de la batería se vea considerablemente reducida.

Por último, si la batería se encuentra en un estado de sobrecarga grave, existe el peligro de explosión, dañando no sólo el paquete de baterías, sino que podría amenazar la propia seguridad personal [27].

3.3. Importancia del BMS

La seguridad funcional es uno de los factores críticos de un BMS. Es fundamental durante la operación de carga y descarga, para evitar que el voltaje, la corriente y la temperatura de cualquier célula o módulo bajo control de supervisión superen los límites definidos del SOA (Safe Operating Area). Si se superan los límites durante un periodo de tiempo, no sólo se pone en peligro el dispositivo de baterías potencialmente caro, sino que podrían producirse peligrosas condiciones de fuga térmica.

Además, los límites del umbral de tensión también se controlan rigurosamente para lograr la protección de las células y una operabilidad segura. Si la batería de iones de litio permanece en este estado de bajo voltaje, podrían crecer dendritas en el ánodo, lo que puede dar lugar a elevadas tasas de autodescarga y plantear posibles problemas de seguridad.

La alta densidad energética de los sistemas alimentados con iones de litio supone un alto riesgo en caso de fallo, dejando poco margen de error a la gestión de la batería. Gracias a los sistemas de gestión de baterías (BMS) y a las mejoras introducidas en las baterías de iones de litio, estas unidades de almacenamiento son una de las baterías más exitosas y seguras que existen en la actualidad.

El rendimiento del conjunto de baterías es la siguiente característica más importante de un BMS, implicando gestión eléctrica y térmica. Para optimizar eléctricamente la capacidad total de la batería, es necesario que todas las celdas estén equilibradas, lo que implica que el SOC (State of Charge) de las celdas adyacentes en todo el conjunto sea aproximadamente equivalente. Esto es excepcionalmente importante porque no sólo se puede conseguir una capacidad óptima de la batería, sino que ayuda a evitar la degradación general y reduce los posibles puntos calientes por la sobrecarga de las celdas débiles.

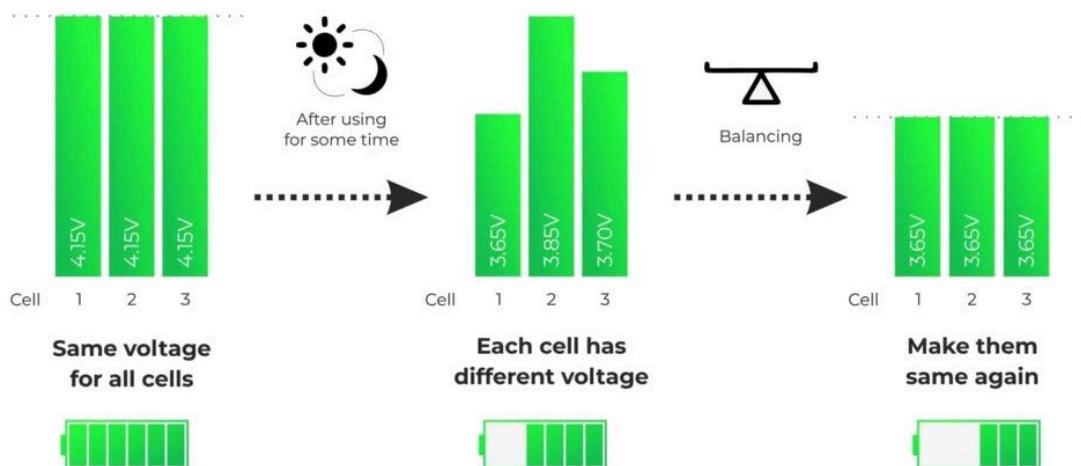


Figura 3.2. Balance energético en baterías ion-litio. Fuente: [28]

Las baterías de iones de litio deben evitar descargarse por debajo de los límites de baja tensión, ya que esto puede provocar efectos de memoria y una importante pérdida de capacidad.



Por otra parte, los procesos electroquímicos de las baterías son muy susceptibles a la temperatura. Cuando la temperatura ambiental desciende, la capacidad y la energía disponible de la batería disminuyen considerablemente. Por lo tanto, un BMS puede activar un calentador externo en línea que reside, por ejemplo, en el sistema de refrigeración líquida de un paquete de baterías, o encender las placas de calentamiento residentes que están instaladas debajo de los módulos, dependiendo del caso. Además, dado que la carga de células de iones de litio frías es perjudicial para el rendimiento de la batería, es importante elevar primero la temperatura de la batería lo suficiente. La mayoría de las celdas de iones de litio no pueden cargarse rápidamente cuando están a menos de 5°C y no deben cargarse en absoluto cuando están por debajo de 0°C.

Para obtener un rendimiento óptimo durante el uso operativo típico, la gestión térmica del BMS garantiza que una batería funcione dentro de una estrecha región de funcionamiento (por ejemplo, 20 - 25°C). Esto protege el rendimiento, prolonga la vida útil y fomenta un paquete de baterías saludable y fiable [26].

3.4. Factores de control

Hay muchas características de diseño del BMS, siendo, como se ha visto anteriormente la gestión de la protección y la gestión de la capacidad, dos características esenciales de los sistemas de baterías.

A continuación, se expone el análisis y funcionamiento de estas indispensables propiedades. La gestión de la protección de las baterías tiene dos ámbitos clave: la protección eléctrica, que implica no permitir que la batería se dañe mediante el uso fuera de su SOA, y la protección térmica, que implica el control de la temperatura para mantener o reconducir la batería a su rango seguro de operabilidad.

3.4.1. Gestión de la protección eléctrica: Corriente

La supervisión de la corriente del paquete de baterías y de los voltajes de las celdas o módulos es el camino hacia la protección eléctrica. El SOA eléctrico de cualquier célula de la batería está limitado por la corriente y el voltaje. La *Figura 3.3* muestra un SOA típico de

una célula de iones de litio, donde un BMS bien diseñado protegerá la batería impidiendo el funcionamiento fuera de los valores nominales de la célula del fabricante. En muchos casos, se puede aplicar una reducción de potencia adicional para permanecer dentro de la zona de seguridad del SOA con el fin de aumentar la vida útil de la batería.

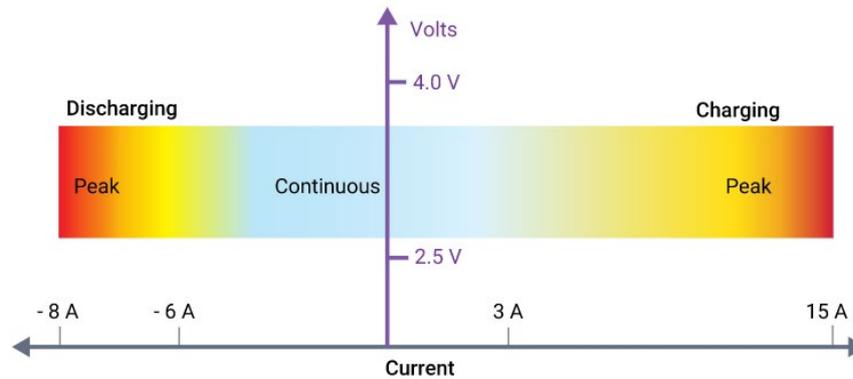


Figura 3.3. Rango de corriente típico de una célula ion-litio. Fuente: [26]

Las celdas de iones de litio tienen límites de corriente diferentes para la carga que, para la descarga, pudiendo ambos modos manejar corrientes de pico más altas, aunque durante períodos de tiempo reducidos. Sin embargo, esto puede ser precedido para tener en cuenta un cambio repentino de las condiciones de carga; por ejemplo, un cúmulo de dispositivos de alta potencia como puede ser el horno y la lavadora funcionando simultáneamente.

Un BMS puede incorporar la monitorización de la corriente de pico permitiendo esa corriente y, tras un tiempo determinado, decidir reducir la corriente disponible o interrumpir la corriente desde la batería por completo. Esto permite al BMS poseer una sensibilidad casi instantánea a los picos de corriente extremos, como una condición de cortocircuito que no ha sido detectada por ningún otro sistema de protección, pero también tolerar las demandas de picos elevados, siempre que no sean excesivos ni durante demasiado tiempo.

3.4.2. Gestión de la protección eléctrica: Voltaje

Una célula de iones de litio debe funcionar dentro de un determinado rango de tensión. Estos límites del SOA vendrán determinados en última instancia por la química intrínseca de la célula seleccionada y la temperatura de las células en un momento dado. Además, dado que

cualquier sistema de baterías experimenta una cantidad significativa de ciclos de corriente, procesos de descarga y carga de diferentes fuentes de energía, estos límites de voltaje SOA suelen estar más restringidos para optimizar la vida útil de la batería. El BMS debe saber cuáles son estos límites y tomará decisiones basadas en la proximidad a estos umbrales. Por ejemplo, al acercarse al límite de alto voltaje, un BMS puede solicitar una reducción gradual de la corriente de carga, o puede solicitar que la corriente de carga se termine por completo si se alcanza el límite. Por otro lado, al acercarse al límite de baja tensión, el BMS solicitará que las principales cargas activas infractoras reduzcan sus demandas de corriente. Por supuesto, el BMS debe dar la máxima prioridad a las consideraciones de seguridad para los dispositivos conectados, al tiempo que protege el paquete de baterías para evitar daños permanentes.

A continuación, en la *Figura 3.4* se muestra un ejemplo de una célula de ion-litio (LiFePO₄) que trabaja a una tensión nominal de 3.20 V, distinguiéndose tres rangos de funcionamiento (*Tabla 2.1*).

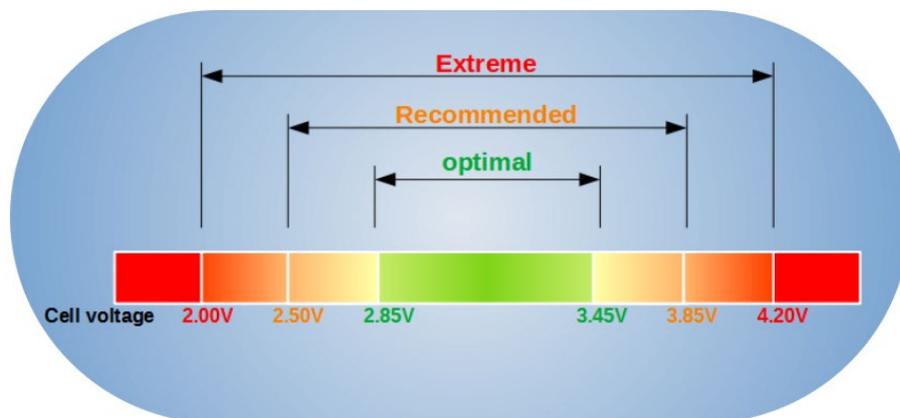


Figura 3.4. Rango tensión células de litio. Fuente: [29]

Tabla 3.1. Rangos tensión células de litio. Fuente: [29]

| Rango | Descripción |
|--------------------|---|
| Extremo | Límites hacia el deterioro grave de las células |
| Recomendado | Recomendación típica del fabricante |
| Óptimo | Prolonga la vida útil de la celda |

3.4.3. Gestión de la protección térmica: Temperatura

A primera vista, puede parecer que las pilas de iones de litio tienen un amplio rango de temperaturas de funcionamiento, pero la capacidad general de la batería disminuye a bajas temperaturas porque las tasas de reacción química se ralentizan notablemente. Con respecto a la capacidad a bajas temperaturas (*Figura 3.5*), funcionan mucho mejor que las baterías de plomo-ácido o NiMh (Níquel-Hidruro Metálico); sin embargo, la gestión de la temperatura es esencial debido a que la carga por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ es físicamente problemática. Durante la carga por debajo de la temperatura de congelación, puede producirse el fenómeno de la capa de litio metálico en el ánodo. Se trata de un daño permanente que no sólo provoca una reducción de la capacidad, sino que las células son más vulnerables a los fallos si se someten a vibraciones u otras condiciones de estrés. Un sistema BMS puede controlar y estabilizar la temperatura del paquete de baterías mediante el calentamiento y la refrigeración.

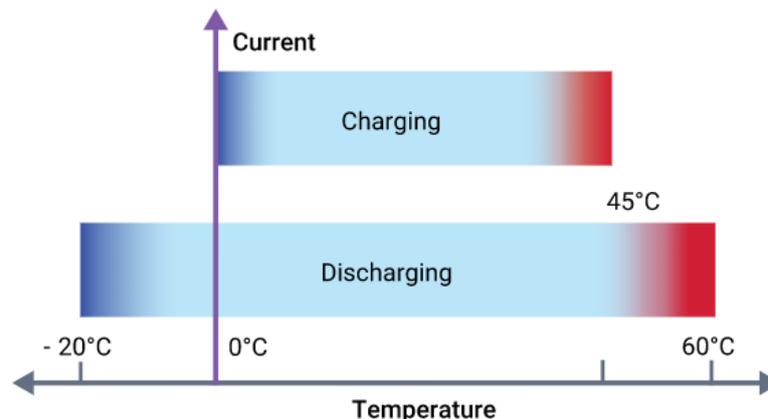


Figura 3.5. Rango de temperaturas células de litio. Fuente: [26]

En cuanto al calentamiento, como norma general suele ser más eficaz conectar la batería a una fuente de alimentación externa que lleve a cabo el acondicionamiento térmico de las celdas, ya que un suministro de energía por parte de la batería podría reducir considerablemente la capacidad de la misma.

Por otra parte, la vida de la batería también puede sufrir un envejecimiento y degradación prematuros si se expone continuamente a una generación excesiva de calor. La refrigeración es especialmente vital para minimizar la pérdida de rendimiento de una batería de iones de litio. Por ejemplo, una batería determinada que funcione de forma óptima a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; en caso

de aumentar la temperatura a 30 °C, su rendimiento podría reducirse hasta un 20%. También, si se carga y recarga continuamente a 45°C, la pérdida de rendimiento podría aumentar hasta un considerable 50%.

Como solución, se puede implementar un sistema termo-hidráulico, que calienta o enfría el refrigerante en función de las necesidades, bombeando y distribuyendo el fluido por todo el conjunto de baterías. El sistema de gestión de la batería supervisa las temperaturas en todo el conjunto, controlando varias válvulas para mantener la temperatura de toda la batería dentro de un estrecho margen de funcionamiento que garantiza un rendimiento óptimo de la misma.

3.4.4. Gestión de la capacidad de carga

El estado de carga (SOC) de una célula o módulo en un momento dado es proporcional a la carga disponible en relación con la carga total cuando está completamente cargada. La gestión de la capacidad del BMS consiste en equilibrar la variación del SOC en cada pila del conjunto de baterías (*Figura 3.6*). Dado que el SOC no es una cantidad directamente medible, se puede estimar mediante diversas técnicas, y el propio esquema de equilibrio se divide generalmente en dos categorías principales, pasiva y activa. Dependiendo de las características de diseño del BMS se decide cuál es el óptimo para el paquete de baterías en cuestión y su aplicación.

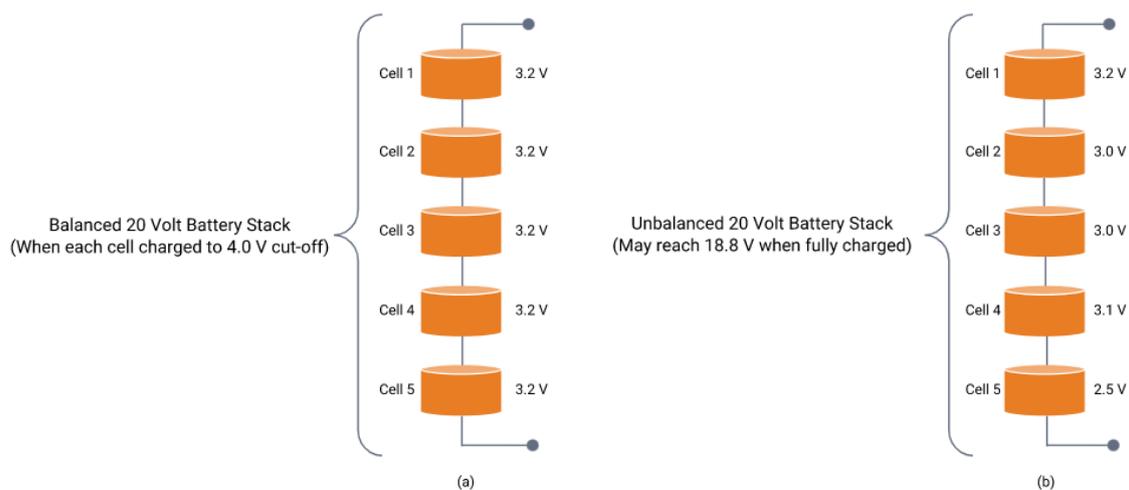


Figura 3.6. Balance del voltaje de un conjunto de celdas. Fuente [26]

El equilibrado pasivo es el más fácil de implementar, así como de explicar el concepto genera. El método pasivo permite que cada célula de la pila tenga la misma capacidad de carga que la célula más débil. Utilizando una corriente relativamente baja, transfiere una pequeña cantidad de energía de las células de alto SOC durante el ciclo de carga para que todas las células se carguen hasta su máximo SOC [26].

La *Figura 3.7* ilustra cómo la labor del BMS, el cual supervisa cada célula y aprovecha un interruptor de transistor y una resistencia de descarga (R_{dchg}) del tamaño adecuado en paralelo con cada célula. Cuando el BMS detecta que una célula determinada se está acercando a su límite de carga, dirige el exceso de corriente a su alrededor hacia la siguiente célula.

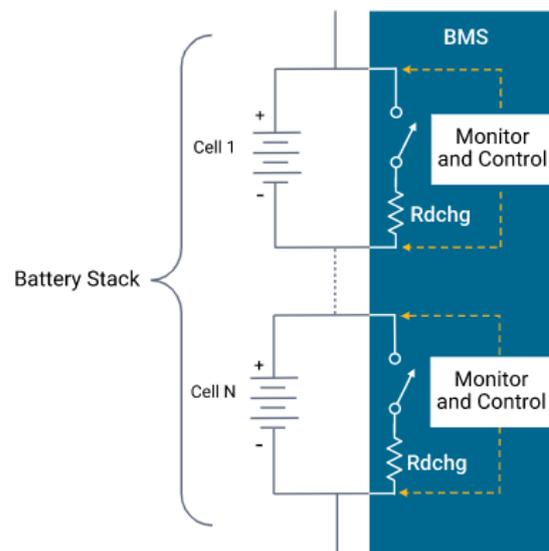


Figura 3.7. Control y monitorización de las células. Fuente: [26]

Los puntos finales del proceso de equilibrado, antes y después, se muestran en la *Figura 3.8*. En resumen, un BMS equilibra una pila de baterías permitiendo que una célula o módulo de la pila adopte una corriente de carga diferente a la del paquete de una de las siguientes maneras:

- Eliminación de la carga de las celdas más cargadas, lo que da margen para una corriente de carga adicional para evitar la sobrecarga, y permite que las celdas menos cargadas reciban más corriente de carga.

- Redirección de una parte o casi toda la corriente de carga alrededor de las células más cargadas, lo que permite que las células menos cargadas reciban corriente de carga durante más tiempo.

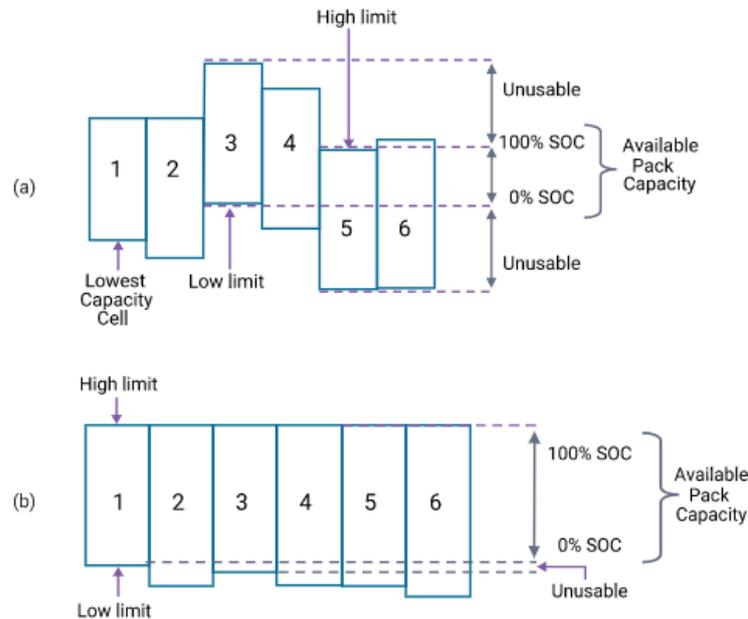


Figura 3.8. Proceso de equilibrado del SOC de las células. Fuente: [26]

3.5. Visión global del BMS

Un sistema completo de almacenamiento de energía en baterías, puede estar formado por decenas, cientos o incluso miles de celdas de iones de litio agrupadas estratégicamente, dependiendo de la aplicación. Estos sistemas pueden tener una tensión nominal de menos de 100 V, pero pueden llegar a los 800 V, con corrientes de alimentación del paquete que pueden llegar a los 300 A o más. Cualquier mala gestión de un pack de alta tensión podría desencadenar un desastre catastrófico que pusiera en peligro la vida de los usuarios. Por lo tanto, los sistemas de gestión de la energía (BMS) son absolutamente críticos para garantizar un funcionamiento seguro. Las ventajas de los BMS pueden resumirse a continuación.

Seguridad funcional. En el caso de los paquetes de baterías de iones de litio de gran formato, esto es especialmente prudente y esencial. Pero incluso los formatos más pequeños utilizados como por ejemplo los ordenadores portátiles, son conocidos por incendiarse y causar enormes daños. Por eso, la seguridad personal de los usuarios de cara a productos que



incorporan sistemas alimentados con iones de litio deja poco margen para el error en la gestión de las baterías.

Vida útil y fiabilidad. La gestión de la protección del paquete de baterías, eléctrica y térmica, garantiza que todas las celdas se utilicen dentro de los requisitos declarados del SOA. Esta delicada supervisión garantiza el cuidado de las celdas contra el uso agresivo y los ciclos de carga y descarga rápidos, dando como resultado un sistema estable que potencialmente proporcionará muchos años de servicio fiable.

Rendimiento y autonomía. La gestión de la capacidad del sistema de baterías BMS, en la que se emplea el equilibrio entre celdas para igualar el SOC de las celdas adyacentes, permite obtener una capacidad óptima de la batería. Sin esta función del BMS que tiene en cuenta las variaciones en la autodescarga, los ciclos de carga/descarga, los efectos de la temperatura y el envejecimiento general, un pack de baterías podría acabar siendo inútil.

Diagnóstico, recogida de datos y comunicación externa. Las tareas de supervisión incluyen el control continuo de todas las celdas de la batería, donde el registro de datos puede utilizarse por sí mismo para el diagnóstico, pero a menudo se destina a la tarea de cálculo para estimar el SOC de todas las celdas del conjunto. Esta información se aprovecha para los algoritmos de equilibrado, pero colectivamente puede transmitirse a dispositivos externos y pantallas para indicar la energía residente disponible, estimar la autonomía esperada o la autonomía/vida útil en función del uso actual, y proporcionar el estado de salud del conjunto de baterías.

Reducción de costes y garantía. La introducción de un BMS añade un coste inicial junto a los paquetes de baterías que son caros y también potencialmente peligrosos. Cuanto más complicado es el sistema, mayores son los requisitos de seguridad, lo que hace necesaria una mayor presencia de supervisión del BMS. Sin embargo, la protección y el mantenimiento preventivo de un BMS en lo que respecta a las propiedades vistas anteriormente garantizan la reducción de los costes globales a lo largo del tiempo [26].

Este completo sistema presente en las baterías es la clave del correcto funcionamiento, evitando rangos de utilización no recomendados que puedan perjudicar la batería, actuando sobre diversos parámetros técnicos como se muestra en la *Figura 3.9*.

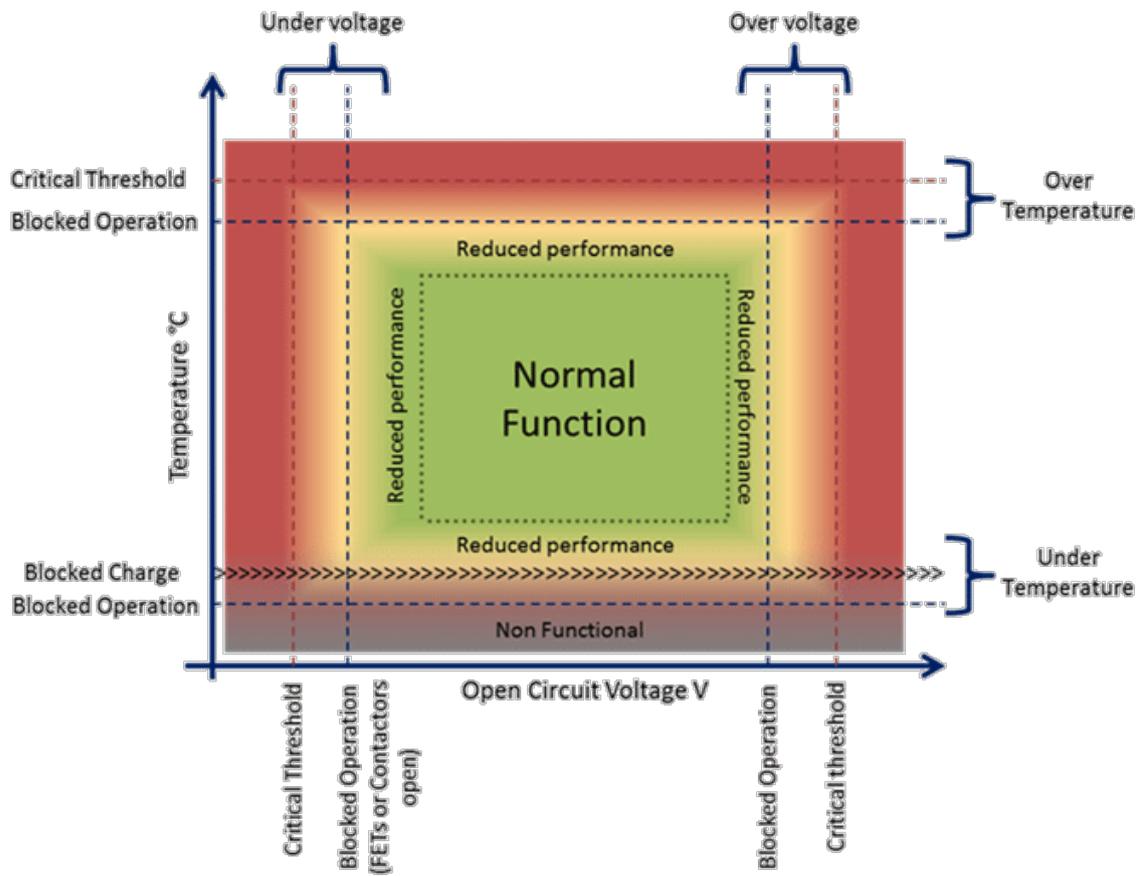


Figura 3.9. Rango de acción del BMS. Fuente: [30]

4. Relación baterías-tarifas eléctricas

4.1. Análisis del mercado eléctrico y sus tarifas

El mercado eléctrico en España funciona a través del llamado mercado marginalista, donde participan las grandes comercializadoras de energía, las cuales venden la electricidad a los pequeños consumidores (particulares y pequeñas empresas). Este tipo de mercado funciona en primer lugar proponiendo la oferta correspondiente a la energía generada y la demanda o energía necesitada en un determinado momento. En segundo lugar, se ordenan los precios de la oferta ascendentemente, empezando por la energía más barata hasta alcanzar la demanda del momento (véase *Figura 4.1*). Finalmente, se considera el último precio alcanzado como el precio a pagar a todos los proveedores de energía, aunque su coste de producción haya sido mucho menor. Este sistema provoca que las fuentes de energía que obtengan la electricidad a un precio más bajo como las energías renovables, estén ganando limpiamente la diferencia de precio respecto a la producción más cara como puede ser el gas [31].

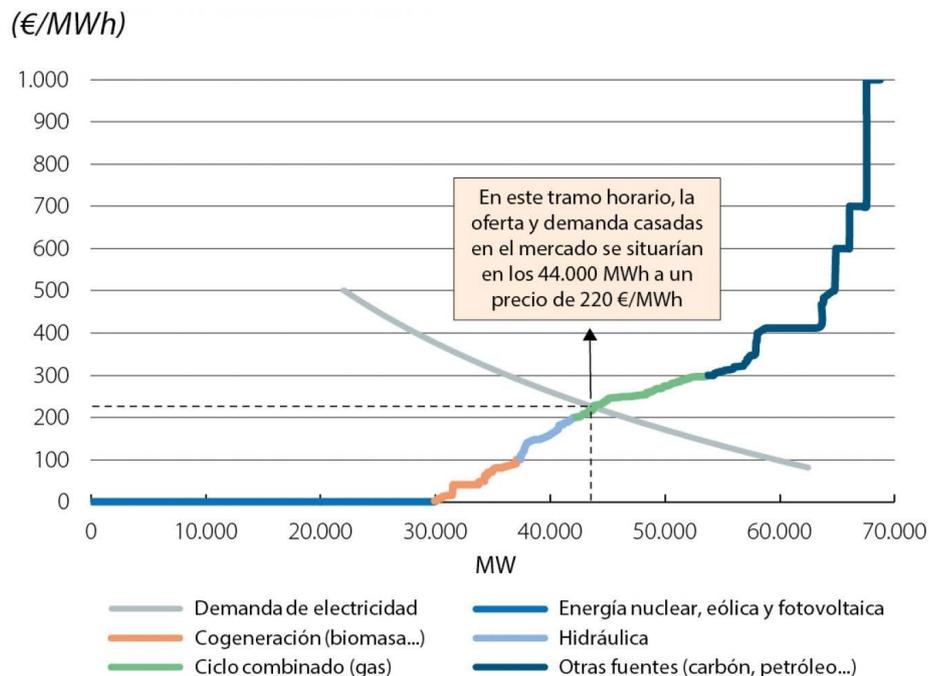


Figura 4.1. Funcionamiento del sistema marginalista. Fuente: [32]



Además, en este mercado existen dos opciones: un contrato entre los clientes con una de las comercializadoras de libre mercado o que estén supeditados a la Tarifa de Último Recurso (TUR). En la actualidad la gran mayoría de los hogares españoles, 16 millones de hogares, están sujetos a la TUR frente a los 9,3 millones han preferido llegar a acordar un contrato con las comercializadoras de libre mercado.

La Tarifa de Último Recurso o TUR implica que el consumidor tendrá un contrato con una de las comercializadoras de último recurso que le suministrará la electricidad a los precios fijados.

La tarifa TUR se caracteriza por sus dos modalidades: la tarifa sin discriminación horaria y la tarifa con discriminación horaria. La tarifa sin discriminación horaria es la tarifa constante, donde el precio no varía. Por otro lado, la tarifa con discriminación horaria es aquella que divide el día en horas valle y horas punta, donde el coste del kWh (kilovatio por hora) depende del momento del día.

Hasta hace unos pocos años, los precios de la electricidad se dividían en dos grandes periodos del día: tarifa diurna y tarifa nocturna.

Las horas punta se caracterizan por la mayor demanda de energía, siendo el momento del día con la electricidad más cara. Comprendían desde las 13:00 a las 23:00 horas en verano y desde las 12:00 hasta las 22:00 horas en la estación hibernal (tarifa diurna).

En caso de las horas valle, relacionadas con los precios más bajos del día, anteriormente se consideraban entre las 23:00 horas y las 13:00 en verano y entre las 22:00 y las 12:00 en invierno (tarifa nocturna).

Por tanto, aquellos consumidores que tenían la tarifa con discriminación horaria podían ahorrar dinero (hasta un 10%-15% según el Ministerio de Industria, Energía y Turismo), por ejemplo, haciendo uso de ciertos electrodomésticos de alto consumo durante las horas valle, mientras que en caso de la tarifa sin discriminación horaria se pagaría lo mismo sin importar el momento del día en el que se consuma [33].

Estos horarios pueden verse gráficamente expresados en la siguiente ilustración, *Figura 4.1*.

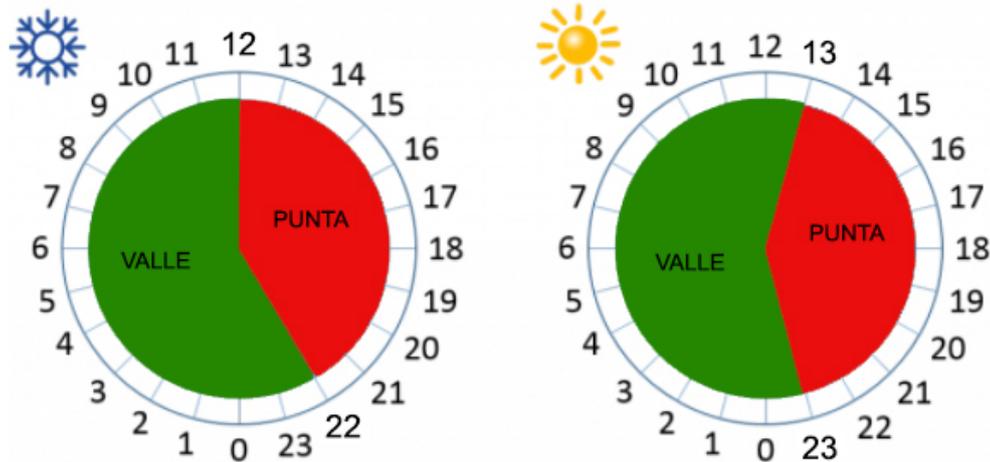


Figura 4.2. Tarifa con discriminación horaria antigua. Fuente: [34]

Sin embargo, la tarifa con discriminación horaria, antes llamada tarifa nocturna, ha sufrido una modificación de dos franjas horarias principales a tres, dependiendo de las horas del día y por lo tanto su precio. Esta determinación de franjas horarias más pequeñas donde varía del precio de la electricidad es debido principalmente a las fluctuaciones de la demanda de energía y el coste que supone la producción de la misma dependiendo de la hora del día [35].

De esta manera, en caso de que la electricidad sea más cara debido a un periodo de demanda más alto (tarifa punta) en comparación con una demanda más baja (tarifa valle), los clientes tenderán a consumir más electricidad cuando su coste sea más barato, evitando su uso cuando es más cara. Gracias a esto, la red eléctrica pública se regula a través de los clientes y su demanda, manteniéndose uniforme y estable automáticamente [36].

La tarifa con discriminación horaria actual fija tres precios diferentes para el kWh en cada una de las franjas horarias: la hora punta, la hora llana y la hora valle (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Periodos horarios de la electricidad respecto a su demanda y precio.

Fuente: [37]

| | Hora punta | Hora llana | Hora valle |
|----------------|------------------------------------|--|--------------|
| Demanda | Alta | Media | Baja |
| Precio | Alto | Medio | Bajo |
| Horario | 10:00 a 14:00 h 18:00 a 22:00 h | 8:00 a 10:00 h 14:00 a 18:00 h 22:00 a 00:00 h | 00 a 08:00 h |

Se puede considerar un símil con el tráfico en las carreteras, durante las horas punta se llenan de un denso tráfico, al igual que más consumidores hacen uso de la red eléctrica. La hora valle, en cambio, equivaldría a un tramo horario con limitada necesidad de desplazamiento, lo cual es aspectos energéticos se usaría la electricidad de una forma mucho más reducida.

La hora punta es por lo tanto la franja con el precio más alto por kWh. Así que, se recomienda no hacer uso de electrodomésticos de alto consumo de energía como la lavadora o el lavavajillas entre las 10 y las 14 horas o de 18 a 22 horas entre semana, evitando así los altos precios.

La hora llana está fijada entre las 8 y las 10 y de 14 a 18 horas, además de contar con un período al final de la jornada de 22 a 00 horas, constituyendo la franja horaria con precios medios por kWh.

El tramo horario con los precios de electricidad menos caros corresponde a la hora valle. Esta franja se da durante las 0 horas y las 8 de la mañana de lunes a viernes junto con los fines de semana y los festivos durante todo el día [35].

Estas franjas horarias con sus respectivos precios por kWh se muestran en la *Figura 4.2*.

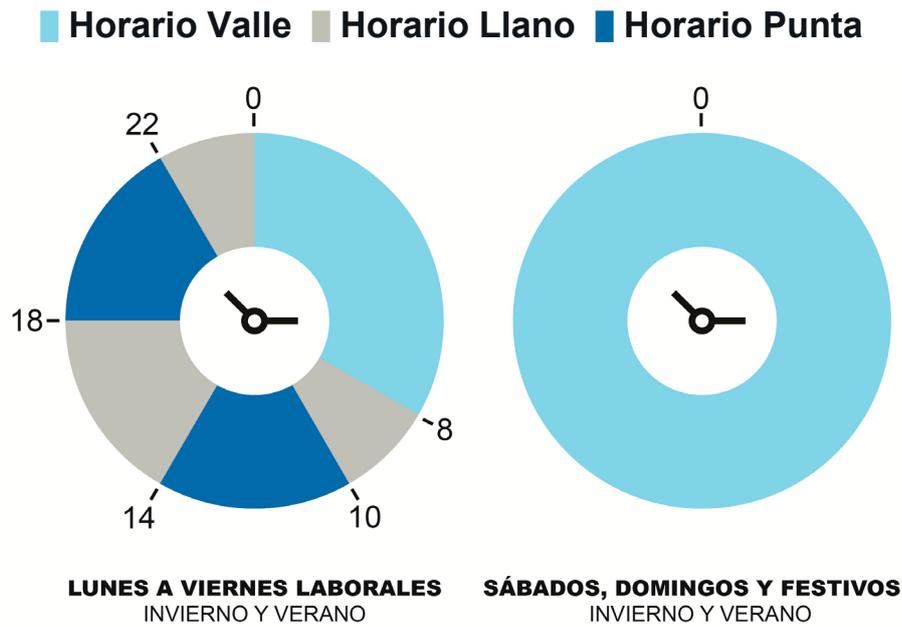


Figura 4.3. Tarifa con discriminación horaria actual. Fuente: [37]

Se llegan a alcanzar así grandes diferencias en el precio de la energía dependiendo del momento del día (Figura 4.3), lo que supondría un arma de doble filo para los usuarios. Por una parte, inflaría la tarifa mensual de consumo eléctrico, pero, por otra parte, gestionado de una manera eficiente, podría generar un ahorro sustancial para los núcleos familiares.

PRECIO DEL KWH DE LUZ POR HORAS

| | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 00h - 01h: 0.24682 €/kWh | 06h - 07h: 0.24549 €/kWh | 12h - 13h: 0.32048 €/kWh | 18h - 19h: 0.32229 €/kWh |
| 01h - 02h: 0.22803 €/kWh | 07h - 08h: 0.25461 €/kWh | 13h - 14h: 0.32077 €/kWh | 19h - 20h: 0.34371 €/kWh |
| 02h - 03h: 0.20911 €/kWh | 08h - 09h: 0.27384 €/kWh | 14h - 15h: 0.27171 €/kWh | 20h - 21h: 0.36315 €/kWh |
| 03h - 04h: 0.20815 €/kWh | 09h - 10h: 0.26611 €/kWh | 15h - 16h: 0.267 €/kWh | 21h - 22h: 0.36143 €/kWh |
| 04h - 05h: 0.21254 €/kWh | 10h - 11h: 0.31362 €/kWh | 16h - 17h: 0.26621 €/kWh | 22h - 23h: 0.31159 €/kWh |
| 05h - 06h: 0.21753 €/kWh | 11h - 12h: 0.31502 €/kWh | 17h - 18h: 0.2689 €/kWh | 23h - 24h: 0.29695 €/kWh |

EVOLUCIÓN DEL PRECIO DEL KWH HOY

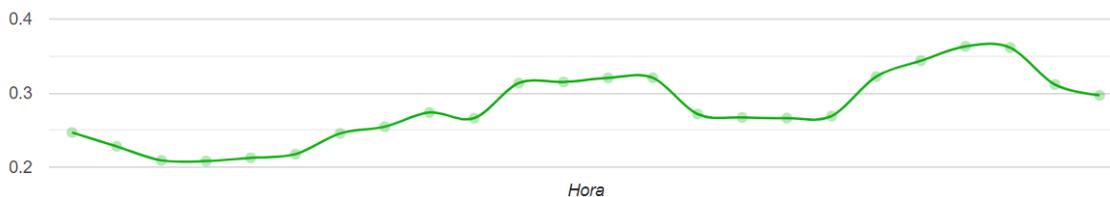


Figura 4.4. Precio horario de la electricidad a día 13/06/22. Fuente: [38]



4.2. Adición de generación renovable

Además de la recarga de las baterías a través de la energía suministrada por la red eléctrica, cada vez es más frecuente contar con instalaciones de producción de energía renovable en las viviendas. Así, se reduce drásticamente la dependencia sobre las compañías eléctricas, promoviendo el autoconsumo y beneficiándose del ahorro económico que conlleva.

El incremento de los precios de la electricidad en todo el mundo, unido al descenso de los precios de las tecnologías de generación renovable hace pensar que la paridad entre la electricidad de origen renovable y la obtenida de manera convencional que transporta la red eléctrica pueda alcanzarse en los próximos diez años en la Unión Europea. Este hecho, unido al progresivo descenso en las primas por inyección a red de la electricidad fotovoltaica o eólica y a la aparición de incentivos para promover el autoconsumo; hace de los sistemas de energías renovables particulares una inversión potencialmente rentable. Este aumento de la producción local no sólo tiene ventajas técnicas como puede ser reducir las pérdidas de transporte eléctrico y dar mayor estabilidad al sistema energético de la vivienda, sino que reduce el efecto económico que tienen las subidas de precios de la tarifa eléctrica en el usuario [39].

4.3. ¿Cómo pueden las baterías ayudar a mitigar los precios de la energía?

En caso de depender de la red eléctrica o tener un sistema híbrido con energías renovables, un sistema de baterías permite al usuario almacenar la energía eléctrica generada o bien tomada de la red durante una tarifa valle para posteriormente poder ser utilizada en los periodos de mayor coste del kWh (tarifa punta). Mediante este método, el usuario tiene la posibilidad de ahorrar sustancialmente debido a la gran diferencia de precios entre la tarifa punta y la tarifa valle. En función del plan eléctrico con discriminación horaria contratado, en los casos más optimistas; el ahorro puede llegar hasta los 30 céntimos por kWh. Esta diferencia en los precios supone una gran compensación económica para el cliente, permitiéndole amortizar el sistema de baterías mucho más rápidamente comparado en el caso de precios de la electricidad fijos [36].

La implementación de los periodos de carga depende de tecnología de monitorización en cada sistema de baterías. Algunos fabricantes permiten el control remoto a través de aplicaciones o páginas web donde se accede a todas la configuraciones y parámetros tanto de las baterías como del sistema BMS. En la *Figura 4.4* - explicada a través de la *Tabla 4.2*- se muestra la interfaz “SunnyPortal” de una empresa de soluciones energéticas, SMA Solar Technology, la cual permite introducir los detalles de la factura eléctrica contratada, tanto franjas horarias, como precios. De esta manera se establecen los periodos valle y punta, donde las baterías deberán ser cargadas o descargadas de manera inteligente en función de los precios de la electricidad. También, realiza el análisis de costes en función de la energía suministrada a la batería y sus fluctuantes precios para cómputo económico mensual.

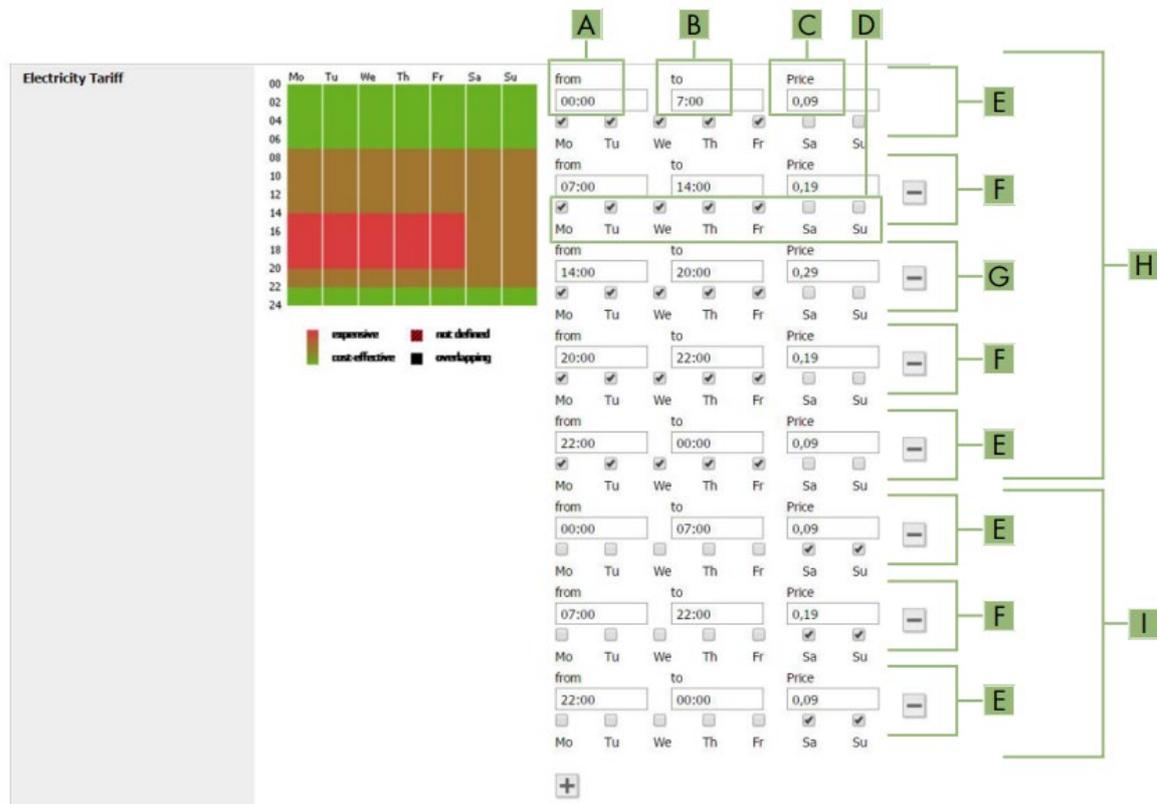


Figura 4.5. Configuración para tarifa eléctrica con discriminación horaria. Fuente: [36]

Tabla 4.2. Parámetros de configuración en SunnyPortal. Fuente: [36]

| Posición | Explicación |
|----------|--|
| A | Hora de inicio de la tarifa eléctrica con discriminación horaria |
| B | Hora de finalización de la tarifa eléctrica con discriminación horaria |
| C | Precio por kWh de la tarifa eléctrica con discriminación horaria de la empresa suministradora de energía |
| D | Selección del día de la semana en el que es válida la tarifa eléctrica en el periodo de tiempo indicado |
| E | Tarifa valle |
| F | Tarifa media |
| G | Tarifa punta |
| H | Día entre semana |
| I | Fin de semana |
| | Añadir un periodo adicional para la tarifa eléctrica |
| | Eliminar un periodo para la tarifa eléctrica |

En lado superior izquierdo se expresa la configuración establecida en forma de gráfico. En caso de existir solapamientos o periodos que no se han definido, se indica la posibilidad de completarlo con el objetivo de tener siempre un modo de funcionamiento preestablecido.

Además del establecimiento de las horas de carga de la batería, es posible indicar la potencia a la que se hará (Figura 4.5), en caso de cargarse a través de la red eléctrica. De esta manera se podría cargar más rápidamente en caso de prever una demanda energética elevada en las próximas horas o bien una carga más lenta y prolongada, contribuyendo así al mantenimiento de la vida útil de la batería.

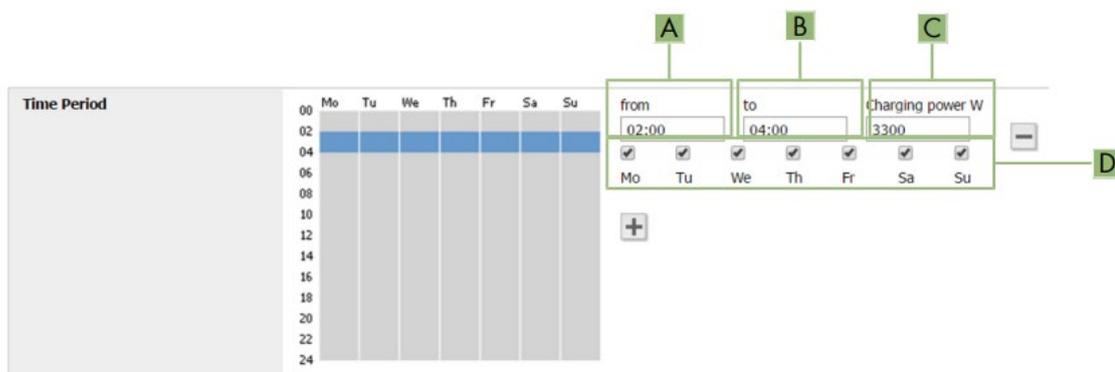


Figura 4.6. Configuración para el intervalo de carga de la batería. Fuente: [36]



4.4. Periodos ideales de carga y descarga

Una vez visto el método de configuración, existen unas pautas o recomendaciones para lograr la máxima eficiencia y ahorro económico dentro de las posibilidades horarias. Se basa en la selección de la fuente de energía según la disponibilidad renovable (si existe) y la programación de los momentos de carga y descarga de la batería en función de los precios de la red eléctrica.

Recomendaciones de uso en periodo tarifario llano

- **Tramo de 08:00 a 10:00 h:** Con unas condiciones de irradiación solar todavía bajas no es posible alimentar los consumos energéticos de la vivienda. La mejor opción es abastecerse con la energía disponible en las baterías previamente cargadas en el horario nocturno a través de la red durante periodo valle.
- **Tramo de 14:00 a 18:00 h:** En caso de contar con un sistema bien dimensionado, es posible llegar a la autarquía completa, disponiendo de la batería cargada totalmente mientras las placas fotovoltaicas abastecen la vivienda de electricidad. En caso de un pico en la demanda de potencia que no pueda ser solventado con energía solar, la energía sería proporcionada por la batería, cuyo SOC será elevado debido a la carga recibida durante todo el día.
- **Tramo de 22:00 a 00:00 h:** En caso de existir carga en la batería debido al uso eficiente de la misma a lo largo del día, se utilizará la energía restante para los últimos consumos eléctricos del día.

Recomendaciones de uso en periodo tarifario punta

- **Tramo de 10:00 a 14:00 h:** Se aprovechará el aumento de la irradiación solar, usando la energía generada directamente. Si existe excedente de generación solar se reconducirá a la batería para su uso durante la siguiente hora punta. Cabe destacar la importancia de no consumir energía en exceso para facilitar la eficiencia en la carga de la batería.
- **Tramo de 18:00 a 22:00 h:** La producción fotovoltaica se va desvaneciendo al igual que el sol, siendo necesario recurrir a la energía de la batería almacenada previamente. Los niveles de carga deberían ser próximos a los valores máximos



admisibles después del transcurso de todo el día generando electricidad a través de las placas solares.

Recomendaciones de uso en periodo tarifario valle

- **Tramo 00:00 a 08:00 h:** En la mayoría de las instalaciones y como se ha visto anteriormente, el sistema de baterías permite **la carga con energía procedente de la red eléctrica. Este suministro suele ser programado para su transcurso durante el periodo valle**, permitiendo la carga completa de las baterías de modo que, al inicio de la jornada siguiente, la energía obtenida a precios más económicos pueda ser utilizada durante los periodos tarifarios más caros [40].

Tabla 4.3. Recomendaciones de programación con tarifa con discriminación horaria.

Fuente: Elaboración propia

■ Horario Valle ■ Horario Llano ■ Horario Punta

| | Con generación solar | | Sin generación solar | |
|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Abastecimiento | Baterías | Abastecimiento | Baterías |
| 08:00 a 10:00 h | Solar o batería | Inactiva o descargando | Batería | Descargando |
| 10:00 a 14:00 h | Solar | Cargando o descargando | Batería | Descargando |
| 14:00 a 18:00 h | Solar | Cargando o llena | Batería | Descargando |
| 18:00 a 22:00 h | Solar o batería | Llena o descargando | Batería | Descargando |
| 22:00 a 00:00 h | Batería o red eléctrica | Descargando o inactiva | Batería o red eléctrica | Descargando o inactiva |
| 00 a 08:00 h | Red eléctrica | Cargando | Red eléctrica | Cargando |

La tabla anterior sintetiza los horarios comerciales de la electricidad en relación con los posibles modos operando de la batería para lograr la máxima rentabilidad y ahorro económico posible.



5. Comportamiento carga-descarga de baterías

5.1. Comportamiento de la batería dentro del intervalo de carga

En caso de haber definido unos intervalos de carga de la batería como los vistos anteriormente, conviene, además, establecer y cumplir las siguientes condiciones de seguridad para lograr un proceso de carga saludable y efectivo:

- En caso de carga durante el día, se utilizará la energía solar y; en caso de no ser suficiente para lograr la potencia de carga mínima preestablecida, se compensará con la inyección por parte de la red pública.
- La simultaneidad de carga y descarga de la batería no será posible, estando bloqueada esta configuración. Esta norma es muy importante de cara a la conservación de la vida útil de la batería. La diferenciación de los ciclos permitirá que las celdas se estabilicen correctamente a nivel estructural durante la carga o bien la descarga, evitando así que un posible flujo bidireccional pueda perjudicar en la calidad del proceso y consecuentemente las celdas.
- Las modificaciones y/o controles en la batería no son accesibles durante la carga, quedando restringidos.

Otras indicaciones pertinentes

- En caso de que la batería estuviese completamente cargada ($SOC = 100\%$ o valor próximo), no se debe forzar la continuación de la carga. En este caso, el sistema de seguridad de la batería bloquea la acción, no permitiendo la carga.
- Si la batería alcanzase valores altos de capacidad ($SOC > 90\%$), existe la posibilidad de que no se llegue a cargar completamente con la potencia seleccionada. Este fenómeno se debe a motivos funcionales: dependiendo del tipo de batería, se pueden observar diferentes comportamientos frente al proceso final de carga.
- Como se ha expuesto en el *Capítulo 2*, las baterías litio son controladas internamente por el propio sistema de gestión de baterías (BMS). Por ello y a pesar de que a través de la aplicación de monitorización se envíe una instrucción de carga a la batería,



existe la posibilidad de que el BMS la rechace por motivos de seguridad y no se inicie la carga. El BMS protege así la batería para evitar daños o un posible envejecimiento prematuro, prevaleciendo su criterio de control sobre las indicaciones del usuario.

5.2. Comportamiento de la batería fuera del intervalo de carga

En el caso contrario, cuando la batería no está recibiendo una señal de carga, esta se comporta con normalidad en función de las demandas energéticas:

- Si por algún motivo la electricidad se intenta tomar a través de la red, el sistema de la batería tratará primeramente de hacer uso de la energía almacenada en las baterías. Con carácter general, se recomienda cumplir esta cláusula, a excepción de las horas valle, en las que, en caso de que la batería esté cargada; conviene consumir directamente de la red y mantener la capacidad de la batería para el día siguiente.
- Si se generase energía fotovoltaica adicional y se ejecutase la orden de inyección a la red, el sistema de baterías reaccionaría intentando cargar la batería en caso de disponer de capacidad libre.
- En caso de superar la potencia de carga máxima para las baterías y tener un contrato sujeto a compensación de energía excedente, si la red pública lo permite; la energía sobrante será reconducida hacia la red eléctrica, protegiendo el sistema de baterías de una posible carga dañina.
- Si se sobrepasa la potencia de descarga máxima de las baterías, por motivos también de seguridad, se empieza a generar el consumo directamente de la red [36].

6. Estudio de una instalación tipo

6.1. Condiciones de la instalación

Una vez analizado los comportamientos de la batería tanto por sus posibles fuentes de alimentación como por sus cargas o descargas en función del momento del día, se presentarán los principales componentes presentes en una instalación de baterías en una vivienda estándar. También se seleccionarán más específicamente los mismos con el objetivo de crear un pequeño caso de una instalación aislada. Las características base que determinan su alcance y capacidades son:

- Sistema de almacenamiento de energía con sistema propio de gestión de baterías el cual alcanza una autonomía máxima de tres días
- Generación renovable a través de energía fotovoltaica: contribuyendo a la carga de las baterías durante los periodos de irradiación solar.
- Sistema aislado sin conexión a la red eléctrica pública (off-grid).

El diseño de la instalación se ha llevado a cabo utilizando el programa para creación y cálculos de urbanizaciones dmElect, resultando el esquema eléctrico visible en la *Figura 6.1*. Como configuración de cara al cálculo de la irradiación solar se ha seleccionado la ciudad de León, con las características de localización indicadas en la *Tabla 6.1*.

Tabla 6.1. Características geográficas de la instalación. Fuente: [41]

| CIUDAD | LEÓN |
|----------|--------------|
| Altitud | 837 m.s.n.m* |
| Latitud | 42.6° |
| Longitud | 5.6° |

*m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar.

6.2. Estudio de necesidades de la instalación

Uno de los puntos más importantes a la hora de proyectar una instalación es el correcto dimensionamiento de la misma. Para ello, previamente es necesario conocer las necesidades energéticas de la vivienda, lo que permitirá seleccionar los equipos más adecuados al consumo que se vaya a producir. Se ha generado un estudio de necesidades hipotético para una vivienda unifamiliar estándar visible en la *Tabla 6.2*, donde se muestran los consumos diarios previstos en el hogar.

Tabla 6.2. Lista de consumos eléctricos de la vivienda. Fuente: Elaboración propia

| Equipos Eléctricos | Potencia (W) | Utilización (h/día) | Consumo (Wh/día) |
|-------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| Iluminación Cocina | 36 | 3 | 108 |
| Frigorífico | 100 | 12 | 1200 |
| Lavadora | 500 | 2 | 1000 |
| Microondas | 600 | 0,5 | 300 |
| Plancha | 1200 | 0,5 | 600 |
| Iluminación Salón | 72 | 3 | 216 |
| Televisión | 150 | 2 | 300 |
| Iluminación Habitación | 18 | 1 | 18 |
| Ordenador | 250 | 2 | 500 |

Contabilizando todos los consumos de las luminarias junto con los electrodomésticos más utilizados, la estimación de consumo diaria asciende a 4242 Wh. Las estimaciones energéticas medias de una vivienda son imprescindibles de cara a la configuración de la instalación, calculando, en caso de contar con un sistema fotovoltaico; la producción necesaria para poder abastecer holgadamente las demandas eléctricas. Por otra parte, en caso de disponer de baterías, conviene sobredimensionar la producción renovable para poder cargar las baterías debido al excedente de energía.

6.3. Selección de componentes

El presente apartado tiene como objetivo la selección de equipos y la configuración de sus principales parámetros técnicos de cara al correcto funcionamiento de la instalación.

6.3.1. Sistema fotovoltaico

Las propiedades de los módulos solares serán clave para la correcta estimación de la energía que producirán y por lo tanto la capacidad energética que se otorgará a la vivienda. Parámetros como la orientación de las placas solares o su inclinación marcarán la diferencia entre una producción de energía eléctrica media-baja y una más elevada, aprovechando al máximo la energía del Sol. Véase *Tabla 6.3*.

Tabla 6.3. Características de los módulos solares. Fuente: Resultados del estudio

| PARÁMETRO | VALOR |
|--------------------------|-----------|
| Orientación | Sur |
| Inclinación | 33° |
| Potencia máxima | 270 W |
| Eficiencia del módulo | 16,5 % |
| Energía necesaria diaria | 5959,4 Wh |
| Número de módulos | 10 |

La energía que necesita captar diariamente los módulos fotovoltaicos ha sido calculada a través del consumo previsto para la vivienda, considerando el coeficiente de seguridad ($K_{Seguridad}$) y el rendimiento (β) de los propios módulos. Todos los sistemas de generación de energía tienen pérdidas relacionadas con su rendimiento, lo que causa que no sean capaces de convertir toda la energía solar recibida en energía eléctrica.

$$E [Wh] = \frac{E_{Demandada} * K_{Seguridad}}{\beta} = \frac{4242 Wh * 1,1}{0,783} = 5959,4 Wh \quad (6.1)$$

Por lo tanto, para poder producir 4242 Wh netos será necesaria la producción de una cantidad total de 5959,4 Wh, los cuales se verán reducidos por efecto de los motivos anteriormente citados.

El software dmElect utiliza la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la estimación de la irradiación solar media. De esta manera calcula cuantos paneles fotovoltaicos necesitará la instalación para suplir la demanda energética de esta hipótesis. Como resultado, la instalación dispondrá, de diez módulos fotovoltaicos los cuáles se dispondrán en dos filas de cinco módulos cada una con el objetivo de lograr los objetivos de voltaje. La siguiente *Figura 6.1* se ha extraído como fragmento de la simulación 3D en la aplicación dmElect, tras haber realizado la pertinente configuración de la instalación.

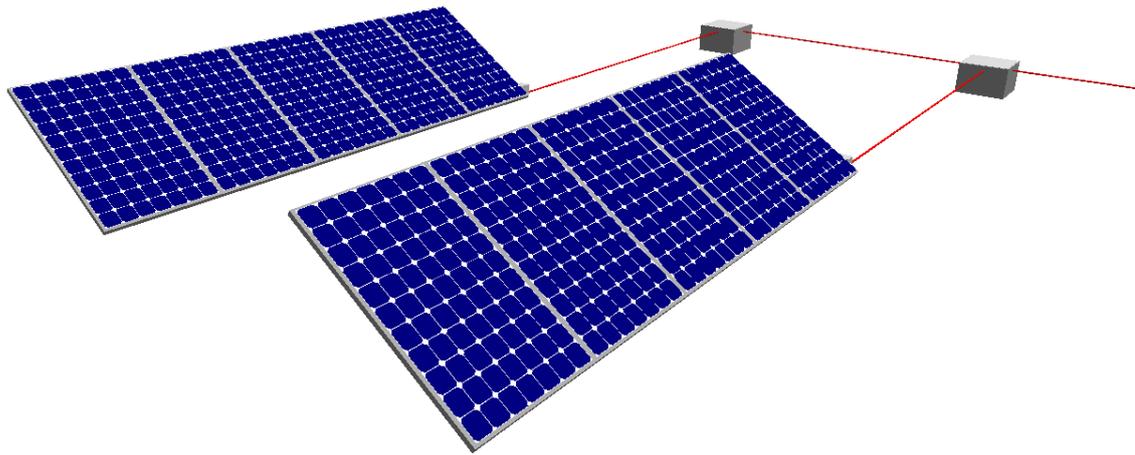


Figura 6.1. Disposición de los módulos solares. Fuente: Resultados del estudio

6.3.2. Regulador de carga

El regulador es un dispositivo electrónico que tiene como función controlar y regular el proceso de carga de las baterías, asegurándose de que se realiza correctamente. Además, actúa como sistema de protección ante excesivos voltajes y sobrecargas, lo que contribuirá a prolongar su vida útil. El regulador de carga trabaja de manera complementaria al BMS, constituyendo el primer nivel de control y supervisión de la corriente antes de que llega a las baterías [42].

Este elemento va ubicado entre los módulos fotovoltaicos y las baterías, supervisando el tránsito de energía entre ambos a través del control del voltaje y corriente. Véase *Figura 6.2*.

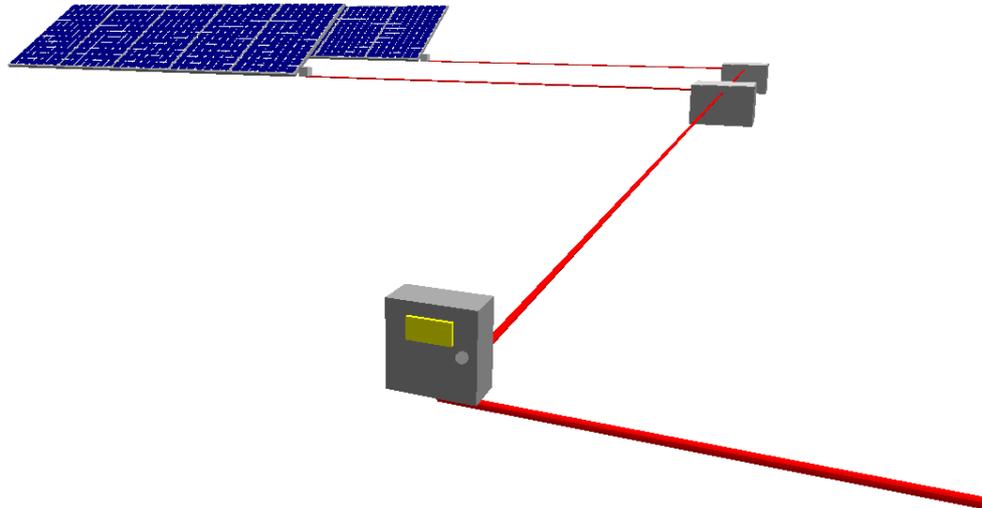


Figura 6.2. Regulador de la instalación. Fuente: Resultados del estudio

Existen diversos tipos según el aprovechamiento de la energía renovable que logren hacer. El regulador PWM (Pulse-Width Modulation) actúa modulando los pulsos y como corte al paso de energía a las baterías únicamente cuando se hayan cargado completamente. Requiere el mismo voltaje de funcionamiento que para las placas solares y las baterías, siendo estas últimas las que establecen el voltaje al que deben trabajar los paneles solares en función. Por este motivo los dispositivos PMW no aprovechan toda la producción solar. Por contra, los reguladores MPPT (Maximum Power Point Tracker) aprovechan la máxima producción solar para la carga de la batería, permitiendo a los paneles a trabajar en su máximo rendimiento en cada momento. La pérdida de potencia es considerablemente inferior que los PWM, por lo que se consideran mucho más eficientes; compensando su superior coste [42]. La tecnología utilizada en el prototipo de instalación será la MPPT.

6.3.3. Inversor

El inversor es un elemento crítico e indispensable en la instalación eléctrica. Actúa de nexo entre los módulos fotovoltaicos, las baterías y las tomas de corriente de la vivienda. Este dispositivo se encarga de transformar la energía generada en las placas solares para poder ser utilizada en el hogar, abasteciendo los diferentes consumos. Esta conversión consta del paso de la electricidad desde corriente continua (CC) hasta corriente alterna (CA). Como resultado, se generará una señal de onda con formato simétrico con la magnitud y frecuencia deseada, habitualmente 230 V y 50 Hz (hercios) en territorio europeo [43].

La potencia del inversor vendrá determinada por el pico máximo de consumo que se pueda producir en un momento determinado, es decir, todos los posibles consumos de la vivienda al mismo tiempo [44]. Por ello, en este caso, se dotará a la instalación de un inversor de 2, kWh, el cual se puede ver representado en el esquema 3D en la *Figura 6.3*.

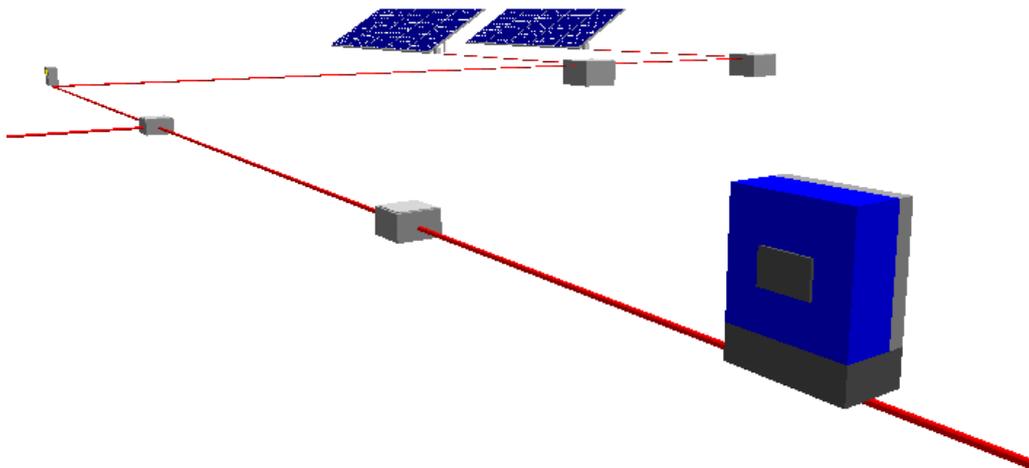


Figura 6.3. Inversor de la instalación. Fuente: Resultados del estudio

6.3.4. Baterías

La batería va a suponer la principal fuente de alimentación durante los periodos nocturnos o los días en los que los fenómenos meteorológicos como las tormentas obstruyan la producción de energía solar. Por este motivo, es vital el correcto dimensionamiento de las baterías a fin de no quedarse sin acceso al suministro eléctrico. En este caso se ha seleccionado una autonomía estándar de tres días, lo que significa que, en caso de disponer de la batería totalmente cargada, esta podría abastecer las demandas habituales de la vivienda

por el periodo de 72 horas. Esta capacidad podría verse mermada en caso de hacer un uso excesivo de la electricidad, reduciendo el periodo de autonomía estipulado.

$$E[Wh] = P[W] * t[h] = V[V] * I[A] * t[h]$$

$$E [Wh] = V * I * t = 48 V * 532,19 Ah = 25.545,12 Wh \quad (6.2)$$

$$E = 25.545,12 Wh \approx 26 kWh$$

Tras el cálculo de la capacidad concreta que se necesita para la instalación, se deberá elegir una batería con una capacidad siempre superior a la requerida, en función de las versiones ofertadas por los fabricantes. En este caso se elegirá una capacidad inmediatamente superior de 26 kWh.

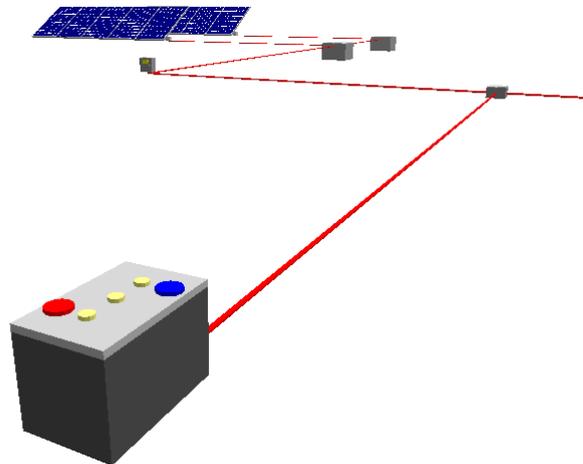


Figura 6.4. Batería de la instalación. Fuente: Resultados del estudio

En la *Figura 6.4* se muestra un mero símbolo identificativo clásico de una batería generada por el simulador del programa dmElect. Este elemento representa al conjunto de baterías que conforman el sistema de almacenamiento.

6.4. Resultados finales

A través del dimensionamiento de la instalación mediante la selección de los principales parámetros de los dispositivos, se alcanza el balance entre el abastecimiento de la casa y la posibilidad de carga de las baterías. El esquema final de la instalación con los dispositivos anteriormente mencionados se puede ver en la *Figura 6.5*.

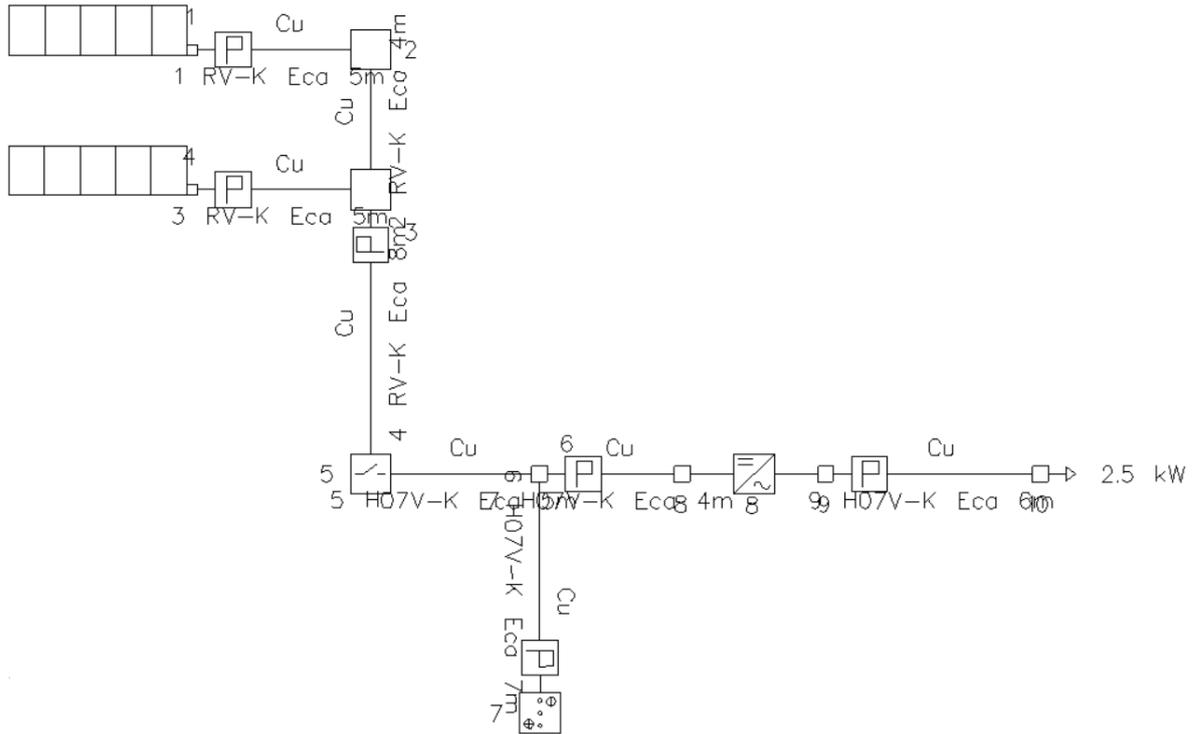


Figura 6.5. Esquema de vivienda hipotética. Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la *Tabla 6.4* se muestra un breve listado de información sobre los componentes utilizados en el esquema anterior.

Tabla 6.4. Simbología del esquema eléctrico. Fuente: Elaboración propia

| Símbolo | Elemento | Función |
|---|---|--|
|  | Módulos fotovoltaicos | Producción de energía eléctrica |
|  | Arqueta | Canalización y distribución de conductores |
|  | Caja de registro, conexiones o derivación | |
|  | Regulador | Control del flujo de energía entre placas solares y baterías |
|  | Batería | Almacenamiento de energía |
|  | Inversor | Convertir la corriente continua a alterna |
|  | Fusible | Protección eléctrica |
|  | Derivación eléctrica | Conecta el sistema eléctrico con la vivienda |

Para la creación del diseño se han respetado las distancias pertinentes entre las filas de los paneles fotovoltaicos, de modo que en ningún momento del día se lleguen a inferir en la captación de energía solar. El sistema cuenta, además de con los propios sistemas de seguridad de los dispositivos, con una serie de protecciones eléctricas en diferentes puntos de la instalación para evitar daños en caso de posibles peligros como sobrecargas.

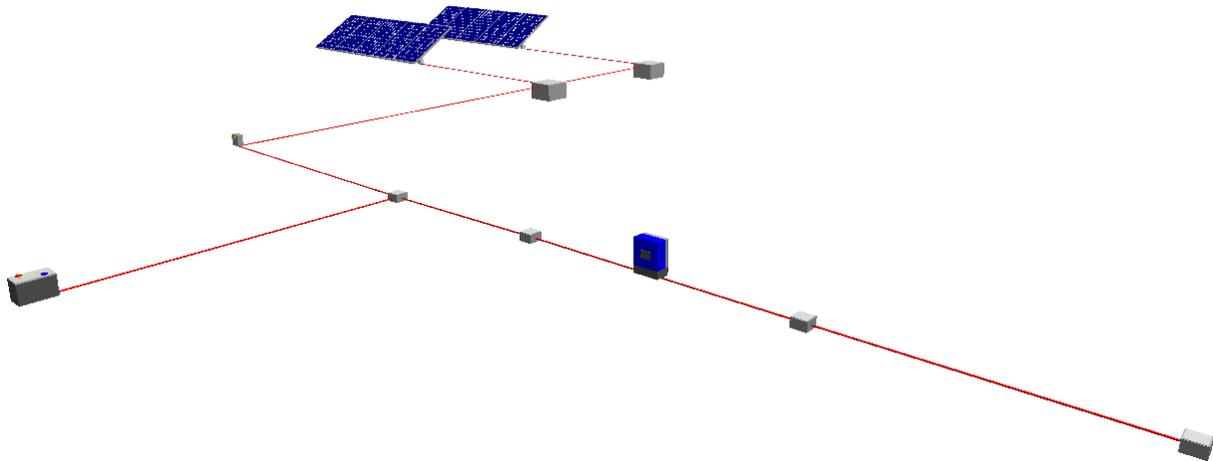


Figura 6.6. Visión global de la instalación. Fuente: Resultados del estudio

La Figura 6.6 muestra una vista global de la instalación creada gracias a la simulación 3D ofrecida por la aplicación. Al fondo se aprecian los módulos solares, lugar de generación de la energía la cual pasa por el regulador de carga y posteriormente continúa su camino hasta el inversor, lugar en el que se transforma de CC a CA para poder ser utilizada en la vivienda. En caso de disponer de suficiente energía como para poder ser almacenada, esta se dirige hacia la batería, donde se preservará hasta ser demandada por la vivienda.

Este pequeño prototipo tiene como intención mostrar los componentes necesarios para un sistema doméstico de aprovechamiento de energía solar equipado con baterías. El conocimiento de su función y alcance es de vital importancia para el correcto diseño de la instalación, de lo contrario, podrían producirse efectos no deseados desde notables pérdidas por rendimiento hasta importantes problemas de seguridad.

7. Perspectivas de futuro

Este estudio ha tratado algunas de las tecnologías actuales en los sistemas de almacenamiento, mayoritariamente centrado en las de litio. Sin embargo, esta área está en continuo desarrollo, buscando las innovaciones que confieran a las baterías unas características cada vez más avanzadas, a la vez que su reducción de costes para poder ser accesible por más usuarios. Fruto de la investigación aparecen diferentes conceptos de baterías como por ejemplo las de grafeno, fabricadas con carbono puro. Estos sistemas podrían ofrecer excelentes propiedades gracias a su altísima densidad energética, enormes velocidades de carga y, sobre todo, costes de fabricación mucho menores.

Por otra parte, también se investigan técnicas de análisis y diagnóstico del estado de las baterías, implementando tecnologías como el seguimiento del litio mediante rayos X en baterías metal-litio (*Figura 7.1*).

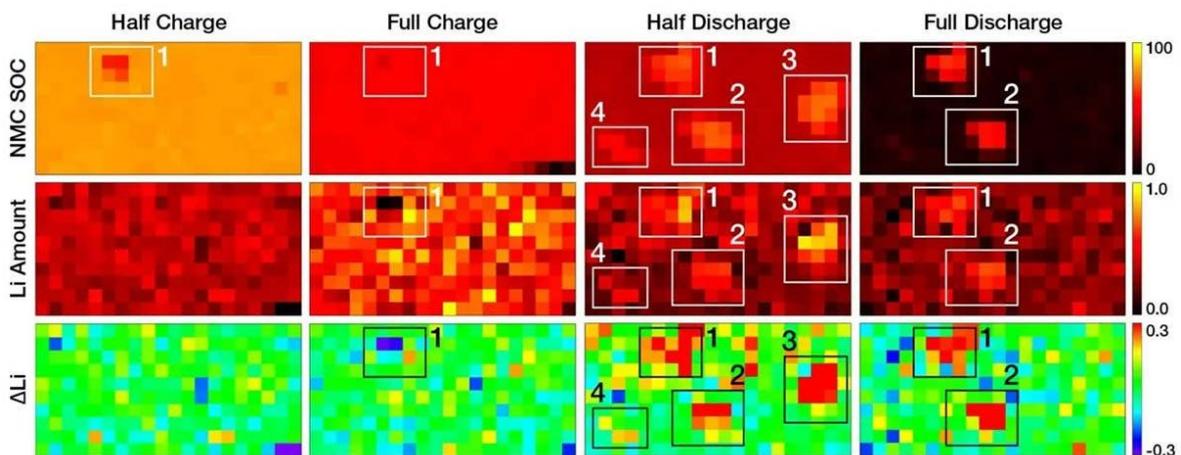


Figura 7.1. Escaneo de baterías metal-litio mediante rayos X. Fuente: [45]

Por otra parte, estos avances podrían provocar la proliferación de comunidades energéticas, un conjunto de viviendas que produjese y almacenase su propia energía. Los miembros establecerían un sistema de compartición de energía entre ellos, logrando el autoabastecimiento a través de la producción renovable. Esta idea de comunidad aportaría importantes beneficios socio-económicos a la vez que se contribuye positivamente a lograr los objetivos de sostenibilidad [46].



8. Conclusiones

Una potente manera de compensar el continuo aumento en la demanda energética proporcional al progreso humano es el desarrollo de fuentes de almacenamiento para la gestión de la energía excedente. Desde un pantano hasta una batería de un vehículo, ambas soportan una gran cantidad de energía comparado con su tamaño, una energía que de ser aprovechada correctamente puede desencadenar en grandes beneficios.

En el caso de las baterías eléctricas, estas pueden ayudar a abastecer energéticamente hogares en sitios remotos del planeta o ayudar a reducir drásticamente la factura de la electricidad de la mayoría de viviendas. Para ello y en base a la información presentada, se califican las baterías de litio como la mejor opción actual del mercado debido a su alta capacidad específica y reducido efecto memoria frente a las baterías tradicionales. Además, disponen de una extensa vida útil que cuando llega a su fin no supone un problema de contaminación en comparación al plomo o cadmio, siendo reciclables. Como principal inconveniente, además de su considerable precio; destaca la alta reactividad de los iones de litio, un potencial problema de seguridad. Por este motivo, todos los sistemas de baterías precisan de una estricta regulación y control de su funcionamiento que pueda garantizar la seguridad y eficiencia energética. Esto hace que los sistemas de gestión de energía sean un elemento de vital importancia en las baterías, habiendo demostrado por su capacidad de:

- Controlar los parámetros eléctricos en todo momento, regulando la corriente y el voltaje para obtener las potencias adecuadas de trabajo.
- Controlar la temperatura de funcionamiento de las celdas dentro de su rango óptimo, evitando pérdidas de rendimiento que podrían alcanzar más del 50%. Por parte del usuario, se recomienda la instalación de las baterías en una zona ventilada y fuera del alcance solar o fenómenos meteorológicos.
- Evitar que las descargas de energía se produzcan próximas a los límites de bajo voltaje, evitando así el efecto memoria y una pérdida considerable de su capacidad.
- Equilibrar el estado de carga de las celdas, evitando el desgaste y envejecimiento heterogéneo y prematuro de las mismas, prolongando la vida útil.

En los tiempos que corren, las alternativas a la obtención de energía tradicional están siendo cada vez más demandadas por motivos económicos y ecológicos. Como se ha expuesto en



este trabajo, una solución potencialmente rentable es la generación renovable y el almacenamiento de energía en baterías. Por ello, se concluye que la avanzada tecnología de gestión de baterías puede hacer de estos sistemas una opción viable a medio plazo al velar por la salud del dispositivo y prolongar su vida útil. Esta minuciosa monitorización podría incrementar los años de vida del sistema más allá de los previstos, proporcionando una excelente alternativa a la compra de energía. En base a la información presentada en este estudio, las condiciones ideales para aumentar la vida útil de las baterías son:

- ✓ Mantener las baterías dentro del rango operativo de voltaje.
- ✓ Realizar siempre la carga a una potencia adecuada y suficiente.
- ✓ Realizar siempre la descarga sin sobrepasar el límite de potencia estipulado.
- ✓ Evitar el vaciado/llenado excesivo de las baterías, manteniéndolas a media carga.
- ✓ No realizar nunca procesos de carga y descarga simultáneamente.

Finalmente, el breve estudio esquemático de una instalación tipo pretende haber familiarizado al lector con los dispositivos que harían posible una instalación. Para un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías en una vivienda estándar, resulta altamente recomendable el uso de un regulador de carga tipo MPPT. Esta configuración permite maximizar el aprovechamiento de la energía generada en los paneles, aumentando la producción eléctrica hasta en un 30% respecto a los reguladores PWM.

A través de este estudio se ha expuesto una recopilación de información que pueda servir de introducción a los sistemas de almacenamiento para uso particular. Con esto, se ha pretendido abrir las puertas hacia el conocimiento de sistemas energéticos alternativos para el uso doméstico, apostando por un abastecimiento inteligente de energía mientras se contribuye con un granito propio de arena hacia un futuro sostenible.



Bibliografía

- [1] Fred W. Billmeyer, “Ciencia de los polímeros,” 1975, Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: <https://fdocuments.in/document/billmeyer-ciencia-de-los-polimeros.html?page=1>
- [2] Carlos González, “¿Qué son las celdas de la batería de un coche eléctrico?,” *TestCoches*, 2022. <https://testcoches.es/conceptos/celda/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [3] Alberto Martos, “Entresijos de un pack de baterías de Tesla. Característica de su éxito,” *BlogMecánicos*, 2017. http://www.blogmecanicos.com/2017/04/entresijos-de-un-pack-de-baterias-de_27.html (accessed Jun. 15, 2022).
- [4] “Fabricación de baterías eléctricas: conozca las tecnologías en sus componentes y materiales,” *AutoCrash*, 2021. Accessed: Jun. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.revistaautocrash.com/fabricacion-de-baterias-electricas-conozca-las-tecnologias-en-sus-componentes-y-materiales/>
- [5] T. Fernández and E. Tamaro, “Alessandro Volta,” *Biografías y Vidas*, 2022. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/v/volta.htm> (accessed Jun. 16, 2022).
- [6] “De la pila de Bagdad al coche de hidrógeno,” *IES Valle del Saja*, 2022. <http://www.fqsaja.com/?p=10145> (accessed Jun. 16, 2022).
- [7] Nieves Casañ Pastor and Pedro Gómez Romero, “Baterías de litio. La alternativa al plomo y al cadmio,” *Investigación y Ciencia (Ciencia y Empresa)*, 1996, Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/36026893.pdf>
- [8] H. Eric Melin, “The lithium-ion battery end-of-life market-A baseline study.” Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf
- [9] Carles Solé, “Baterías de ion litio: ¿qué son?,” *Toyota*, 2022. <https://blog.toyota-forklifts.es/que-son-las-baterias-de-litio> (accessed Jun. 16, 2022).
- [10] “Nomenclatura de iones monatómicos y compuestos iónicos,” *Khan Academy*. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/atoms-compounds-ions-ap/compounds-and-ions-ap/a/naming-monatomic-ions-and-ionic-compounds> (accessed Jun. 16, 2022).
- [11] Editorial Etecé, “Ion - ¿Qué es un ion?,” *ConceptoDe*, 2021. <https://concepto.de/ion/> (accessed Jun. 16, 2022).
- [12] Bruno Scrosati, “Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications,” 2013, Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/278316981_Lithium_Batteries_Advanced_Technologies_and_Applications



- [13] Chris Woodford, “Lithium-ion batteries,” *ExplainThatStuff*, 2022. <https://www.explainthatstuff.com/how-lithium-ion-batteries-work.html> (accessed Jun. 14, 2022).
- [14] Luis González, “Vida y muerte de una batería de ion-litio,” *ForoCochesElectricos*, 2021. <https://forococheselectricos.com/2013/05/vida-y-muerte-de-una-bateria-de-ion-2.html> (accessed Jun. 24, 2022).
- [15] R. Iglesias *et al.*, “Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda,” 2012. Accessed: Jun. 15, 2022. [Online]. Available: <http://quintans.webs.uvigo.es/documentos/2012-SAAEI-0464-gf-000126.pdf>
- [16] “Types of Lithium-ion,” *BatteryUniversity*, 2021. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (accessed Jun. 17, 2022).
- [17] “Solución fluida para reducir el crecimiento de dendritas en las baterías de litio-metal,” 2021. <https://ecoinventos.com/solucion-fluida-reducir-crecimiento-dendritas-baterias-litio-metal/> (accessed Jun. 22, 2022).
- [18] Harvey C., “What is in an off-grid solar system?,” *LinkedIn*, 2019. <https://www.linkedin.com/pulse/what-off-grid-solar-system-harvey-cheung/> (accessed Jul. 03, 2022).
- [19] “Sistemas OFF GRID,” *Desigenia*, 2022. <https://desigenia.com/sistemas-offgrid-ongrid/> (accessed Jun. 17, 2022).
- [20] “Tipos de instalación de energía solar fotovoltaica,” *HGIngeniería*, 2018. <https://hgingenieria.com.co/tipos-de-instalacion-de-energia-solar-fotovoltaica/> (accessed Jun. 18, 2022).
- [21] “Residential Off-Grid Batteries,” *Discover*, 2022. <https://discoverbattery.com/applications/solar-energy-storage/off-grid-solar-batteries> (accessed Jun. 17, 2022).
- [22] “Cómo los sistemas solares híbridos maximizan el autoconsumo y mejoran la eficiencia energética,” *Energética*, 2021. Accessed: Jun. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/como-los-sistemas-solares-hibridos-maximizan-el-autoconsumo-y-mejoran-la-eficiencia-energetica>
- [23] “Contrato de compraventa de energía,” *Iberdrola*, 2022. <https://www.iberdrola.com/conocenos/contrato-ppa-energia> (accessed Jun. 18, 2022).
- [24] “¿Qué es una Salida de Emergencia o Backup Box?,” *SotySolar*, 2022. <https://sotysolar.es/blog/emergencia-backup-box> (accessed Jun. 27, 2022).
- [25] “¿Qué es la salida de emergencia o backup en autoconsumo fotovoltaico?,” *CambioEnergético*, 2021. <https://www.cambioenergetico.com/blog/salida-emergencia-backup-autoconsumo-fotovoltaico/> (accessed Jun. 26, 2022).



- [26] “What is a Battery Management System?,” *Synopsys*.
<https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
(accessed Jun. 15, 2022).
- [27] “¿Qué es un sistema de gestión de batería BMS?,” *CambioEnergético*, 2021.
<https://www.cambioenergetico.com/blog/sistema-gestion-bateria-bms/> (accessed Jun. 15, 2022).
- [28] Radhika, “How Does Cell Balancing Improve Battery Life?,” *IonEnergy*, 2021.
- [29] Philtao, “A complete Energy Management System,” *TAO Performance*, 2021.
<https://www.taoperf.com/2021/06/16/leading-edge-bms/> (accessed Jun. 19, 2022).
- [30] “Battery Management System,” *XALT Energy*.
<https://www.xaltenergy.com/portfolio/battery-management-system-bms/> (accessed Jun. 20, 2022).
- [31] Alejandro Plaza, “¿Qué es un mercado marginalista?,” *CompañíasDeLuz*, 2022.
<https://www.companias-de-luz.com/noticias/que-es-un-mercado-marginalista/>
(accessed Jun. 27, 2022).
- [32] Luís Pinheiro de Matos and Ricard Murillo Gili, “El mercado ibérico de la electricidad y la subida del precio en España,” *CaixaBank Research*, 2022.
<https://www.caixabankresearch.com/es/economia-y-mercados/materias-primas/mercado-iberico-electricidad-y-subida-del-precio-espana> (accessed Jun. 27, 2022).
- [33] Ministerio de Industria, “Tarifas eléctricas,” *Ministerio de Industria*.
<http://www.minetur.gob.es/energia/Tur/Queestur/Tarifas/Paginas/LasTarifas.aspx>
(accessed Jun. 22, 2022).
- [34] “Discriminación horaria en la factura de la luz en tiempos de confinamiento,” *Ecodes*.
<https://ecodes.org/tiempo-de-actuar/hogares-sostenibles/ahorro-energetico/discriminacion-horaria-en-la-factura-de-la-luz-en-tiempos-de-confinamiento> (accessed Jun. 23, 2022).
- [35] “¿Cuál es el horario valle de la luz y cuánto puedes ahorrar durante esa franja horaria?,” *N26 Bank*. <https://n26.com/es-es/blog/horario-valle-luz> (accessed Jun. 22, 2022).
- [36] “Control de carga de baterías para tarifas eléctricas con discriminación horaria,” *SMA*.
<https://files.sma.de/downloads/SmartHome-Time-of-use-TI-es-12.pdf> (accessed Jun. 22, 2022).
- [37] “¿Cuáles son los horarios de la luz?,” *Endesa*, 2022.
<https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/horarios-luz-valle-punta-llano>
(accessed Jun. 23, 2022).
- [38] “Término de facturación de energía activa del PVCP - Red Eléctrica de España,” *Red Eléctrica de España*, 2022. <https://www.ree.es/es/pvpc> (accessed Jun. 24, 2022).



- [39] E. Caamaño Martín *et al.*, “Autoconsumo de energía solar fotovoltaica con gestión activa de la demanda: el sistema Gedelos-FV,” 2010. Accessed: Jun. 22, 2022. [Online]. Available: https://oa.upm.es/9398/1/INVE_MEM_2010_87811.pdf
- [40] José Ortiz, “Nueva tarifa eléctrica y cómo aprovechar tu sistema de autoconsumo con baterías adaptándolo a los nuevos periodos horarios,” *KrannichSolar*, 2021. <https://blog.krannich-solar.com/es/blog/lector-de-blogs/nueva-tarifa-eléctrica-y-cómo-aprovechar-tu-sistema-de-autoconsumo-con-baterías-adaptándolo-a-los-nuevos-periodos-horarios.html> (accessed Jun. 24, 2022).
- [41] “Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas,” *Ministerio de agricultura, pesca y alimentación*, 2022. <https://sigpac.mapama.gob.es/feqa/visor/> (accessed Jul. 02, 2022).
- [42] “¿Qué es un regulador de carga?,” *AutoSolar*, 2021. <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga> (accessed Jun. 29, 2022).
- [43] “Inversores Aislada,” *AutoSolar*, 2022. <https://autosolar.es/inversores/inversores-aislada> (accessed Jul. 02, 2022).
- [44] “Tamaño de las baterías de un sistema solar doméstico,” *EcoInventos*, 2021. <https://ecoinventos.com/calcular-tamano-baterias-sistema-solar-domestico/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [45] Gonzalo García, “El seguimiento de litio mediante Rayos X en una batería de metal-litio permite alargar su vida útil,” *HíbridosyEléctricos*, 2022. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/seguimiento-litio-rayos-x-bateria-metal-litio-alargar-vida-util/20220307133105055273.html> (accessed Jul. 05, 2022).
- [46] “Comunidades energéticas,” *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*, 2022. [https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/comunidades-energeticas#:~:text=Las%20Comunidades%20Energéticas%20son%20organizaciones,eléctrica%2C%20térmica%20\(calefacción\)%2C](https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/comunidades-energeticas#:~:text=Las%20Comunidades%20Energéticas%20son%20organizaciones,eléctrica%2C%20térmica%20(calefacción)%2C) (accessed Jul. 05, 2022).