ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Eléctrica

Modelado de Degradación de Baterías con Aplicaciones para Coche Eléctrico y Almacenamiento Distribuido

Autor: Roberto Amorós Heredia

Director: Christian Calvillo

Madrid

Junio 2016

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi aprecio por el apoyo y gran ayuda de mi diretor de proyecto, Christian Calvillo, quien me ha aportado una guía sólida a seguir en los momentos de pérdida y su gran conocimiento sobre la materia.

Mi gratitud hacia el coordinador de proyectos Fernando de Cuadra, por su atención y su gran rapidez y comprensión al resolver mis dudas.

Sobre todo, me gustaría dedicar el agradecimientos a mi familia, porque sin su cariño y amor nada de estos habría resultado posible. Mi padre, mi madre, mi hermano y mis abuelos han sido un pilar fundamental en mi vida que ha celebrado mis logros, pero lo que es más importante, me han apoyado en mis caídas.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Modelado de Degradación de Baterías con Aplicaciones para Coche Eléctrico y Almacenamiento Distribuido

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2015-2016 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Roberto Amorós Heredia Fecha: 14/06/2016

Roberto Amorós

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Christian Francisco Calvillo Muñoz Fecha: 14/06/2016

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Fernando de Cuadra García Fecha: 14/06/2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Roberto Amorós Heredia DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *"MODELADO DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS CON APLICACIONES PARA COCHE ELÉCTRICO Y ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDO"*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente)*.

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusive del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ..14..... de .....Junio..... de ..2016

ACEPTA

Fdo.....Roberto Amovós.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

MODELADO DE DEGRADACIÓN DE BATERÍAS CON APLICACIONES PARA COCHE ELÉCTRICO Y ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDO

Autor: Amorós Heredia, Roberto.

Director: Calvillo Muñoz, Christian.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1 Introducción

La creciente demanda mundial de combustibles fósiles y la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ha fomentado la investigación y el desarrollo de soluciones para la sostenibilidad del planeta. El sector del transporte depende de esos combustibles fósiles y además contribuye considerablemente a esa emisión de gases de efecto invernadero, por tanto se están centrando muchas investigaciones en encontrar alternativas [1]. El desarrollo de vehículos híbridos y eléctricos es una solución que ayuda a reducir no sólo los gases de efecto invernadero, sino también la dependencia de los combustibles convencionales [1].

Estos vehículos necesitan almacenar la energía eléctrica, para suministrarla posteriormente al motor eléctrico que la transformará en energía mecánica para mover el vehículo. Ese dispositivo de almacenamiento de energía es la batería, la cual está definida como un dispositivo electromecánico que permite acumular energía química, para convertirla en energía eléctrica en forma de corriente continua [2].

La batería es uno de los elementos claves a la hora de diseñar un vehículo eléctrico, ya que es el elemento que le aporta la autonomía. Por lo que es necesario resaltar la importancia de una buena elección y un buen mantenimiento de la batería, pues normalmente su coste es muy alto.

Existen diversas características de las baterías para determinar y elegir cuál es la más conveniente para un vehículo eléctrico determinado. Por ejemplo, la densidad energética, amplio rango de temperatura de operación y alto número de ciclos de carga y descarga [3].

Actualmente, las baterías que más se acercan a los objetivos mínimos de los vehículos eléctricos, son las baterías de Litio-ion (Li-ion) [4]. Por ello, el estudio que se lleva a cabo es sobre una batería de este tipo, las baterías Litio-ion Polímero, la cual es una batería Li-ion con la cubierta de polímero y son adecuadas para el uso en vehículos eléctricos por su alta densidad energética, baja tasa de auto descarga y larga vida útil. [5]

Por otro lado, el mantenimiento de la batería también es muy importante, ya que de ello dependerá la degradación que sufra la batería y por tanto la necesidad de reemplazarla, lo que supone un coste muy alto. Por ello, este estudio trata de minimizar esa degradación, pero enfocado a una conexión de un vehículo que aporte servicios de regulación de frecuencia, es decir, que pone la energía de la batería a disposición de la red eléctrica.

Este planteamiento se debe a que, en un futuro no muy lejano, se espera que la red eléctrica se vaya descentralizando progresivamente hasta conseguir una red distribuida. Esto quiere decir, que la energía eléctrica que se genera no sólo provenga de las centrales principales, como pueden ser las de carbón o las nucleares, sino que también provenga de placas solares u otro tipo de generación de domicilios particulares. En este punto entra la

conexión Vehicle-to-Grid, que permite participar en la red a la energía de los vehículos eléctricos conectados. Este tipo de conexión permite vender y poner a disposición de la red la energía de las baterías.

En la actualidad, se están llevando a cabo diversas investigaciones para conseguir mejorar la vida útil de las baterías incorporadas a este tipo de vehículos. Normalmente, estos estudios se han hecho desde la perspectiva de que la conexión a la red a la hora de cargar las baterías sea lo más eficiente posible, pero pocas veces teniendo en cuenta la degradación de la batería.

Por ello se lleva a cabo este estudio; que consiste en el diseño de un modelo del que se obtenga la velocidad de degradación de la batería, en función de la temperatura y del estado de carga o SOC, cuando se conecta para poner a disposición de la red la energía de la batería. A continuación, este modelo es linealizado y se aplica en un problema de optimización que gestiona la carga y descarga en un vehículo eléctrico, minimizando la degradación sufrida por la batería cuando aporta servicios de Vehicle-to-Grid.

2 Metodología

En este estudio hay dos procesos para conseguir los objetivos planteados, por un lado, se encuentra el proceso para obtener el modelo de degradación, por otro lado, el proceso para conseguir un método de minimización de esa degradación.

Para conseguir el modelo de degradación por ciclo se han estudiado dos parámetros que podían afectar a la vida de la batería. Estos parámetros son el estado de carga o SOC (state-of-charge en inglés) y la temperatura.

Para estudiar la variación de la degradación en función del SOC, las baterías han sido sometidas a un perfil de carga y descarga de una profundidad de un 10% a diferentes valores del SOC.

Para estudiar la variación de la degradación en función de la temperatura, los ensayos anteriores se realizaban en diferentes baterías que se encontraban a diferentes temperaturas. Es decir, unas baterías estaban en un horno a 50˚C mientras se realizaban las pruebas, otras baterías en un congelador a 5˚C y otras a temperatura ambiente, la cual en el laboratorio era aproximadamente de 25˚C.

Para procesar y organizar los miles de datos que nos aportaban estos ensayos, se ha utilizado la herramienta Excel, con la cual se han realizado diversos cálculos para conseguir hallar los diferentes parámetros importantes, como el SOC medio, la profundidad de descarga, la temperatura media o la degradación por ciclo.

Todos estos datos procesados y organizados, son utilizados en el programa Matlab para poder representar de una manera gráfica los resultados obtenidos y obtener un modelo de degradación representado linealmente por tramos.

Por otro lado, para diseñar un método o estrategia de conexión que minimice la degradación de la batería, se ha utilizado la herramienta GAMS. Con el objetivo de ver cómo se comportaría una batería de un vehículo eléctrico cuando se conecta a la red para aportar servicios Vehicle-to-Grid, se han diseñado diferentes escenarios en los que varía la temperatura y las condiciones del estado de carga del vehículo.

Los datos de entrada que ha utilizado GAMS para llegar a los resultados de la degradación son: SOC inicial, final, máximo y mínimo, el modelo de degradación mediante la aproximación por tramos, perfil de demanda de energía de la red para la regulación de frecuencia y las temperaturas durante la noche.

3 Resultados

Los resultados más relevantes que se han obtenido se muestran a continuación en forma de gráficas:

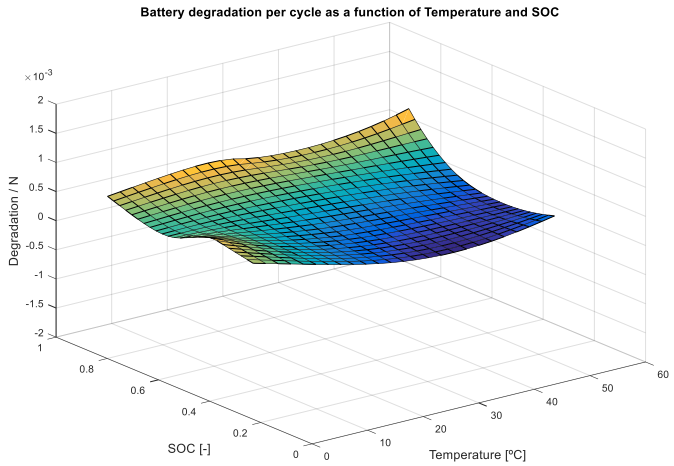

Fig. 1 Superficie estimada de degradación por ciclo en función del SOC y la temperatura.

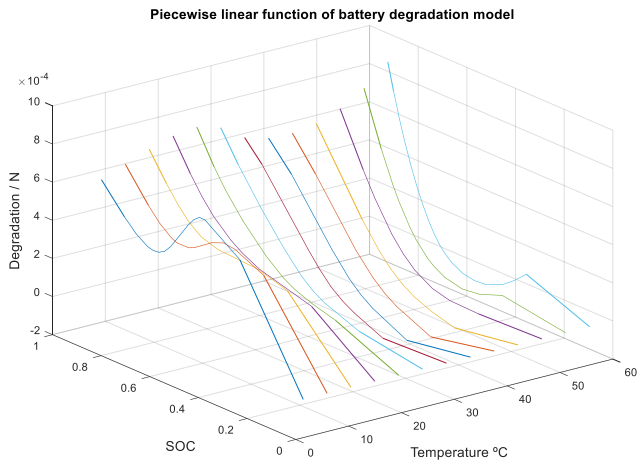

Fig. 2 Modelo lineal por tramos de la degradación por ciclo en función del SOC y la temperatura.

En la figura 1 se representa una superficie con la degradación por ciclo estimada mediante la interpolación de los datos obtenidos en los ensayos. A partir de los datos obtenidos en esa interpolación, se representa la figura 2, que permite obtener un modelo lineal para introducirlo en la herramienta de optimización GAMS.

Se han simulado 10 escenarios diferentes en GAMS en los que se minimiza la degradación para un perfil de temperaturas dado, variando el estado de carga de la batería de un vehículo eléctrico que tiene una capacidad de 30 kWh, como el Nissan Leaf [6].

Se representa a continuación los resultados de la optimización del escenario 1, con temperaturas de Enero, un SOC mínimo de 3 kWh, un SOC inicial de 10 kWh y final de 25 kWh.

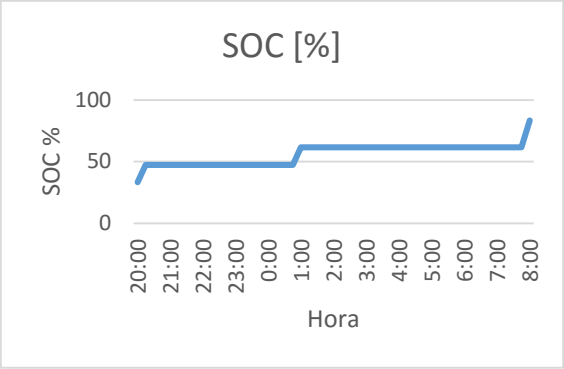

Fig. 3 SOC óptimo para las condiciones del escenario 1

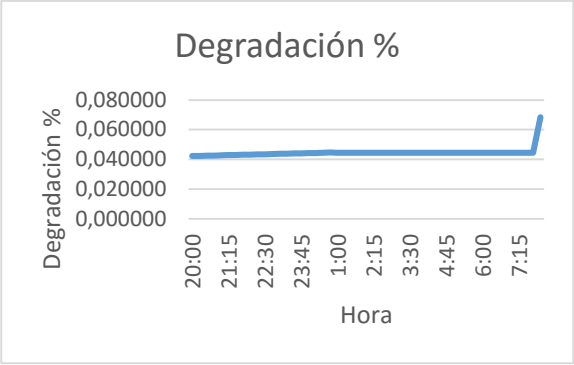

Fig. 4 Degradación para las condiciones del escenario 1 y SOC óptimo

Después de haber optimizado el problema, se consigue una degradación total final de un 2,1802 % respecto al fin de vida de la celda, es decir 0.13081kWh. Lo que supone un valor demasiado alto si se quiere realizar este tipo de conexión diariamente.

4 Conclusiones

La conexión Vehicle-to-Grid de un vehículo eléctrico es uno de los temas que se debe tratar y desarrollar. Principalmente, el aspecto de la degradación de la batería, ya que de ello dependerá la viabilidad de este tipo de conexión con la red y el desarrollo de una red eléctrica más distribuida en vez de centralizada.

La principal conclusión que cabe destacar es que la degradación varía dependiendo de la temperatura y del SOC al que se realicen los servicios V2G.

A diferencia de otros estudios que analizan la profundidad de descarga como parámetro con el que varía la degradación, en este estudio se ha tratado de comprobar si el SOC de la batería a la hora de suministrar servicios de V2G es un parámetro importante a controlar, si se quiere desarrollar esta tecnología.

Se puede apreciar que la degradación sufrida por la batería varía en función de la temperatura y del SOC al que se realice el proceso de V2G. Los resultados muestran que cuando el SOC se encuentra entre un 20 y un 60 % aproximadamente, el valor de la degradación es mayor en temperaturas frías que calientes. Mientras que si el SOC es mayor, la degradación varía muy poco con la temperatura, aunque sí que es cierto que alcanza valores más elevados. Por esta razón, en los escenarios en los que se ha limitado el SOC mínimo a un valor alto, la degradación es mayor.

En este estudio se aprecia, tal y como se ha demostrado en otros estudios como el de la Ref. [43], que la degradación producida por la conexión del vehículo a la red para realizar servicios de V2G es demasiado grande y provoca que durante la vida del vehículo eléctrico haya que cambiar la batería en repetidas ocasiones. Esto lleva a replantear la

viabilidad de este tipo de conexión, que tiene el motivo de la degradación como uno de sus principales frenos al desarrollo.

Aunque este estudio no puede validar esta conclusión, ya que se han utilizado baterías de baja calidad respecto a una batería normal de un vehículo y los valores de degradación obtenidos de los cálculos no corresponden con la realidad.

Uno de los hechos más sorprendentes al realizar los ensayos, es el mal funcionamiento de nuestras baterías a temperaturas bajas. No fue posible introducir perfiles con intensidad de carga mayor de 3 A debido a que saltaban las protecciones y por tanto no se pudieron someter a la diversidad de pruebas que a las baterías a temperatura ambiente y del horno. Esto puede deberse a que a bajas temperaturas, las reacciones químicas que se producen dentro de la batería cambian, debido a la ralentización de movimiento entre las partículas por el frío.

Otro resultado que sorprende es que la degradación a grandes temperaturas es menor que con el frío. Es algo que no se esperaba ya que en diversos estudios en los que se argumenta que la pérdida de la capacidad por el aumento de la temperatura es debida a la formación de una capa en el electrodo que limita las reacciones químicas. [44].

Una de las cosas que más sorprendió al comenzar los ensayos fue la energía total del primer test de capacidad estática realizado a nuestras baterías. La capacidad nominal de éstas es de 5Ah, mientras que en algunas de ellas la energía que podían almacenar llegó a resultar en 5,8Ah.

Esta diferencia lleva a pensar que las baterías no han resultado de gran calidad, ya que, aparte de este detalle, en más ocasiones de las que cabía esperar, la degradación que se producía después de someterlas a un perfil, era negativa, es decir, que la capacidad inicial era menor que la final.

Referencias

1. **[JIAY09] Wang Jiayuan, Sun Zechang, Wei Xuezhe** **"Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications" en "New Energy Automotive Engineering Center" pp. 1657-1661, año 2009**
2. **[ANGL14] Anglin, Donald L. and Sadoway, Donald R., "Battery,"*AccessScience* (McGraw-Hill Education, 2014).**
3. **[AHMA14] M. R. Ahmad, I. Musirin y M. M. Othman** **"Optimal Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithm" 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)**
4. **[XIAO12] Xiaopeng Chen** **«An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles», en *IPEC, 2012 Conference on Power Energy*, 2012, 230.**
5. **[WANG16] Yujie Wang, Chenbin Zhang, Zonghai Chen**, **An adaptive remaining energy prediction approach for lithium-ion batteries in electric vehicles, Journal of Power Sources, Volume 305, 15 February 2016, Pages 80-88, ISSN 0378-7753,**
6. **[NISS16] España, N. (2016) Nissan LEAF - Coche 100% eléctrico.** **Available at: http://www.nissan.es/ES/es/vehicle/electric-vehicles/leaf.html (Accessed: 3 June 2016).**

7. **[JUST13] Justin D.K. Bishop, Colin J. Axon, David Bonilla, Martino Tran, David Banister, Malcolm D. McCulloch,** Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV, Applied Energy, Volume 111, November 2013, Pages 206-218, ISSN 0306-2619,http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094.
8. **[LENG15] Feng Leng, Cher Ming Tan, Michael Pecht**, "Effect of temperature on the aging rate of Li Ion Battery operating above room temperature" Scientific Reports, Nature Publishing Group,Aug 6, 2015

.

1 Introduction

The global growth of fossil fuels and the big necessity of reducing the emissions of greenhouse gases, has encouraged research and development of solutions for the sustainability of the planet. The transport sector strongly depends on these fossil fuels and contributes significantly to the emission of greenhouse gases, therefore a lot of researches are trying to find alternatives [1]. The development of hybrid and electric vehicles is a solution that not only helps to reduce greenhouse gases, but also the dependence on conventional fuels [1].

These vehicles need to store electricity for later supply it to the electric motor that will transform the electricity into mechanical energy to move the vehicle. This energy storage device is the battery, which is defined as an electrochemical device that allows accumulating chemical energy in order to transform it into electrical energy in DC form [2].

The battery is one of the key elements when designing an electric vehicle, since it is the element that gives autonomy to it. So it is necessary to highlight the importance of a good choice and a proper battery maintenance, usually because its cost is very high.

There are several features of batteries to determine and choose which is most suitable for a given electric vehicle. For example, energy density, wide operating temperature range and high number of cycles of charging and discharging [3].

Nowadays, batteries that are closer to the minimum targets for electric vehicles, are the lithium-ion (Li-ion) [4]. Therefore, the study that is carried out is about a battery of this type, the lithium-ion polymer batteries, which are a Li-ion battery with polymer coating and are suitable for use in electric vehicles due to its high energy density, low self-discharge rate and long life. [5]

Moreover, the battery maintenance is also very important because it will determine the degradation suffered by the battery, thus the need to replace it, which represents a very high cost. Therefore, this study tries to minimize such degradation, but focused on a connection of a vehicle to provide frequency regulation services, it means, putting the battery power available to the power grid.

This approach is because it is expected that, in the not too distant future, the power grid will progressively decentralized until it becomes a distributed network. This means that the electrical energy generated not only come from the main power stations, such as the coal or nuclear, but also comes from solar panels or other generation from private homes. At this point, the concept of Vehicle-to-Grid appears, it is a strategy of connection that allows the electric vehicle to participate in the power of the grid. This type of connection can sell and make available to the network the battery energy.

Currently, various researches have been carried out in order to improve the life of batteries incorporated in this type of vehicle batteries. Typically, these studies have been done from the perspective of the network connection when charging batteries as efficient as possible, but rarely taking into account the degradation of the battery.

Therefore it is carried out this study; consisting of designing a model that measures the rate of degradation of the battery depending on the temperature and state of charge or SOC when connected to make available the battery power to the grid. Then, this model is linearized and applied to an optimization problem that manages the charging and discharging strategies in an electric vehicle, minimizing the degradation suffered by the battery when it provides Vehicle-to-Grid services.

2 Methodology

In this study there are two processes to achieve the objectives set, on the one hand, it is the process to create the degradation model, on the other hand, the process for a method of minimizing such degradation.

To achieve the degradation cycle model, two parameters have been studied that could affect battery life. These parameters are the state of charge or SOC and temperature.

In order to study the variation of degradation depending on the SOC, the batteries were subjected to charge and discharge profile of a depth of 10% with different SOC values.

With the aim of studying the variation of degradation depending on the temperature, the above tests were performed on batteries that were at different temperatures. That is, some batteries were in an oven at 50 ° C while the tests, other batteries in a freezer at 5 ° C and other at room temperature in the laboratory which value was approximately 25° C.

These tests provide thousands of data that need to be processed and organized. It is used the Excel tool, with which there have been do several calculations for finding the important parameters such as the average SOC, the depth of discharge, the average temperature or degradation cycle.

All these processed and organized data are used in the Matlab program to represent graphically the results and obtain a piecewise linear function of battery degradation model.

Furthermore, to design a method or strategy of connection that minimizes degradation of the battery has been used GAMS tool. In order to see how a battery of an electric vehicle would behave when connected to the grid to provide Vehicle-to-Grid services, different scenarios have been designed with different temperature profiles and different SOC conditions.

The input data used GAMS to reach the results of degradation are: initial, final, maximum and minimum SOC, the piecewise linear function of battery degradation model, the profile of energy demanded by the grid for frequency regulation and the profile of temperatures overnight.

3 Results

The most important results that have been obtained are shown below in the form of graphs:

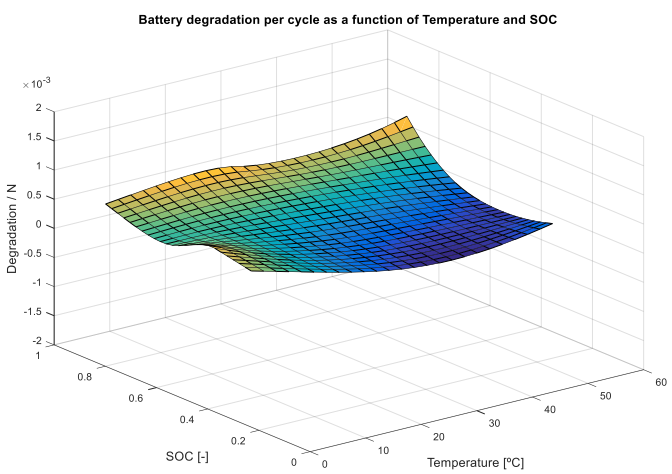

Fig. 1 Estimated surface of degradation per cycle depending on the temperature and SOC surface.

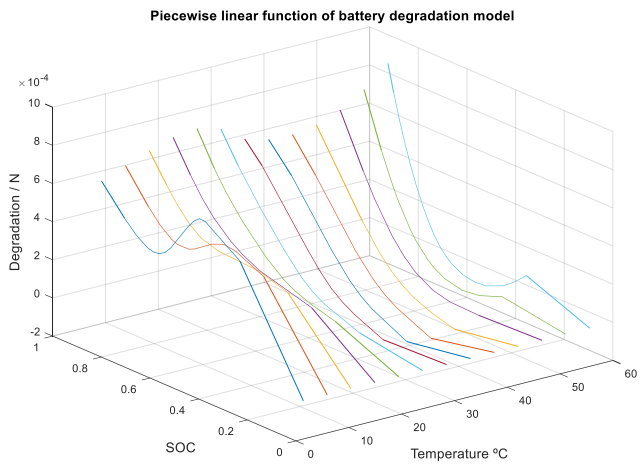

Fig. 2 Piecewise linear function of battery degradation model

In Figure 1 is shown an estimated surface of degradation per cycle estimated by interpolation of data obtained in the tests. From the data obtained in that interpolation, Figure 2 is plotted, which allows to obtain a linear model for insertion into the optimization tool GAMS.

10 different scenarios were simulated in GAMS, where the degradation to a temperature profile given is minimized by varying the state of charge of the battery of an electric vehicle having a total capacity of 30 kWh, as Nissan Leaf [6].

Then, the optimized results of scenario 1 are represented below, with January temperatures, a minimum SOC 3 kWh, an initial SOC 10 kWh and 25 kWh as final SOC.

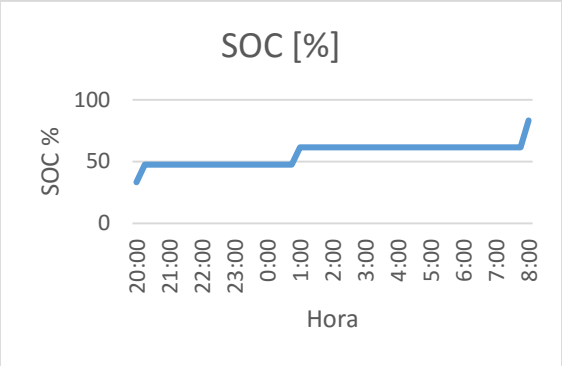

Fig. 3 Optimal SOC for the scenario 1 conditions

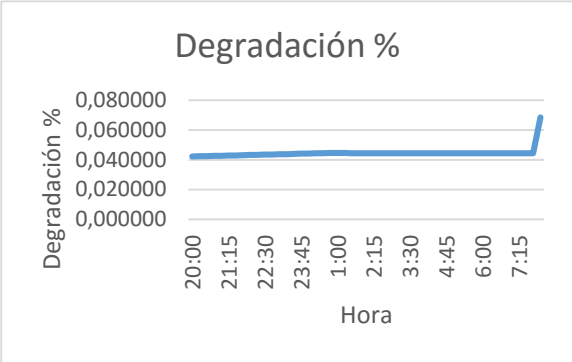

Fig. 4 Degradation for the scenario 1 conditions and the optimal SOC

After optimizing the problem, the total degradation is 2.1802% over the end of life of the cell, it means that 0.13081kWh is achieved. Which is a value too high if you want to perform this type of connection daily.

4 Conclusions

The Vehicle-to-Grid connection of an electric vehicle is one of the issues that must be addressed and developed. Mainly, the aspect of battery degradation, since the viability of this type of connection to the network and the development of a distributed power grid, depends on it.

The main conclusion to be noticed is that the degradation varies depending on the temperature and the SOC to the V2G services are performed.

Unlike other studies that examine the depth of discharge as a parameter which with degradation varies, in this study it was found that the SOC of the battery when supplying services V2G is an important parameter to control if you want to develop this technology.

In this study can be appreciated that the degradation suffered by the battery varies depending on temperature and SOC to the V2G process is performed. The results show that when the SOC is between 20 and 60% approximately, the value of the degradation is higher in cold than hot temperatures. While if the SOC is higher, degradation varies little with temperature, although it is true that reaches the highest values. For this reason, in scenarios in which the minimum SOC is limited to a high value, degradation is bigger.

In this study can be seen, as it has been shown in other studies such as the Ref. [43], that the degradation caused by connecting the vehicle to the network for services V2G is too large and it causes the replacement of the battery during the life of electric vehicle repeatedly. This leads to rethink the feasibility of this type of connection, because the degradation is one of the main brakes of the V2G technology.

Although this study cannot validate this conclusion, as it has been used low quality batteries rather than a normal vehicle battery. Thus, the values of the data obtained in the calculations are not realistic.

One of the most surprising facts when carrying out the tests, is the malfunctioning of batteries at low temperatures. It was not possible to introduce intensity profiles with higher loading of 3 A because of the protection and thus they could not subjected to diversity that test batteries at room temperature or at the oven. This may be because at low temperatures, the chemical reactions that occur within the battery change, due to the slowdown of movement between the particles by the cold.

Another surprising result is that degradation at high temperatures is less than with colder temperatures. It is something that was not expected because there exist various studies in which it is argued that the loss of capacity by the increase in temperature is due to the formation of a layer on the electrode limiting chemical reactions [8].

One of the things that was surprinsing when starting the trials was the total amount of energy of the first static capacity test made to our batteries. The nominal capacity of the batteries was 5Ah, while in some of them the energy they could store came to be in 5,8Ah.

This difference suggests that the batteries are not of high quality, since, apart from this detail, on more occasions than expected, the degradation that occurred after subjecting them to a profile, was negative, it means, initial capacity was less than the final.

References

1. **[JIAY09] Wang Jiayuan, Sun Zechang, Wei Xuezhe** **"Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications" en "New Energy Automotive Engineering Center" pp. 1657-1661, año 2009**
2. **[ANGL14] Anglin, Donald L. and Sadoway, Donald R., "Battery,"*AccessScience* (McGraw-Hill Education, 2014).**
3. **[AHMA14] M. R. Ahmad, I. Musirin y M. M. Othman "Optimal Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithm" 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)**
4. **[XIAO12] Xiaopeng Chen «An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles», en *IPEC, 2012 Conference on Power Energy*, 2012, 230.**
5. **[WANG16] Yujie Wang, Chenbin Zhang, Zonghai Chen, An adaptive remaining energy prediction approach for lithium-ion batteries in electric vehicles, Journal of Power Sources, Volume 305, 15 February 2016, Pages 80-88, ISSN 0378-7753,**
6. **[NISS16] España, N. (2016) Nissan LEAF - Coche 100% eléctrico. Available at: http://www.nissan.es/ES/es/vehicle/electric-vehicles/leaf.html (Accessed: 3 June 2016).**
7. **[JUST13] Justin D.K. Bishop, Colin J. Axon, David Bonilla, Martino Tran, David Banister, Malcolm D. McCulloch, Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV, Applied Energy, Volume 111, November 2013, Pages 206-218, ISSN 0306-2619,http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094.**
8. **[LENG15] Feng Leng, Cher Ming Tan, Michael Pecht, "Effect of temperature on the aging rate of Li Ion Battery operating above room temperature" Scientific Reports, Nature Publishing Group,Aug 6, 2015**

.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Especialidad Eléctrica

Modelado de Degradación de Baterías con Aplicaciones para Coche Eléctrico y Almacenamiento Distribuido

Autor: Roberto Amorós Heredia

Director: Christian Calvillo

Madrid

Junio 2016

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi aprecio por el apoyo y gran ayuda de mi diretor de proyecto, Christian Calvillo, quien me ha aportado una guía sólida a seguir en los momentos de pérdida y su gran conocimiento sobre la materia.

Mi gratitud hacia el coordinador de proyectos Fernando de Cuadra, por su atención y su gran rapidez y comprensión al resolver mis dudas.

Sobre todo, me gustaría dedicar el agradecimientos a mi familia, porque sin su cariño y amor nada de estos habría resultado posible. Mi padre, mi madre, mi hermano y mis abuelos han sido un pilar fundamental en mi vida que ha celebrado mis logros, pero lo que es más importante, me han apoyado en mis caídas.

Resumen

Este estudio tiene el objetivo de minimizar la degradación sufrida por la conexión a la red de los vehículos eléctricos que aportan servicios Vehicle-to-Grid, que es un tipo de conexión del vehículo a la red, en la cual la energía de la batería del vehículo se deja a disposición de la red eléctrica. En este estudio se realizan una serie de experimentos de carga y descarga de baterías simulando perfiles de demanda de regulación de frecuencia de red bajo diferentes condiciones de temperatura y estado de carga (State-of-Charge o SOC en inglés, es la expresión que indica la capacidad actual en forma de porcentaje relativo a la capacidad total de la batería [8]), tomando mediciones sobre la pérdida de capacidad, para posteriormente crear un modelo de degradación. Dicho modelo es utilizado después para encontrar estrategias de carga y descarga óptimas para la aplicación de conexión de un vehículo eléctrico a la red para aportar servicios de Vehicle-to-Grid.

Abstract

This study is done in order to minimize the degradation suffered by the grid connection of electric vehicles that provide Vehicle-to-Grid services, which is a kind of connection between the vehicles with the grid that let the energy of the battery to the demand of the grid. Different experiments of charging and discharging batteries have been carried out simulating demand profiles of network frequency regulation under different conditions of temperature and State-of-charge or SOC (It is the expression that gives the current capacity as a percentage of the total capacity), taking measurements on the loss of capacity with the aim of creating a degradation model. This model is then used to find optimal charging and discharging strategies for applying an electric vehicle connection to the network in order to provide Vehicle-to-Grid services.

1. INTRODUCCIÓN 7

1.1 MOTIVACIÓN 8
1.2 OBJETIVOS FINALES 8
1.3 ANTECEDENTES 8
1.4 ESTRUCTURA DEL ESTUDIO 9

2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA 10

2.1 BATERÍAS 10
2.2 BANCO DE PRUEBAS 12
2.3 MODELO "VEHICLE-TO-GRID" (V2G) 15
2.3.1 MODELO DE ESTUDIO 18

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DESARROLLADO 19

3.1 MODELOS DESARROLLADOS PARA OBTENER EL MODELO DE DEGRADACIÓN. 19
3.1.1 PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS A LAS BATERÍAS 19
3.1.1.1 Descripción Test de capacidad estática 21
3.1.2 RECOLECCIÓN DE DATOS DE LAS PRUEBAS 22
3.1.3 BASE DE DATOS DESARROLLADA 24
3.1.3.1 Algoritmo empleado 25
3.1.4 MODELO DESARROLLADO DE MATLAB 26
3.1.4.1 Algoritmo de Matlab 26
3.1.4.1.1 DataProcess 26
3.1.4.1.2 ViewData 26
3.1.4.1.3 VisualizarDatos 27
3.1.4.1.4 Surface 27
3.1.4.1.5 myLines 27
3.1.4.1.6 Histograma 27
3.2 MODELO DESARROLLADO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA DEGRADACIÓN 27
3.2.1 MODELO OBJETIVO GAMS 27
3.2.1.1 Formulación matemática 27
3.2.1.1.1 Función objetivo 27
3.2.1.1.2 Modelo de interpolación 28
3.2.2 DISEÑO ESCENARIOS A OPTIMIZAR 31
3.2.2.1 Diseño perfiles temperaturas 31
3.2.2.2 Obtención datos demanda regulación 34
3.2.2.3 Obtención datos modelo lineal de optimización 35
3.2.2.3.1 Formación de rectas a partir de puntos [38]. 37

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS 38

4.1 RESULTADOS REPRESENTACIÓN MODELO DEGRADACIÓN 38
4.1.1 REPRESENTACIÓN 3D PUNTOS. 38
4.1.2 REPRESENTACIÓN SUPERFICIE APROXIMADA DEL MODELO 42
4.1.3 MODELO LINEAL POR TRAMOS DE LA DEGRADACIÓN DE LA BATERÍA. 46
4.2 RESULTADOS OPTIMIZACIÓN DE LOS ESCENARIOS PLANTEADOS. 48
ESCENARIO 1 49

RESULTADO 49
Escenario 2 51
Resultado 51
Escenario 3 52
Resultado 52
Escenario 4 54
Resultado 54
Escenario 5 56
Resultado 56
Escenario 6 57
Resultado 57
Escenario 7 59
Resultado 59
Escenario 8 60
Resultado 60
Escenario 9 62
Resultado 62
Escenario 10 63
Resultado 63
4.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN 65
4.2.2.1 Comparación temperaturas frías 66
4.2.2.2 Comparación temperaturas abril 66
4.2.2.3 Comparación temperaturas octubre 66
4.2.2.4 Comparación temperaturas julio 66
4.2.2.5 Comparación temperaturas altas 66
4.3 MARGEN DE ERROR 67
4.3.1 HISTOGRAMA 67
4.3.2 ERROR DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN 68

5 CONCLUSIONES 69

5.1 CONCLUSIONES RESULTADOS 69
5.2 CONCLUSIONES METODOLOGÍA 70
5.3 COMENTARIOS Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS ESTUDIOS 70

ANEXO I 72

RESULTADOS OBTENIDOS 72
RESUMEN RESULTADOS EXCEL 72
RESULTADOS NEGATIVOS MATLAB 74
RESULTADOS OPTIMIZACIÓN GAMS 77
Escenario 1 77

ANEXO II 80

TERMINOLOGÍA 80

ANEXO III 83

ESTADO DEL ARTE **83**
1. DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA 83
1.1 Baterías Secundarias: 83
1.1.1 Baterías de Plomo-ácido (PbA): 84
1.1.2 Baterías de plomo-ácido de válvula regulada. 85
1.1.3 Baterías AGM 85
1.1.4 Baterías Níquel-Cadmio (NiCd) 85
1.1.5 Baterías de Níquel-Zinc (NiZn) 86
1.1.6 Baterías de Níquel metal hidruro (NiMH) 86
1.1.7 Baterías de Litio-ion (Li-ion) 87
1.1.8 Tipos de baterías Litio-ion: 88
1.1.9 Baterías Litio-ion polímero (LiPo) 89
2. ESTRATEGIAS DE CARGA 90
2.1 Tipos de carga dependiendo de la potencia 90
Carga lenta 90
Carga rápida 90
Carga ultra-rápida 90
2.2 Estrategias de carga de vehículos 90
2.3 Arquitectura de control centralizada 91
2.4 Arquitectura de control descentralizada 93
2.5 Otras estrategias de carga 94
2.6 Conexión del vehículo a la red o "Vehicle to grid" (V2G). 96
2.7 Qué es la regulación de frecuencia. 97
2.9 Red distribuida 99

ANEXO IV **102**

MODELOS ALTERNATIVOS A OPTIMIZAR. **102**

BIBLIOGRAFÍA **107**

1. Introducción

La creciente demanda mundial de combustibles fósiles y la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha fomentado la investigación y el desarrollo de soluciones para la sostenibilidad del planeta. El sector del transporte depende de esos combustibles fósiles y además contribuye considerablemente a esa emisión de gases de efecto invernadero, por tanto se están centrando muchas investigaciones en encontrar alternativas [1]. El desarrollo de vehículos híbridos y eléctricos es una solución que ayuda a reducir no sólo los gases de efecto invernadero, sino también la dependencia de los combustibles convencionales [1].

Estos vehículos necesitan almacenar la energía eléctrica para suministrarla posteriormente al motor eléctrico que transformará esa electricidad en energía mecánica para mover el vehículo. Ese dispositivo de almacenamiento de energía es la batería, la cual está definida como un dispositivo electromecánico que permite acumular energía química, para convertirla en energía eléctrica en forma de corriente continua [2].

La batería es uno de los elementos claves a la hora de diseñar un vehículo eléctrico ya que es el elemento que le aporta la autonomía. Por lo que es necesario resaltar la importancia de una buena elección y un buen mantenimiento de la batería ya que normalmente su coste es muy alto.

Existen diversas características de las baterías para determinar y elegir cuál es la más conveniente para un vehículo eléctrico determinado. Por ejemplo, la densidad energética, amplio rango de temperatura de operación y alto número de ciclos de carga y descarga [3].

Actualmente, las baterías que más se acercan a los objetivos mínimos de los vehículos eléctricos para su comercialización, son las baterías de Litio-ion (Li-ion) [4]. Por ello, el estudio que se lleva a cabo es sobre una batería de este tipo, las baterías Litio-ion Polímero, la cual es una batería Li-ion con la cubierta de polímero y son adecuadas para el uso en vehículos eléctricos por su alta densidad energética, baja tasa de auto descarga y larga vida útil. [5]

Por otro lado, el mantenimiento de la batería también es muy importante, ya que de ello dependerá de la degradación que sufra la batería y por tanto de la necesidad de comprar otra batería, lo que supone un coste muy alto. Por ello, se trata en este estudio minimizar esa degradación, pero enfocado a una conexión de un vehículo que aporte servicios de regulación a la red, es decir, que pone la energía de la batería a disposición de la red.

Este planteamiento se debe a que, en un futuro no muy lejano, se espera que la red eléctrica se vaya descentralizando progresivamente hasta conseguir una red distribuida. Esto quiere decir, que la energía eléctrica que se genera no sólo proviene de las centrales principales, como pueden ser las de carbón o las nucleares, sino que también provenga de placas solares u otro tipo de generación de particulares. En este punto entra la conexión Vehicle-to-Grid, que permite participar en la red a la energía de los vehículos eléctricos conectados. Este tipo de conexión permite vender y poner a disposición de la red la energía de las baterías. Se puede encontrar explicada con mayor profundidad en la sección 2.3 de este estudio.

En la actualidad, se están llevando a cabo diversas investigaciones para conseguir mejorar la vida útil de las baterías incorporadas a este tipo de vehículos. Normalmente, estos estudios se han hecho desde la perspectiva de que la conexión a la red a la hora de cargar las baterías sea lo más eficiente posible, pero pocas veces teniendo en cuenta la degradación de la batería.

Por ello se lleva a cabo este estudio; que consiste en el diseño de un modelo del que se obtenga la velocidad de degradación de la batería, en función de la temperatura y del estado de carga o SOC cuando se conecta para poner a disposición de la red la energía de la batería. A continuación, este modelo es linealizado y se aplica en un problema de optimización que gestiona la carga y descarga en un vehículo eléctrico, minimizando la degradación sufrida por la batería cuando aporta servicios de Vehicle-to-Grid.

1.1 Motivación

La motivación para realizar el proyecto es intentar conseguir aumentar la vida útil de las baterías Li-ion polímero aplicadas en vehículos eléctricos mediante la optimización de la carga de la batería teniendo en cuenta la degradación de ésta.

El objetivo es formular un modelo de degradación de la batería que reproducirá la degradación sufrida por una batería como una función de su uso para el uso en servicios Vehicle-to-Grid, descritos posteriormente en el proyecto, lo que permite la comparación entre diferentes estrategias de gestión de energía, así como incluir esta función en algoritmos de optimización lineales para la carga y descarga.

1.2 Objetivos finales

- Identificar los factores más importantes que afectan a la degradación de las baterías.
- Identificar las características de operación de baterías en aplicaciones “Vehicle-to-Grid”, es decir, la intensidad y el tipo de carga y descarga de la batería.
- Desarrollar un modelo de degradación de las baterías Litio-Polímero en función de su uso, para diversas características de temperatura y profundidad de descarga.
- Encontrar un modelo óptimo de carga y descarga de las baterías para aplicaciones "vehicle to grid" usando el modelo de degradación generado.

1.3 Antecedentes

La idea de este estudio está basada principalmente en la minimización de la degradación de las baterías. Pero no es el primer estudio que se realiza acerca de ello, aunque sí que tiene sus aspectos particulares.

El proyecto se encuentra orientado mediante los siguientes estudios:

- *“Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization”*[6]: En el cual se presenta un método para minimizar el coste de la carga del vehículo dados unos costes de la electricidad variables, contando también con el coste de la degradación de la batería.

- *"A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System"*[7]:En el cual se realiza una demostración práctica de la conexión Vehicle-to-Grid (V2G) aplicado a la regulación de la frecuencia de la red PJM de Estados Unidos.
- *"Capacity fade and aging models for electric batteries and optimal charging strategy for electric vehicles"*[8] : El cual ha sido realizado en el IIT de ICAI y se trata de un estudio con una estructura muy similar a este. Trata el tema de la pérdida de capacidad de las baterías de un vehículo eléctrico sometidas a ciclos de diferentes profundidades de descarga. El procedimiento para realizar este proyecto se basa en los diferentes pasos seguidos en este estudio.
- *"Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV"*[43]*:* En el cual se realiza un estudio profundo sobre el impacto de la conexión a servicios V2G en la degradación de la batería. Argumenta que la degradación aumenta con la cantidad de energía que se utiliza y la profundidad de descarga. Llega a la conclusión de que se requerirían varios cambios de batería durante la vida del vehículo.

En el anexo III se puede encontrar el estado del arte, en el que se puede ver toda la información respecto a los diferentes temas tratados en este proyecto.

1.4 Estructura del estudio

Como se ha mencionado en el apartado 1.3, la estructura de este proyecto se ha enfocado de manera muy parecida al estudio llevado a cabo en la Ref. [8].

En primer lugar se realiza una investigación y estudio de los documentos existentes acerca de los temas que se van a tratar como son los motivos de la degradación de las baterías y los diversos modelos de optimización de carga y descarga que existen.

En nuestro caso, hemos decidido optar por analizar la degradación que sufren las baterías al ser utilizadas en la estrategia Vehicle to Grid, en la cual la energía de la batería se pone a disposición de la regulación secundaria o terciaria de la red eléctrica.

En segundo lugar, una vez decidido qué modelo se va a utilizar para realizar los ensayos, se deben crear los perfiles para que la máquina que realiza las pruebas los pueda ejecutar. Basados en la Ref. [7], los perfiles creados realizan cargas y descargas de un 10% de capacidad a diferentes niveles de SOC (State of Charge). Similares a la siguiente figura:

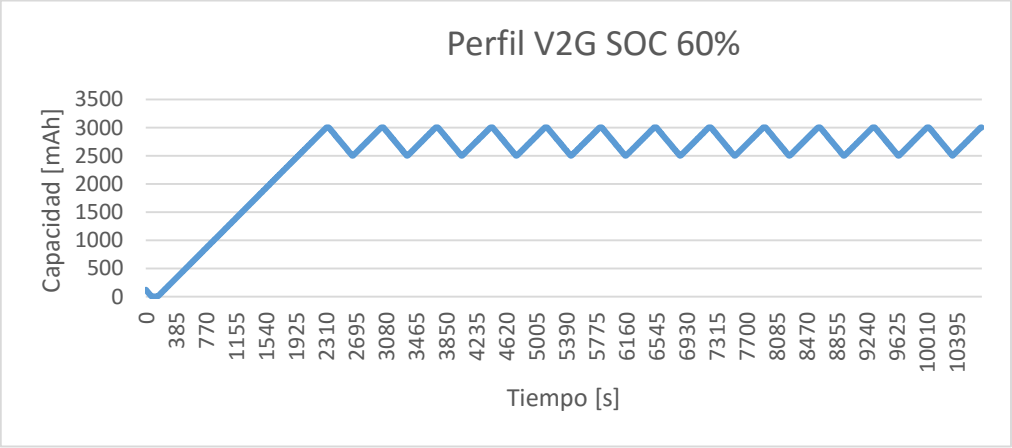

Figura 1. Representación perfil 60 % SOC

En tercer lugar se procede a realizar los ensayos de las baterías a diferentes temperaturas y estados de carga guardando los resultados.

Estos resultados son analizados y procesados posteriormente para encontrar los principales motivos de degradación de estas baterías. El procesamiento de los datos se lleva a cabo mediante Excel, en el cual se ha programado para que realice diferentes cálculos y los organice de manera que se muestre todos los parámetros importantes para realizar el análisis.

Para realizar el análisis de manera mucho más intuitiva, se utiliza Matlab. Con los datos organizados de Excel, se trata de representar, mediante diferentes scripts, gráficas en las que se muestren los resultados de manera que se observe mejor las características de las pruebas y se obtenga el modelo de degradación por ciclo de la batería.

El modelo de degradación obtenido, junto con otros datos de entrada, como son la batería o diferentes condiciones del SOC del vehículo, son introducidos en el algoritmo de GAMS para optimizar el proceso, minimizando la degradación en diversos escenarios creados.

Todo esto se encuentra descrito con mayor detalle en la sección 3 de este proyecto.

2. Descripción de la tecnología

En este apartado se va a describir la tecnología que se ha empleado para desarrollar el estudio. Por un lado se describirán las baterías y la máquina en la que se han realizado los ensayos, por otro lado se describirá el modelo teórico que se ha empleado para crear los perfiles de las pruebas, es decir, en qué consiste lo conocido como Vehicle-to-Grid.

2.1 Baterías

El tipo de batería empleada para realizar las pruebas ha sido el “SLPB 50106100” de la marca Kokam. Se tratan de unas baterías denominadas como superlithium polymer battery (SLPB) por la misma marca y que se caracterizan por tener una densidad energética alta, mayor vida útil, excelente potencia y por su seguridad debida a que son capaces de operar en un alto rango de temperaturas extremas.

El modelo elegido es un tipo de batería denominado como “Alta energía Níquel-Magnesio-Cobalto (NMC)” que se caracterizan por tener las siguientes ventajas [9]:

- Alta densidad energética (151 Wh/kg).
- Una eficiencia de más del 96% a 0.5C.
- Relación calidad/ precio muy buena debido a sus prestaciones de funcionamiento, confianza y seguridad.

Fig. 2 Imagen batería modelo “SLPB 50106100” [9]

Para ver un ejemplo ilustrativo de las características de este tipo de baterías se aporta la siguiente imagen:

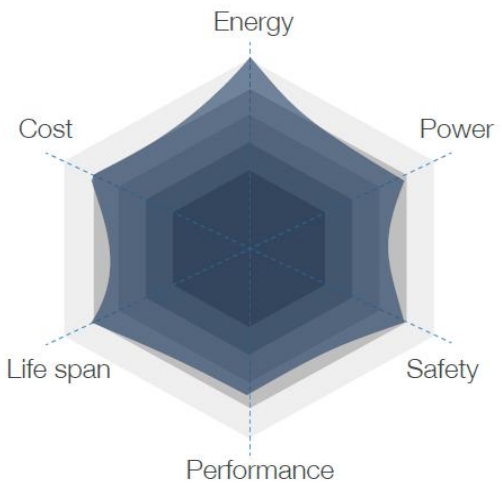

Fig. 3 Representación visual de las características de las baterías "Alta energía NMC" [9]

Centrándonos en nuestro modelo de batería específico se muestra a continuación una tabla con todas sus características y datos que nos aporta la marca Kokam:

Modelo			SLPB 50106100
Capacidad [Ah]			5
Dimensiones [mm]	Ancho		107
	Largo		102
	Espesor		5.9
CA-RI[mΩ]			5
Peso [g]			140
Valores descarga	C-Rate (C)	Continuo	5
		Pulsos	8
Densidad energética [Wh/kg]			151
Química			HE NMC

Tabla 1. Datos batería SLPB50106100 [9]

También se debe especificar los datos de referencia de carga y descarga con los que se ha trabajado para diseñar los modelos de carga y descarga para no sobrepasar los límites de la batería y poder calcular su capacidad total después de cada prueba.

Tensión nominal		3.7V
Condiciones de carga	Corriente máxima	5 A
	Tensión	4.2V±0.03V
Condiciones de descarga	Corriente continua	10 A
	Corriente pico	25 A
	Tensión de corte	2.7V
Ciclos de vida DOD80%		>800 Ciclos
Temperatura de operación	Carga	0-40ºC
	Descarga	-20-60ºC

Tabla 2. Especificaciones batería SLPB 50106100 [10]

2.2 Banco de pruebas

La herramienta elegida para realizar las pruebas y recoger los datos de las medidas es el modelo "BTS3000-5V6A" de la marca china Neware, que se dedica especialmente a fabricar diferentes tipos de instrumentos para realizar pruebas a las baterías.

En nuestro caso al realizar pruebas solamente a celdas de baterías, que trabajan a una tensión máxima de 4.2 V, no necesitábamos un equipamiento de características diferentes a las que nos puede aportar el modelo en cuestión.

La serie BTS3000 es la tercera generación de su instrumentación y está diseñada específicamente para realizar pruebas de capacidad y ciclos de vida útil de celdas. El modelo 5V6A se trata de un producto que aporta baja corriente, y se caracteriza por su extrema estabilidad y precisión.

Fig. 4 Imagen del banco de pruebas

Las características y funciones por las que destacan esta serie de instrumentación son:

- Gran rango de aplicaciones de estudio (ciclos de vida, degradación, consecuencias de la sobrecarga o sobredescarga, etc.).
- Adaptable a un gran repertorio de tipos de baterías (celdas, módulos, cilíndricas, etc.)
- Incluye el software "BTS client", el cual permite representar y visualizar fácilmente gráficas de diferentes parámetros
- Capacidad de almacenar casi 1Gb de datos de las pruebas de las baterías.

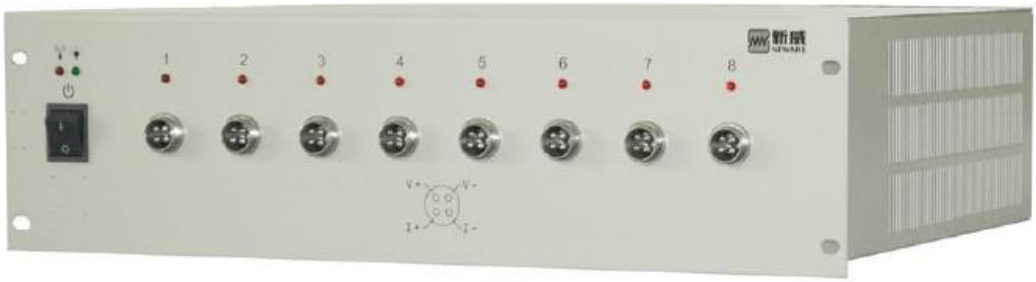

Fig. 5 Imagen Modelo BTS3000 5V6A Neware Battery Tester [11]

Las especificaciones técnicas del modelo BST3000 5V6A se pueden ver en la siguiente tabla:

Modelo		BTS3000-5V6A	
CA entrada		220V±10% 50Hz	
Potencia		448 W	
Impedancia de entrada		≥1MΩ	
Tensión	Rango de medida	Carga: 10mV-5V	Descarga: 10mV-5V
	Tensión de descarga mínima	10mV	
	Precisión	±0.1% de FS	
	Estabilidad	±0.1% de FS	
Intensidad	Rango	Carga: 12mA-6A	Descarga:12mA-6A
	Precisión	±0.1% de FS	
	Estabilidad	±0.1% de FS	
Potencia	De salida por canal	30W (5Vx6A)	
	Estabilidad	±0.2% de FS	
Tiempo	Rise time	20ms(0-Rango total)	

	Step time	≤(365*24)horas/step	Formato: h:min:s
Recogida de datos	Intervalos	Intervalo de tiempo: 1-60000s	
		Intervalo de tensión: 10mV-5V	
		Intervalo de corriente: 12mA-6ª	
	Frecuencia	1Hz	
Carga	Modos de operación	CCC,CVC,CC&CVC	
	Condiciones de fin	Tensión, corriente, tiempo de prueba, capacidad	
Descarga	Modos de operación	CCD,CPD	
	Condiciones de fin	Tensión, corriente, tiempo de prueba, capacidad	
Ciclos	Número de ciclos	65535	
	Steps	254	
	Funciones en nido	3 niveles de bucles	
Función de seguridad	Software	Protección de datos por apagado	
		Funcionamiento Off-line	
		Límites superior e inferior definidos por el usuario de tensión y corriente.	
	Hardware	Protección para la conexión reversa	
Características canales		Canales independientes con bucles cerrados para las fuentes de corriente y tensión constantes	
Canales		Control independiente	
Gestión de datos		Base de datos MYSQL	
Formatos para exportación		Excel, Txt, Graph	
Interfaz de conexión		Ethernet	

Tabla 3. Especificaciones máquina de pruebas BTS3000 5V6A [11]

2.3 Modelo "Vehicle-to-Grid" (V2G)

La expresión V2G para Vehicle-to-Grid fue denominado por primera vez por AC Propulsion Inc. [15].

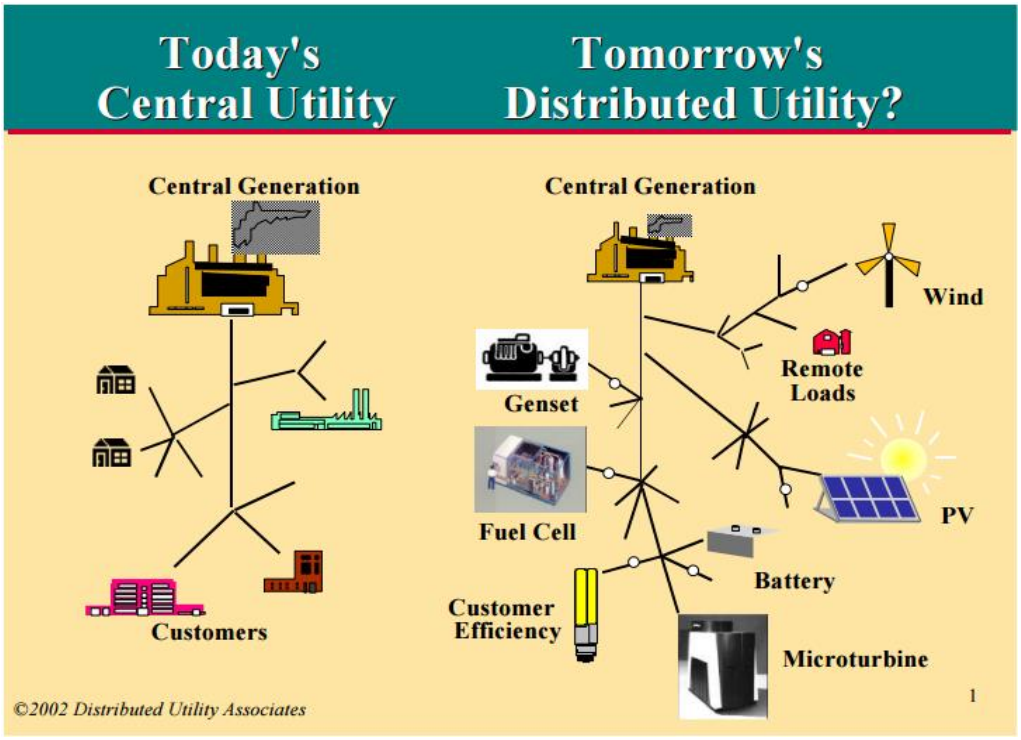

Fig. 6 Comparación entre una red centralizada y una red distribuida

En este esquema se puede comparar la red centralizada que tenemos hoy en día y la red distribuida que se espera que en un futuro exista.

La tecnología V2G permite conecta el vehículo eléctrico a la red para aportar la energía que necesite esa red distribuida. Siempre con unos límites o preferencias que impone el usuario del vehículo.

Existen tres versiones diferentes del concepto del V2G [15]:

- *Un vehículo de combustión* (híbrido o propulsado solo por combustible), el cual genera su potencia a partir del combustible almacenado, utiliza su generador para producir potencia en los momentos en que se existen picos de electricidad. Desde este punto de vista estos vehículos se pueden utilizar como una forma de generación distribuida, produciendo la energía a partir de los combustibles como biocombustibles, combustibles fósiles o incluso a partir del hidrógeno.
- *Un vehículo híbrido o completamente eléctrico*, que utiliza baterías para almacenar su energía eléctrica, puede aportar la capacidad energética que le sobra a la red eléctrica en momentos de picos de demanda. Estos vehículos pueden ser recargados durante horas de menos demanda utilizando energía eléctrica más barata, ayudando después a absorber la generación de energía durante la noche, cuando el precio es más alto. Este es el tipo de vehículos en los que estamos interesados en este proyecto, por tanto se entrará en detalle posteriormente.

- *Vehículos solares*, utilizan el exceso de capacidad que les aporta el sol para dejar esa energía a disposición de la red cuando la batería está totalmente cargada. Se puede considerar como una pequeña estación de generación de energía renovable.

El concepto del Vehicle-to-Grid aplicado en los vehículos híbridos o eléctricos se basa en conectar el vehículo a la red vendiendo la energía eléctrica y dejándola a disposición de la red y consiguiendo así un ingreso de dinero [12]. Este aporte de energía a la red se trata de realizar en las horas en las que el precio de la energía es más alto para conseguir un mayor ingreso de dinero [6]. Visto de otro modo, se puede considerar una reducción en el coste de energía de carga del vehículo.

V2G implica una relación entre el consumidor del vehículo y la organización que controla la red eléctrica. Esta relación se puede considerar como un negocio, es decir el consumidor controla los periodos en los que oferta la energía de su vehículo, mientras que la organización de la red decide cuando necesita comprarla.

Desde el punto de vista del consumidor V2G implica la existencia de diferentes estrategias sobre cuándo ofertar esa energía a la red. Si seguimos la ref. [14], podemos encontrar dos estrategias. La primera llamada "mean strategy" que se basa en la media aritmética de los periodos de oferta que obtuvieron mayor beneficio la semana anterior. Por otro lado encontramos la denominada "margin strategy", en la cual se ofrece el precio máximo de salida del mismo intervalo de tiempo de la semana anterior.

Comparando ambas estrategias, se observa que la probabilidad de que se acepte la oferta por la red es mayor con la "mean strategy", mientras que utilizando "margin strategy" las ofertas que son aceptadas son más altas en precio [14].

Pero desde el punto de vista de la organización de la red, el aporte de energía de las baterías conectadas a la red normalmente es utilizado para la regulación terciaria de frecuencia y potencia [14].

Además de los temas técnicos, también se debe regular un modelo de gestión de todos esos vehículos conectados. Ya que la conexión simultánea de muchos vehículos puede provocar un gran impacto en la red, tanto en términos eléctricos como económicos [13].

En la referencia [13] se proponen dos modelos de gestión de esta conexión por parte de la red. Por un lado encontramos el primero denominado "Retailer-to-CP" en el cual la empresa que controla la electricidad es la que establece el contrato con el propietario de las estaciones de carga, mientras que en la segunda, llamada "Retailer-to-EV", el contrato se establece directamente con el propietario del vehículo eléctrico.

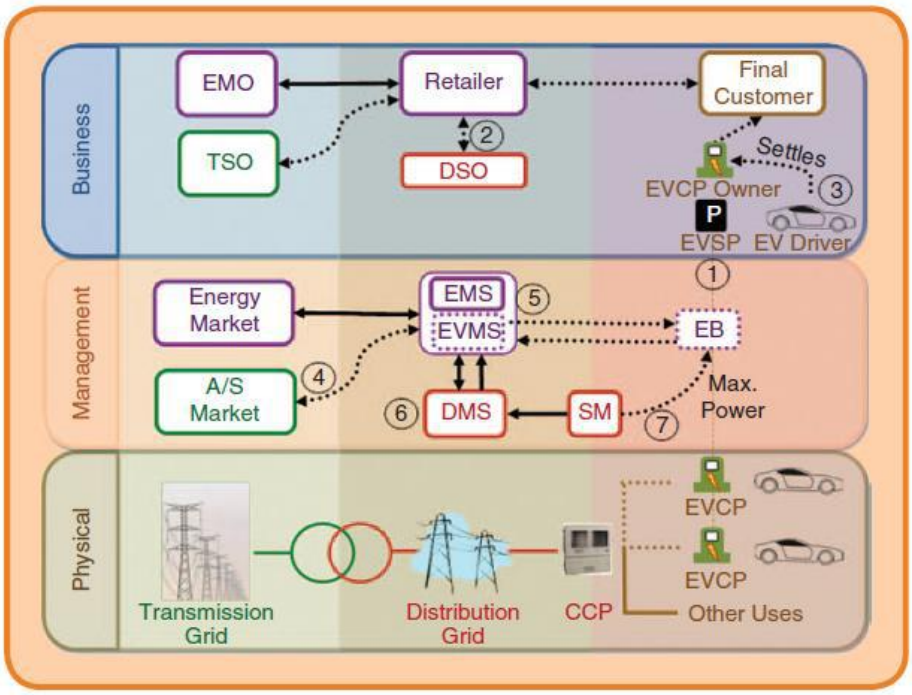

Fig.7 Modelo de negocio Retailer-to-CP [13]

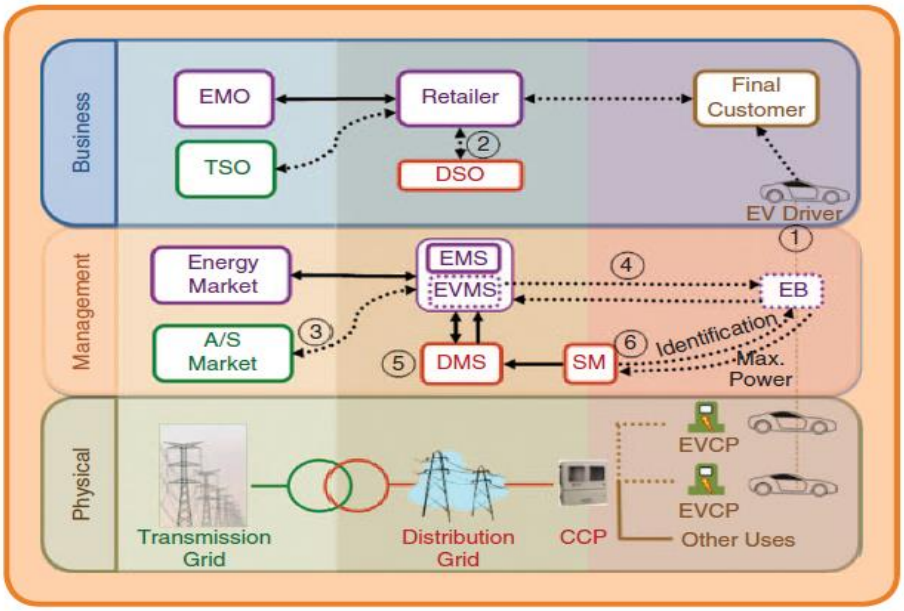

Fig.8 Modelo de negocio Retailer-to-EV [13]

De esta manera, se puede controlar de qué manera se realizará la relación entre el vehículo y la red.

2.3.1 Modelo de estudio

El perfil de una aplicación Vehicle-to-Grid puede ser variado dependiendo la demanda de la red, pero el estudio se va a centrar en la degradación que sufren las baterías al ser utilizadas para la regulación de frecuencia primaria de la red.

La regulación primaria de frecuencia trata de mantener la frecuencia constante en la red y a la vez que cubrir la demanda para abastecer la potencia demandada [40]. Como consecuencia de dejar a disposición de la red la energía de las baterías de los vehículos eléctricos, estas baterías pueden ser cargadas en el caso de querer reducir la frecuencia o descargadas en el caso de querer aumentarla [40].

Para diseñar el perfil de ensayo para estudiar la degradación que produce la aplicación Vehicle-to-Grid en las baterías, este proyecto se ha basado en los resultados del estudio práctico de la Ref. [7]. En el cual se realizan unas pruebas en las que se muestra la demanda de la red a las baterías conectadas mediante V2G para la regulación primaria de frecuencia.

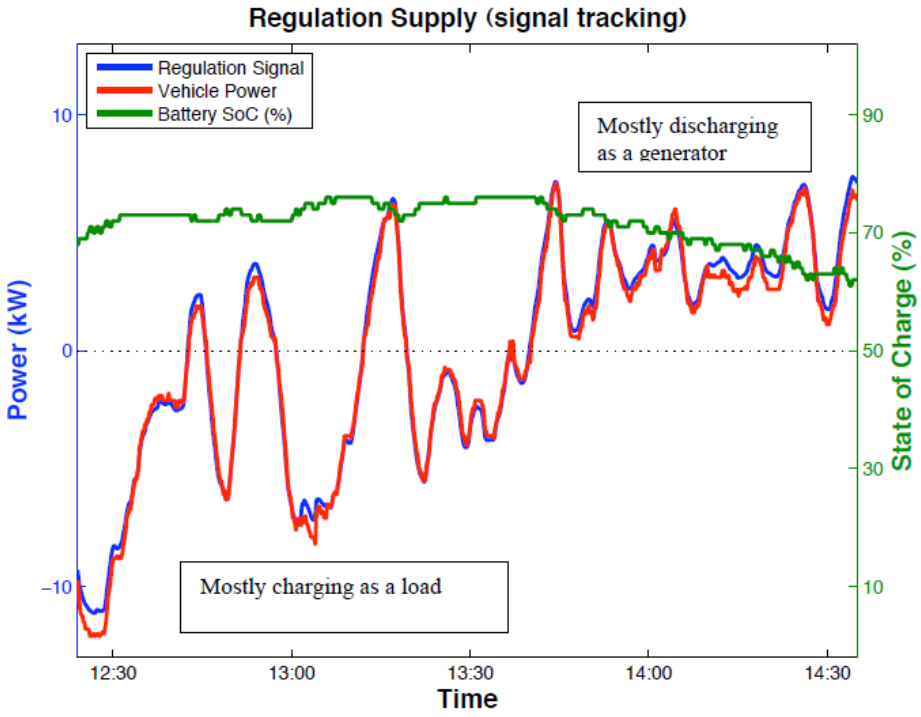

Fig 9. En verde el estado de carga de la batería del vehículo eléctrico [7]

Como se puede observar en la gráfica, la fluctuación del estado de carga de la batería varía en este caso entre aproximadamente un 60-70% (línea verde, Fig. 8). Por lo que hemos decidido modelar los perfiles de los ensayos con ciclos de una profundidad de descarga de una 10% de la capacidad teórica de la batería. En el caso de este estudio, las baterías tienen una capacidad nominal de 5Ah y por tanto la profundidad de descarga será de 0.5Ah.

Lo que nos ha interesado en este proyecto ha sido representar cómo se degradan las baterías a diferentes temperaturas y a diferentes estados de carga (SOC). Por un lado se han realizado pruebas en un congelador (5^0C), a temperatura ambiente (25^0C) y en un horno (50^0C). Por otro lado, esos ciclos de variación del 10%, se han realizado en estados

de carga de aproximadamente 40%, del 60%, del 80% y del 100% respecto a la capacidad nominal. Aunque hay que destacar el hecho de que la capacidad real de algunas de las baterías variaba mucho respecto de la capacidad nominal; por ejemplo, una de las baterías comenzó con una capacidad de 5.8Ah, lo que resulta en que sus pruebas en vez del 80% de estado de carga se han realizado al 70%.

En la siguiente gráfica se puede ver un ejemplo más intuitivo de que se haya realizado el ensayo con un estado de carga del 60%:

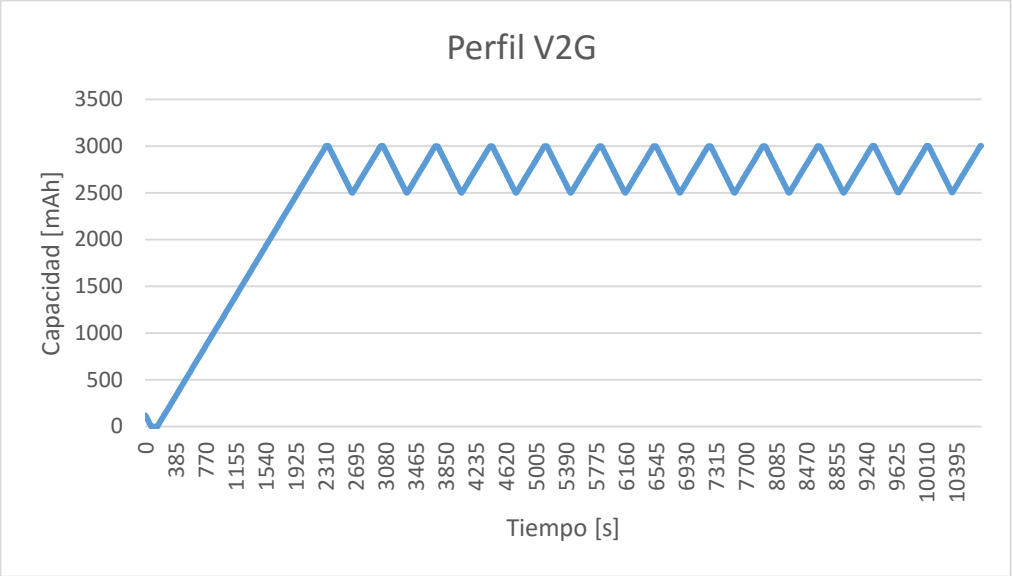

Fig. 10 Representación de un ensayo llevado a cabo en las baterías con un SOC del 60%

Se puede observar que de la capacidad nominal de la batería (5Ah) se carga hasta aproximadamente el 60% y se comienzan los ciclos de carga y descarga de profundidad del 10%.

El resto de pruebas se realiza con el mismo perfil, pero con la diferencia de que se inicialmente se carga a una capacidad distinta.

3 Descripción del modelo desarrollado

En los siguientes apartados se describe, por un lado, el proceso desarrollado y empleado para la obtención de un modelo estimado de la degradación por ciclo en función de la temperatura y el SOC, y por otro lado, el proceso empleado para optimizar los diferentes escenarios que se han propuesto.

3.1 Modelos desarrollados para obtener el modelo de degradación.

3.1.1 Procedimiento de las pruebas a las baterías

El procedimiento que se ha seguido para realizar los ensayos está basado en la Ref. [8].

Con el objetivo conseguir una visión total del proceso llevado a cabo se va a describir desde una explicación global del proceso hasta las tareas más específicas.

Para realizar el estudio, las baterías son sometidas a un número considerable de ciclos y se va registrando la degradación que va sufriendo después de cada prueba. Estas baterías

se encuentran a diferentes temperaturas, ya sea en un congelador, horno o a temperatura ambiente y también van siendo sometidas al perfil diseñado a diferentes estados de carga (SOC).

Seis baterías de litio-ion polímero fueron probadas durante un periodo de seis meses a diferentes temperaturas y estados de carga. Alrededor de 120 pruebas se llevaron a cabo, en las que se incluyen alrededor de 9000 cargas y descargas de una profundidad del 10% respecto de la capacidad nominal indicada por el fabricante.

De las seis baterías, dos fueron introducidas en un congelador ESPEC (Modelo SU-220), donde la temperatura era regulada y establecida a unos constantes 5 ºC. Otras dos baterías fueron introducidas en un horno de secado de la marca Nahita, donde la temperatura se estableció constante a 50 ºC. Las últimas dos baterías se dejaron a temperatura ambiente del laboratorio, lo que aproximadamente resulta en 25 ºC.

Las baterías del horno y las que estaban a temperatura ambiente fueron sometidas a ensayos con SOCs de 40-60-80-100% de la capacidad nominal y una intensidad de carga y de descarga de 6 A. Mientras que las baterías que se pusieron en el congelador sólo pudieron ser sometidas a ensayos con SOCs del 40 y 60% de la capacidad nominal y con una intensidad máxima de carga de 3A debido a que si se sometían a los mismos perfiles que las baterías que se encontraban a mayor temperatura, saltaban las protecciones y por tanto se paraban los ensayos.

Si nos centramos a las pruebas a las que se somete una batería específica, podemos diferenciar el siguiente proceso:

1. Se realiza el primer "Test de capacidad estática" (el cuál será descrito posteriormente), que mide la capacidad total que puede almacenar la batería en ese momento. Aunque el fabricante informaba de que la batería tenía 5Ah como capacidad inicial, se ha probado que para cada batería esa capacidad ha sido diferente incluso resultando en casi 6Ah, por lo que los porcentajes descritos son basados en la nominal y no en la medida.
2. Se deja en reposo la batería entre 5 y 10 horas para que se estabilice.
3. La batería es sometida al perfil diseñado simulando el Vehicle-to-Grid descrito en el apartado 2.3, al estado de carga (SOC) que corresponda y el número de ciclos indicado. Por ejemplo, es sometida a un perfil de 50 ciclos de carga y descarga del 10% a un estado de carga de aproximadamente un 60%.
4. Se realiza el segundo "Test de capacidad estática", que medirá la capacidad total después del ensayo realizado a la batería.
5. Para obtener la degradación que se ha producido debida al perfil introducido a la batería, se utiliza la siguiente fórmula:

$$DegradaciónBatería = \frac{Cap_1 - Cap_2}{Cap_1 - 0.8 \cdot Cap_1} \quad (ec.\ 1)$$

Donde Cap_1 y Cap_2 son la capacidad al inicio y la capacidad al final de la realización de la prueba, respectivamente. A la hora de procesar los datos, también se halla la degradación por cada ciclo dividiendo esa degradación por el número de ciclos realizados.

6. Se repiten los pasos 3 y 4 utilizando la capacidad del segundo “Test de capacidad estática" como si fuera el inicial y así sucesivamente.
7. El fin del proceso se produce cuando la batería ha alcanzado su fin de vida o el periodo de pruebas se terminó.

A partir de aquí, los datos obtenidos son procesados y organizados por Excel, se aproxima el modelo de degradación en Matlab y finalmente se simulan diversos escenarios optimizados gracias al algoritmo implementado en GAMS. Todo este proceso es realizado tal y como se describe en los apartados anteriores.

3.1.1.1 Descripción Test de capacidad estática

Para medir la capacidad estática de una batería, se ha seguido el procedimiento indicado en la Ref. [16], el cual es resumido en la Ref. [8] de la siguiente forma:

1. La batería se deja durante 5 horas a temperatura ambiente para que alcance el equilibrio.
2. La batería se carga completamente diseñando los parámetros según las especificaciones del fabricante. Es decir, cargando a corriente constante a 0.6C hasta que la batería alcanza 4.2V, seguido de tensión constante hasta que la intensidad alcanza los 0.05C.
3. La batería se deja descansar durante 1 hora. Lo que permite que los elementos químicos y la temperatura se estabilicen.
4. La batería es descargada a corriente constante igual a 0.6C hasta que se alcanza la tensión de corte, en nuestro caso 2.75V.

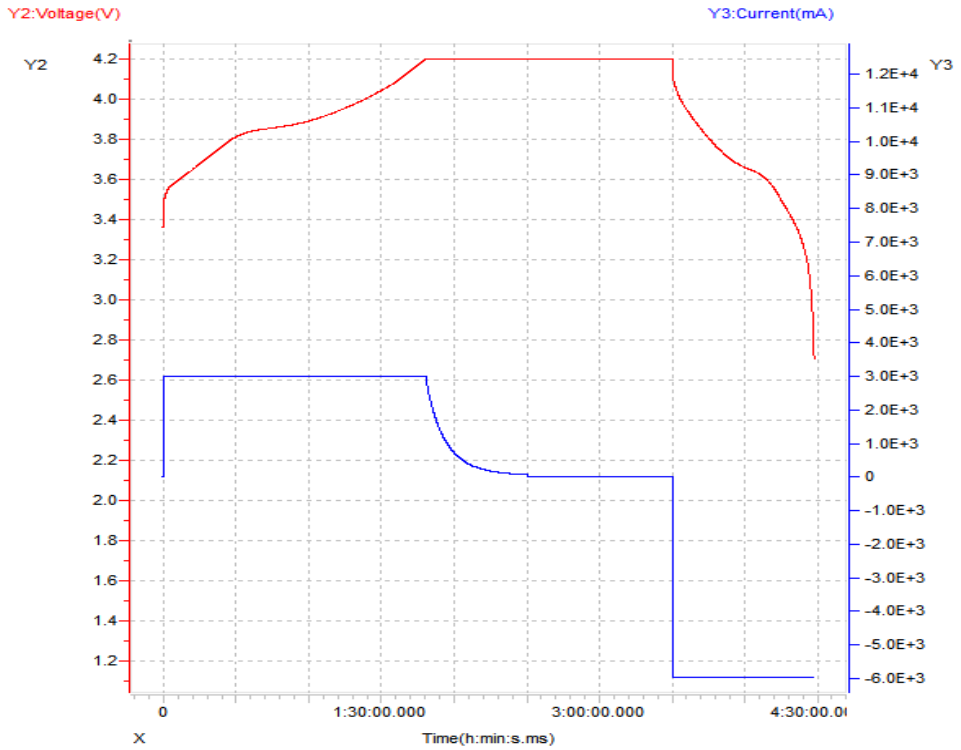

Fig. 11 Representación tensión e intensidad en el Test de Capacidad estática

3.1.2 Recolección de datos de las pruebas

Los datos son recogidos gracias al programa BTS Client, que es el software incluido con el banco de pruebas.

Desde este software se realiza la conexión entre el ordenador y la máquina que realiza las pruebas. Esta conexión se realiza vía Ethernet, por lo que se debe configurar de tal forma que tengan la misma IP para que pueda existir una transmisión de datos correcta.

Desde el ordenador se puede tanto enviar datos a la máquina como recibirlos, de tal forma que para obtener los resultados finales se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Conectar tanto el banco de pruebas como el ordenador a la misma dirección IP.
2. Se introduce el usuario y contraseña para entrar al programa.
3. Desde el ordenador se crea un "mapa de baterías", el cual representa los diferentes puertos de conexión del banco de pruebas.
   Desde el mapa de baterías se puede tanto controlar como obtener los datos de las pruebas realizadas a las baterías en cada puerto de conexión.

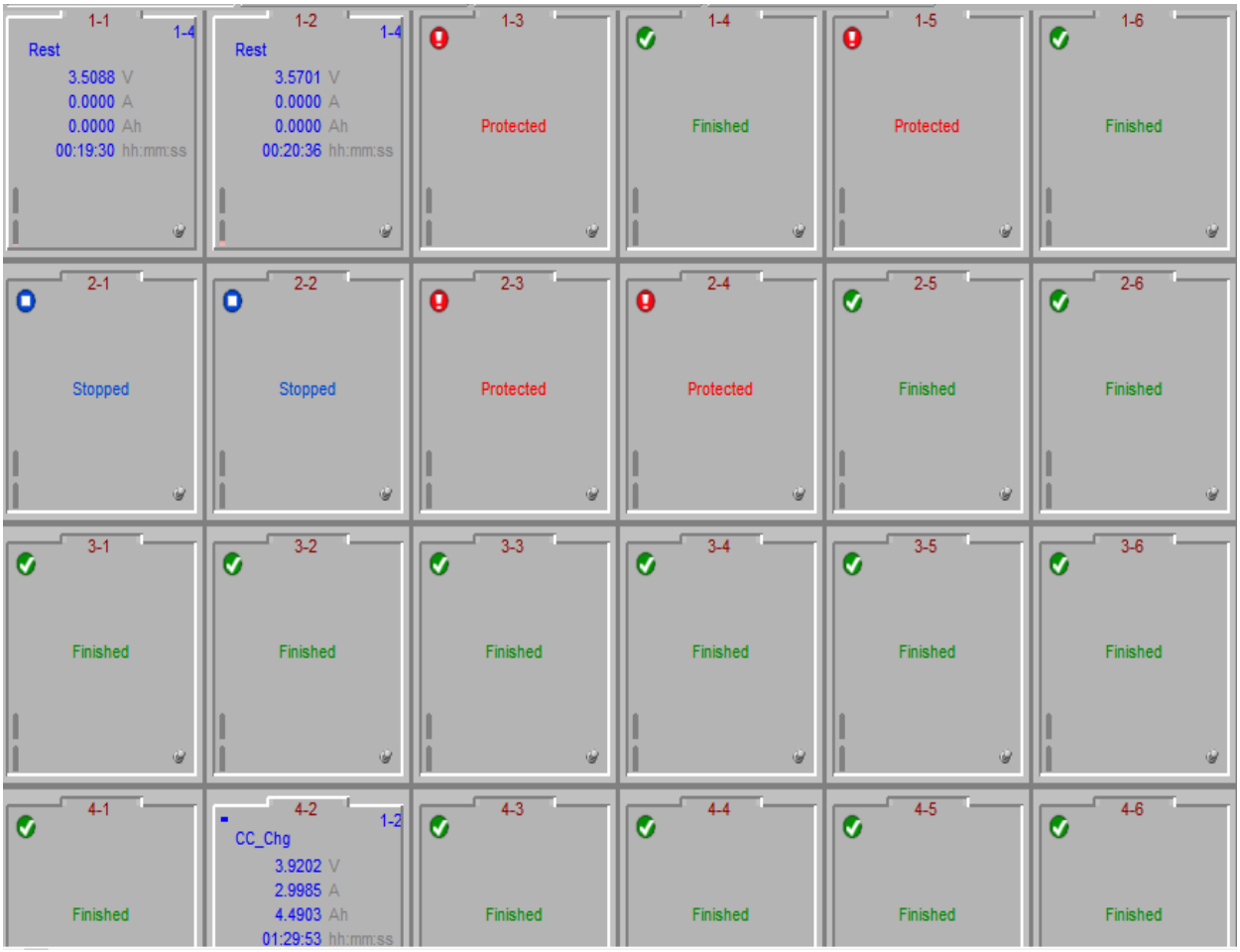

Fig. 12 Muestra de mapa de baterías en el ordenador

4. En el puerto donde se tiene conectada la batería a la que se desea realizar las pruebas, se accede a la opción "single start". Aparece una tabla para establecer el perfil o modelo de la prueba que se desea aplicar a la batería.

Desde esta ventana se puede diseñar los diferentes pasos que se van a realizar a la batería. Entre todos sus modos de operación, los más destacados son los de Carga en corriente constante, Carga a tensión constante y Descarga a intensidad constante.
En cada operación se deben establecer unas condiciones para que pasen al siguiente paso. Por ejemplo, establecer una capacidad cargada o descargada límite, una tensión límite o un valor de intensidad límite. De esta forma se controla que las baterías sean sometidas exactamente a los perfiles que se diseñan, ya que la máquina en cuanto detecta que se ha cumplido alguna de las condiciones impuestas, saltará al siguiente paso.

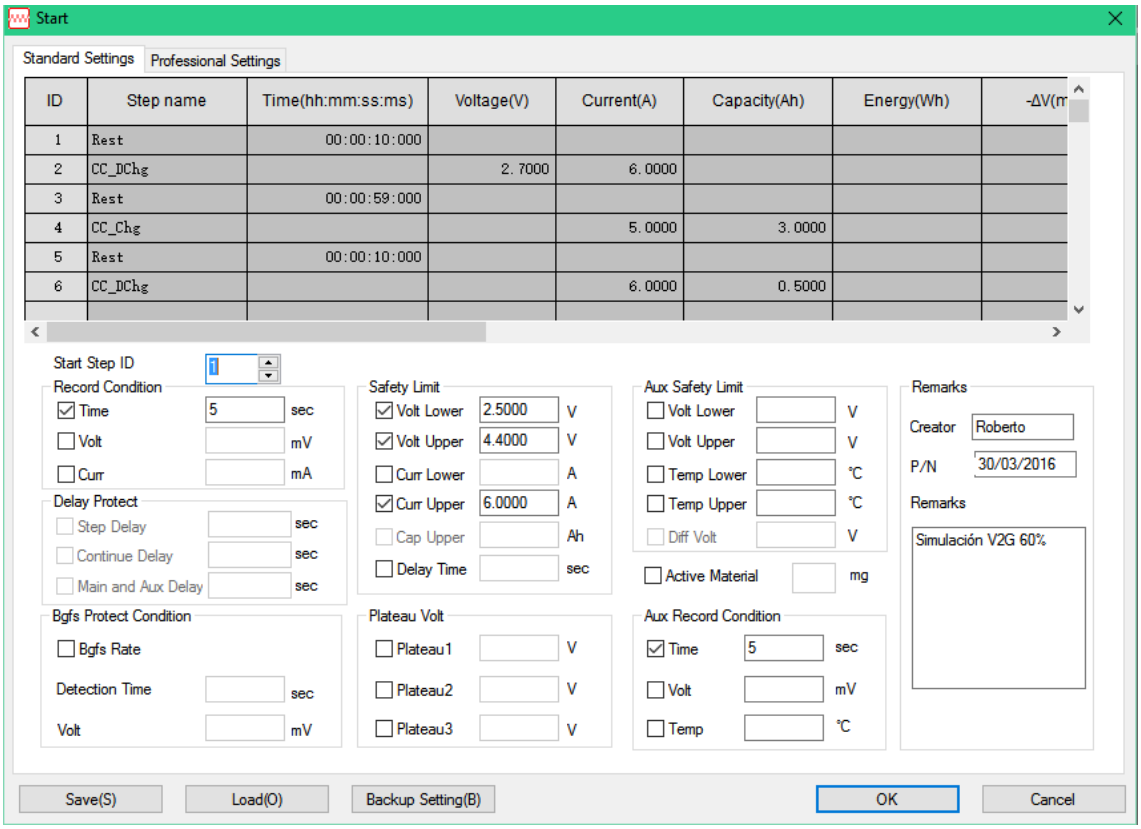

Fig. 13 Panel para introducir el perfil diseñado

5. Una vez establecidos los parámetros y el perfil que se desea, se debe establecer el tiempo de muestreo, es decir, la frecuencia con la que la máquina tomará medidas en las baterías. En nuestro caso el periodo con el que se toman los datos es cada 5 segundos.
6. También se deben establecer los límites de seguridad, que normalmente los proporciona el fabricante para que la batería no sufra daños irreversibles. Estos límites de seguridad son límites de tensión, intensidad y temperatura, de manera que si se supera alguno de esos límites se para automáticamente la prueba para evitar daños en las baterías.
7. Una vez se ha creado el perfil, se comienza la prueba y se deja funcionando hasta que termine.

8. Cuando el programa indica que la prueba ha finalizado, se procede a recoger los datos. En primer lugar se descargan en formato NdaData, que es el formato en el que lo lee el software de lectura que viene con la máquina "BTSDA". Con este software de lectura no lee todos los datos pero permite representar diferentes gráficas como la capacidad en valor absoluto o la tensión en bornes de la batería.

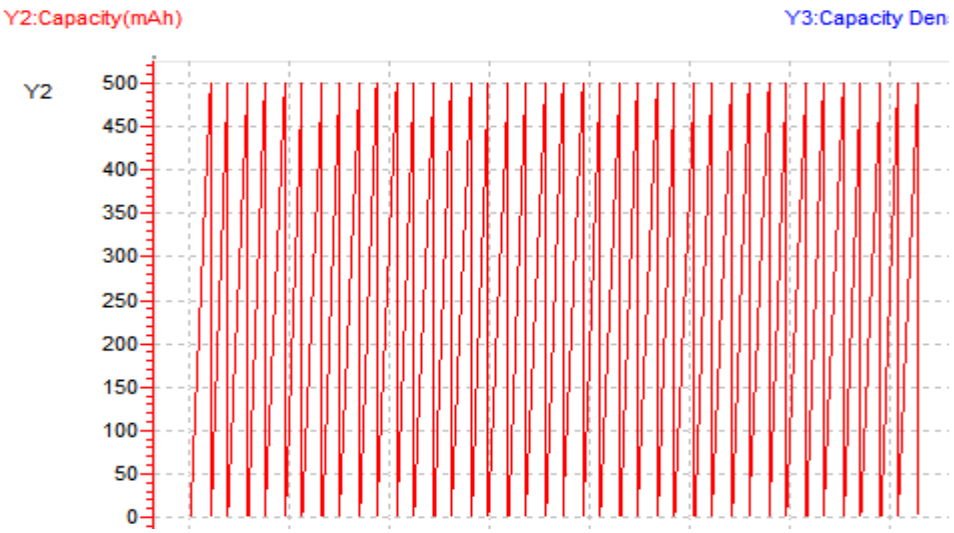

Fig. 14 Representación de la capacidad –tiempo en el perfil V2G

9. Finalmente para poder trabajar con los datos, se deben exportar a formato Excel.

Por el hecho de realizar tantas pruebas, se debe organizar muy bien las carpetas y saber qué se contiene en cada una de ellas para que luego el procesamiento de datos resulte más fácil.

3.1.3 Base de datos desarrollada

Con el objetivo de procesar los miles de datos que nos aporta cada una de las pruebas que se realizan a las baterías, se ha utilizado la herramienta Excel. Pero para trabajar con tantos datos y poder analizarlos, se deben procesar y organizar de manera que se obtengan los parámetros importantes, a partir de los datos recogidos por el banco de pruebas, como pueden ser la temperatura media, el SOC medio o la degradación por ciclo.

Por tanto el objetivo de utilizar esta herramienta es conseguir unos datos de cada prueba y cada batería comprensibles a simple vista para poder analizarlos y trabajar con ellos fácilmente.

Se puede observar un ejemplo de resultados finales en la siguiente tabla:

Battery Id	TotalCycles	TotalAhThrougl	TotalWhThroug	Num Cycles	T Media	T_Max	T_Min	T Mediana	T std. Dev	V Media
05	397	405639,6	1527616,4	189	55,31104533	56	54,5	55,4	0,35792541	3,69560799

V Max	V Min	V Median	V std. Dev	Ah_throughput C	Ah_Throuput Dc	Ah_ thoughp	Eff	Wh Chr	Wh DChg	Wh
3,9778	2,6984	3,8439	0,24953382	95321,6	93619,6	188941,2	99,129037	373509,4	320418	693927,4

media abs(I)	mediana abs(I)	max abs(I)	StdDev I	DoD	min abs(I)	Capacity [mAh	Capacity [mWh	CapacityIni[mAh	SOC_avg	SOCDev
5330,501107	5000,7	6000,7	942,179966	0,08289294	0	6000,5	20949152,6	6030	0,2606302	0,10592757

Degradation_Ini	Degradation_delta	epsilon	Ciclos_ Efect	Deg_x_cicl_eff	Deg_x_Wh	Deg_x_Ah	Deg_x_ciclo
-0,030701462	0,02446103	0,05516249	15,6667662	0,003520988	3,52501E-08	1,29464E-07	0,000129423

Tabla 4 Resultados después del procesamiento de datos.

Esta tabla representa el objetivo al que se pretende llegar con todos y cada una de las pruebas que se realizan en este estudio. Para ello se toman los miles de datos que se obtienen de la máquina de pruebas y mediante el uso de una macro, que se describe en el apartado 3.1.3.1, se consigue estos cálculos. Los cálculos más relevantes que se realizan son la temperatura media, el SOC medio y la degradación por ciclo, aunque se han tenido que obtener a partir de otros parámetros calculados.

Un ejemplo de datos en bruto se puede observar en la tabla 1 del anexo I. En ella podemos apreciar un recorte de los datos que se obtienen directamente de las pruebas. Cabe destacar que la cantidad de datos aproximada es de aproximadamente 5000 filas por 27 columnas, donde se representan todas las medidas que podemos obtener en cuanto a parámetros como tensión, intensidad etc.

Por otro lado en la tabla 2 del anexo I, se representan las temperaturas medidas en la batería en la prueba realizada. Cabe destacar que estas medidas son superiores a las establecidas en el horno, del ambiente o del congelador debido al propio calentamiento interno de la batería.

3.1.3.1 Algoritmo empleado

La Macro implementada y utilizada en el Visual Basic de Excel es diseñada con el objetivo de procesar los miles de datos que se obtienen al unir el primer test de capacidad estática, la prueba y el segundo test de capacidad estática. El algoritmo consigue reducir todos esos datos a una simple línea que representa los parámetros y valores más importantes a estudiar, como pueden ser el SOC medio, la temperatura media, la degradación o los Amperios hora que se han cargado y descargado.

El algoritmo representa los valores medios, máximos y mínimos de temperaturas, intensidades, tensión etc. La mayoría de los cálculos han sido implementados en las casillas del Excel con sus respectivas fórmulas.

Por tanto, parece adecuado describir las fórmulas con las que se han calculado los diferentes parámetros:

- Máximos, mínimos, medias, medianas, desviaciones estándar: Son calculadas mediante las funciones que incorpora el propio código de Visual Basic. Respectivamente: Max, Min, Average, Median y StDev.
- Ah_Cargados y Ah_Descargados: Es el sumatorio de todos los registros de energía cargada o energía descargada.
- Capacidad inicial y final: Son obtenidas de los dos test de capacidad estática. Es la capacidad total en Ah que se descarga en el último paso del proceso del test de capacidad estática.
- DoD (Profundidad de descarga): $DoD = \frac{Ah_{total}/(2 \cdot n^{\underline{o}}\ ciclos)}{Capacidad_{Inicial}}$ $(ec.\ 2)$

  Donde Ah_{total} representa la suma de la capacidad cargada más el valor absoluto de la descargada, y la Capacidad inicial representa el resultado del test de capacidad estática previo a la prueba.
- SoC (Estado de carga) : $SOC = \frac{CapCarga_{tot} - CapCarga_{ciclos}}{CapInicial}$ $(ec.\ 3)$

  Donde $CapCarga_{tot}$ es la capacidad total que ha experimentado la batería en procesos de carga en Ah, $CapCarga_{ciclos}$ es la capacidad que se ha cargado durante los ciclos en Ah y CapInicial es la capacidad resultado del test de capacidad estática previo a la prueba.
- Ciclos efectivos: $Cicl_{ef} = DoD \cdot n^{\underline{o}}\ ciclos$ $(ec.\ 4)$
- Degradación: $Deg = \frac{Cap_{ini} - Cap_{fin}}{0.2 \cdot Cap_{ini}}$ $(ec.\ 5)$

3.1.4 Modelo desarrollado de Matlab

La herramienta utilizada para representar visualmente los datos procesados y así poder analizar más fácilmente los factores de degradación de las baterías ha sido Matlab.

Nuestro modelo objetivo se trataba de un modelo lineal por tramos de la degradación por ciclo en función de la temperatura y el SOC. Para ello se debía conseguir una interpolación para crear una superficie en 3D de la degradación y a partir de ahí hallar el modelo linealizado, que más tarde sería procesado para que GAMS pudiera trabajar con él y optimizar el escenario que se propusiera.

Aunque menos importantes, también se han representado diferentes gráficas que permiten visualizar de una forma más intuitiva los datos obtenidos y poder obtener conclusiones del estudio.

3.1.4.1 Algoritmo de Matlab

Al haber realizado gráficas diversas, se han utilizado diferentes algoritmos, cuyas funciones son explicadas a continuación.

3.1.4.1.1 DataProcess

Recoge los datos procesados del documento Excel en el que se encuentran todos los datos procesados de todas las baterías y los guarda en formato .Dat para que Matlab pueda trabajar con estos números y que posteriormente los puedan utilizar otros scripts.

3.1.4.1.2 ViewData

Representa los puntos en una gráfica 3D. En los ejes horizontales se muestran la temperatura y el SOC, mientras que en el eje vertical se muestra la degradación por ciclo.

3.1.4.1.3 VisualizarDatos

Representa en 2D por un lado la degradación en función de la temperatura para los diferentes SOCs establecidos y determinados en el script. Por otro lado representa para las diferentes temperaturas determinadas la degradación en función del SOC. Y por último, representa la para diferentes intensidades establecidas, la degradación en función del SOC.

3.1.4.1.4 Surface

Representa una superficie interpolando entre los puntos que se podían observar en la gráfica que resulta de ViewData. Mediante una aproximación que realiza el script se puede intentar predecir cuál sería la degradación que se produciría a temperaturas y SOCs que se encuentren dentro del rango estudiado.

La gráfica que representa es la más visual y se puede decir que es la que mejor representa el objetivo al que se pretendía llegar.

3.1.4.1.5 myLines

Parte de los datos representados y aproximados del script Surface y dibuja líneas para representar la superficie de manera que se pueda aproximar y diseñar un modelo para después optimizarlo.

3.1.4.1.6 Histograma

Utiliza los datos estadísticos de un Excel que se realiza previamente a partir de los datos que se han obtenido. El objetivo de este código es el de representar de manera gráfica la cantidad de los datos de manera estadística para probar de alguna forma si el estudio realizado es fiable con la cantidad de pruebas que se han realizado de cada temperatura y SOC o en realidad no es un estudio representativo.

3.2 Modelo desarrollado para la optimización de la degradación

3.2.1 Modelo objetivo GAMS

Las posibles aplicaciones de este modelo son limitadas a la actuación en V2G. Esto se debe a que los ensayos realizados siguen un perfil únicamente de carga y descarga con una profundidad de descarga del 10%. Por tanto, la aplicación debe tener un perfil similar.

En el caso de este estudio, se han planteado el estudio de la degradación para diversos escenarios en los que se trabajaba con el perfil de los ensayos en diferentes condiciones de temperatura y diferentes parámetros que limitaban el SOC del vehículo.

3.2.1.1 Formulación matemática

3.2.1.1.1 Función objetivo

La función objetivo minimiza la degradación sufrida por la batería debida a los ciclos del 10 % de profundidad de descarga durante toda noche.

$$min \sum_{p} DegradaciónBateríaTotal(p)$$

Restricciones y condiciones

El modelo debe cumplir y satisfacer las siguientes condiciones y restricciones.

El SOC en el primer periodo deber ser igual al SOC inicial indicado, el SOC debe estar dentro de los límites para cualquier periodo p y el SOC en cualquier periodo es calculado como la suma del SOC del periodo anterior más la energía cargada menos la capacidad descargada más la demanda de la regulación.

$$SOC(0) = SOC_{ini} \ (ec.\,6)$$

$$SOC(\text{último periodo}) = SOC_{final} (ec.\,7)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(p) \leq CapacidadBatería_{max} (ec.\,8)$$

$$SOC(p) = SOC(p-1) - DescargaBatería(p) + CargaBatería(p) + DemandaRegulación(p) \ (ec.\,9)$$

Donde la descarga y carga en cada periodo se producen de la siguiente manera:

$$CargaBatería(p) = CapacidadBatería_{max} - SOC(p-1) (ec.\,10)$$

$$DescargaBatería(p) = SOC(p-1) (ec.\,11)$$

La demanda de la regulación se produce según el perfil indicado en la obtención de datos de la figura 19 en la sección 3.2.2.2.

3.2.1.1.2 Modelo de interpolación

Para modelar la degradación de la batería, primero es necesario conocer las variables en las que se basa nuestro estudio, es decir, el SOC y la temperatura. El problema que se presenta en este punto del código es la falta de datos en el modelo lineal por tramos que se ha obtenido a partir de Matlab. Por tanto se debe encontrar una manera de interpolar esa información para que el programa de optimización consiga encontrar los puntos precisos y óptimos.

A continuación se describe la manera en la que se obtienen los valores de la degradación interpolados por temperatura a partir del modelo lineal por tramos de la degradación.

Conociendo la temperatura del punto, es decir, la x', se pueden hallar los coeficientes que se han llamado lambda para estimar por ejemplo la degradación. La fórmula que lo muestra más intuitivamente se puede ver a continuación:

$$x' = \lambda_1 \cdot x_1 + \lambda_2 \cdot x_2 (ec.\,12)$$

Con la condición:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 (ec.\,13)$$

$$\lambda_1 \leq 1 (ec.\,14)$$

$$\lambda_2 \leq 1 (ec.\,15)$$

Donde x_1 y x_2 son las temperaturas de las líneas del modelo y x' es la temperatura real que se conoce.

De tal manera que si se quiere calcular la degradación en ese punto, se recurre a una fórmula similar, pero con los valores de la degradación por ciclo:

$$z' = \lambda_1 \cdot z_1 + \lambda_2 \cdot z_2 (ec.\,16)$$

El mismo procedimiento para hallar otras lambdas se debe realizar para interpolar los valores del SOC, es decir, conocidos dos valores del SOC se puede calcular la degradación de un punto intermedio.

Con esta combinación de lambdas se consigue un modelo en el que se estima la degradación de cualquier punto dentro de los rangos del estudio.

En el siguiente ejemplo se puede ver de una manera más intuitiva la obtención de las lambdas.

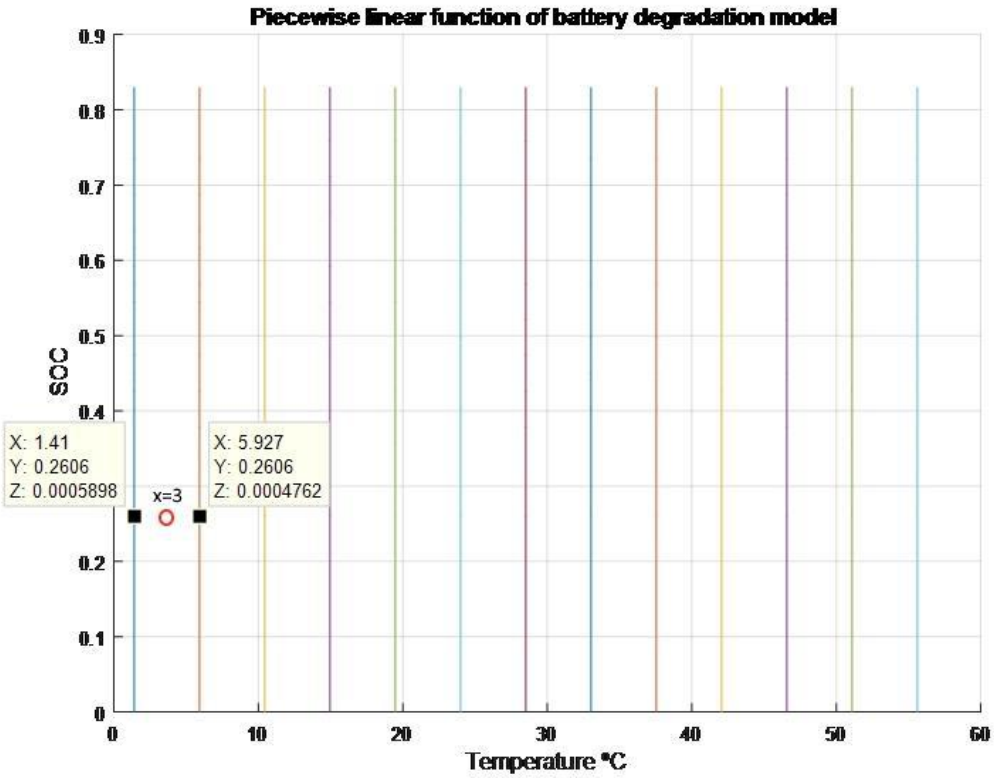

Fig. 15 Representación ejemplo modelo lineal de la degradación en función de la temperatura

Se quiere saber la degradación en el punto x=3, y = 0.2606, por tanto la ecuación utilizada quedaría de la siguiente forma:

$$3 = \lambda_1 \cdot 1.41 + \lambda_2 \cdot 5.927$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

De donde se obtiene que $\lambda_1 = 0.648$ y $\lambda_2 = 0.352$.

Por tanto si sustituimos para hallar la degradación, obtenemos:

$$z' = 0.648 \cdot 0.0005898 + 0.352 \cdot 0.0004762 = 0.0005498$$

La interpolación de la degradación para diferentes valores de SOC se realiza de manera similar pero tomando valores conocidos de una misma línea del modelo lineal por tramos. Tal y como se muestra en el siguiente ejemplo:

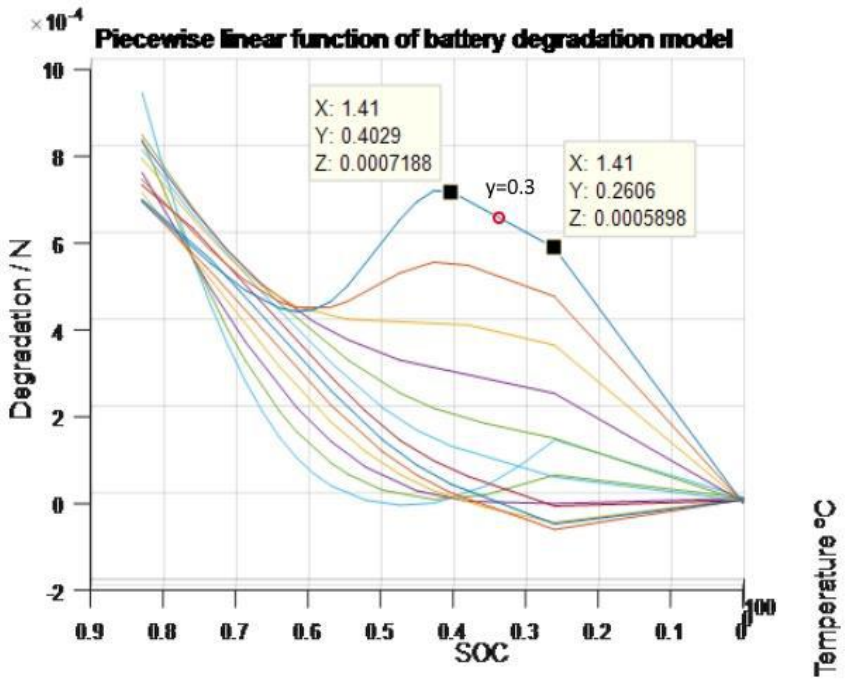

Fig. 16 Representación ejemplo modelo lineal de la degradación en función de la SOC

De forma que para estimar la degradación para x=1.41, y=0.3 la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$0.3 = \lambda_3 \cdot 0.4029 + \lambda_4 \cdot 0.2606$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1$$

De donde se obtiene que $\lambda_3 = 0.2768$ y $\lambda_4 = 0.7232$.

Por tanto si sustituimos para hallar la degradación, obtenemos:

$$z' = 0.2768 \cdot 0.0007188 + 0.7232 \cdot 0.0005898 = 0.0006255$$

Degradación de la batería

Para el cálculo de la degradación de la batería se crea un conjunto de lambdas para la temperatura mediante el procedimiento explicado anteriormente.

Por tanto, a partir del modelo lineal por tramos que obtenemos de Matlab, se procesan los datos de la degradación en las líneas y segmentos que tenemos, obtenemos las lambdas a partir de las temperaturas, las otras lambdas a partir del SOC y podemos procesar la información, para el periodo p, la línea de temperatura l y el segmento seg, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$vDegradación(l,h) = \sum_{seg} \lambda_{SOC}(seg,l,h) \cdot pDegradación(seg,l) \quad (ec.\ 17)$$

$$vDegradaciónTotal(p) = \sum_{l} vDegradación(l,h) \cdot \lambda_{Temp}(h,l) \quad (ec.\ 18)$$

3.2.2 Diseño escenarios a optimizar

3.2.2.1 Diseño perfiles temperaturas

Se estima que la conexión del vehículo a la red se producirá por la noche entre las 8pm y las 8am, las temperaturas se han diseñado de la siguiente forma:

- *8 pm – Puesta de Sol*: Temperatura media.
- *Puesta de Sol – 4 am*: se va reduciendo la temperatura según el gradiente de temperatura hasta llegar a la Temperatura mínima media.
- *4 am – Hora salida Sol*: Se mantiene constante hasta la hora de salida de sol, la cual se ha estimado basándose en la hora media de salida de sol del respectivo mes.
- *Hora salida del Sol – 8 am*: Coincidiendo con la media de las horas de salida del sol, comienza a aumentar la temperatura al mismo ritmo que se iba reduciendo anteriormente, es decir con el mismo gradiente de temperatura.

Lo primero que se debe de hacer es obtener los datos que se necesitan para realizar la estimación del modelo de temperaturas. Para ello se debe buscar en medios que proporcionen datos fiables de temperaturas como es Aemet (Agencia Estatal de meteorología del Gobierno de España).

A partir de ahí, se realiza en un Excel el modelo estimado según el proceso diseñado anteriormente.

Por ejemplo, para el mes de Julio en Madrid, los datos de temperatura [31] y los datos de salida y puesta de Sol [32] son los siguientes:

Tm	**19ºC**
T	25,6ºC
TM	32,1ºC
Hora puesta Sol	21:45
Hora salida Sol	7:00

Tabla 5 Ejemplo datos julio de datos obtenidos de las ref. 31 y 32

Donde Tm es la media de las temperaturas mínimas de los días de Julio, T es la temperatura media del mes y TM es la media de las temperaturas máximas del mes.

A continuación se representa la gráfica resultado del modelo de estimación para el mes de Julio durante las horas de noche en Madrid

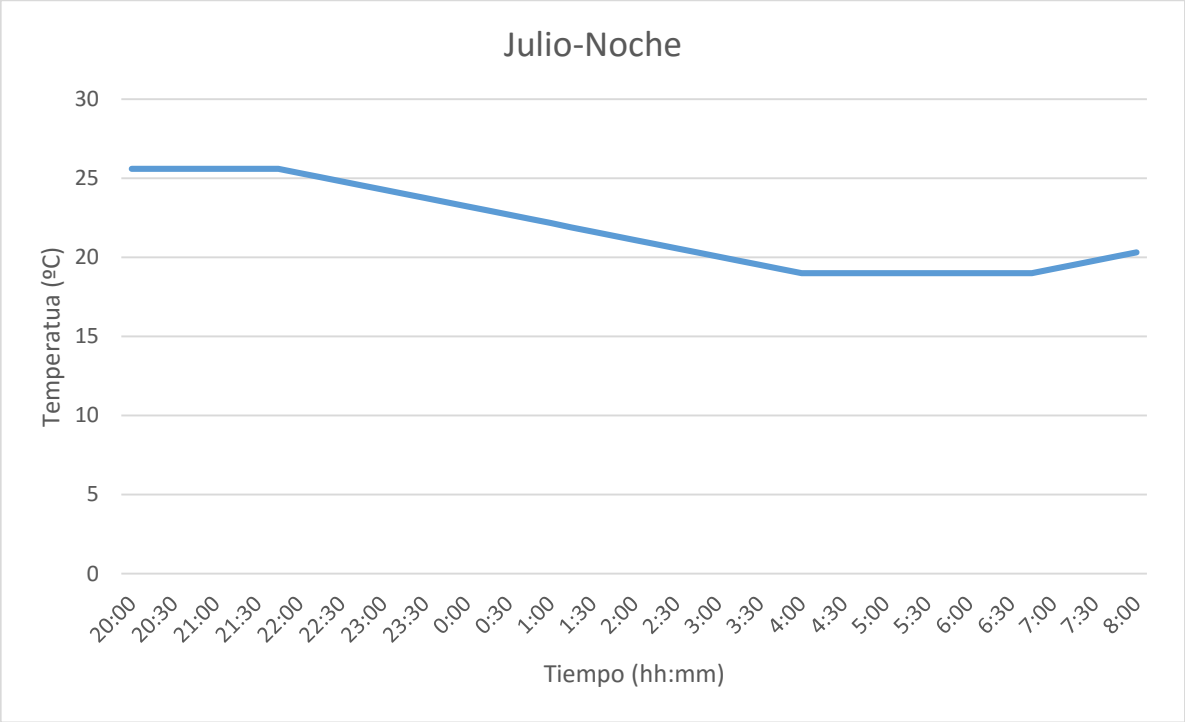

Fig. 17 Modelo de temperaturas de Julio estimado

Como se puede esperar, las temperaturas van descendiendo conforme va avanzando la noche hasta que vuelve a salir el Sol.

Por otro lado, se ha creado el perfil de las temperaturas de enero con la idea de someter al modelo de optimización a las condiciones más extremas del año, tanto por la parte del frío como de altas temperaturas.

Se ha seguido el mismo proceso para diseñar el perfil de temperaturas, pero en este caso, los datos de entrada son los siguientes:

Tm	2,7
T	6,3
TM	9,8
Hora puesta Sol	18:15
Hora salida Sol	8:35

Tabla 6 Ejemplo datos enero de datos obtenidos de las ref. 31 y 32

Como se puede comprobar, la hora de puesta de sol es de una hora y cuarenta y cinco minutos antes de las 20:00 que comienza el modelo, por tanto se ha decidido cambiar la temperatura máxima media por la temperatura media del mes de enero. También se ha estimado que la hora en la que se alcanza la temperatura mínima es la misma que en el mes de julio, es decir, a las 4:00am.

El resultado de esta estimación de las temperaturas durante una noche estándar de enero es el siguiente:

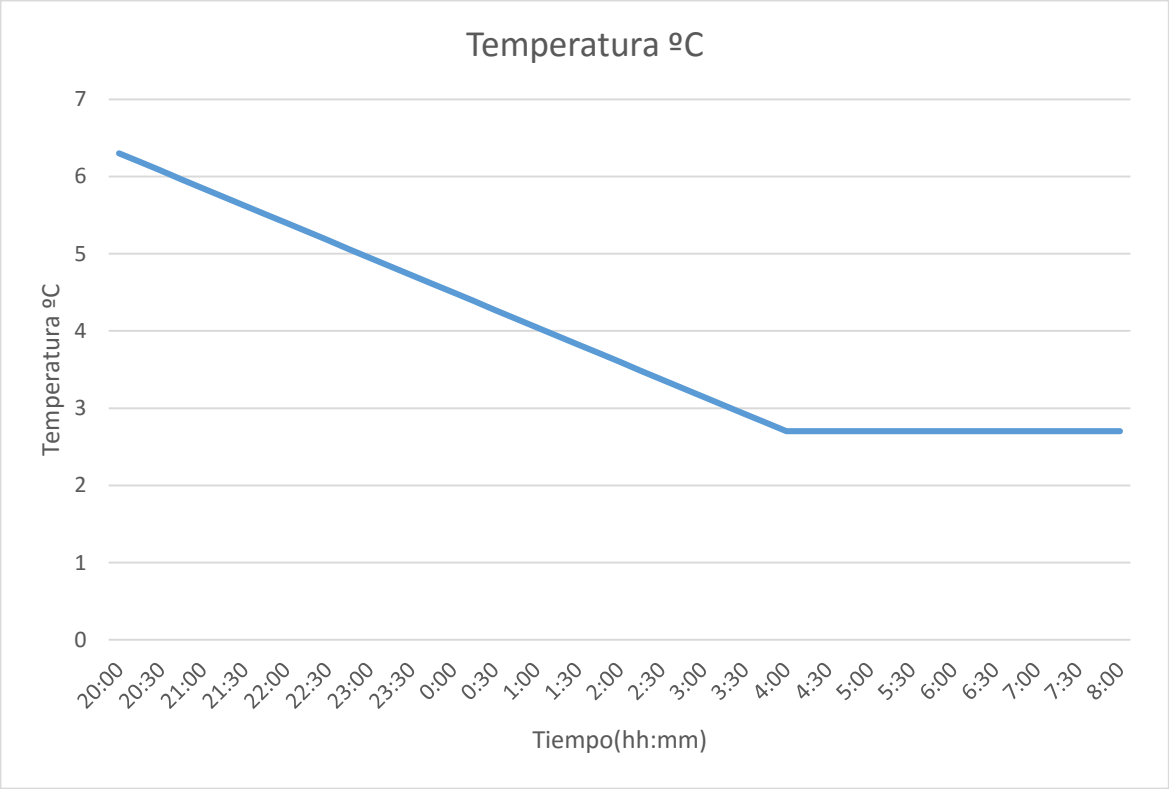

Fig. 18 Modelo de temperaturas de Enero estimado

Del mismo modo se han realizado los perfiles de temperaturas de Abril, Noviembre y un caso con temperaturas altas. A continuación se muestran sus perfiles:

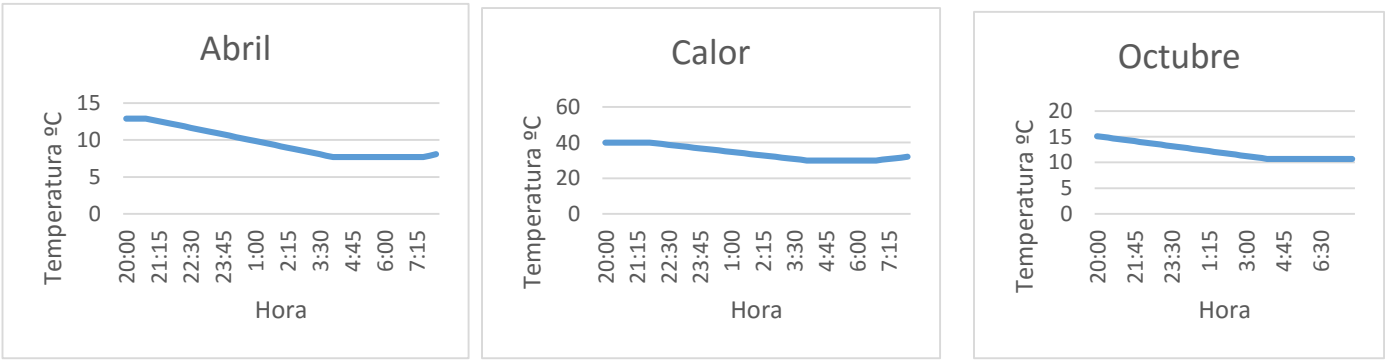

Fig. 19 Modelo de temperaturas de Abril, Octubre y a temperaturas altas

3.2.2.2 Obtención datos demanda regulación

Para la obtención de los datos introducidos con el objetivo de simular la demanda de regulación este estudio se ha basado en el perfil de pruebas realizadas. Tal perfil está basado en la variación del SOC de la batería del experimento llevado a cabo en la Ref. 7.

El algoritmo utilizado para la optimización en GAMS utiliza como parámetros de entrada el SOC inicial de la batería, el SOC final de la batería, la temperatura y la energía demandada por la red. Por tanto, como en las pruebas realizadas se realizaban ciclos cortos del 10% de profundidad de descarga, el perfil que se ha estimado de demanda de la red para cubrir la regulación de frecuencia es muy similar.

El proceso que se ha seguido para obtener los datos que se le introducen al programa de optimización de GAMS para la demanda de regulación de frecuencia es el siguiente:

1. Se busca un vehículo eléctrico estándar para basar la optimización en la capacidad de su batería. En el caso de este estudio, el vehículo escogido ha sido el Nissan Leaf, el cual utiliza una batería con una capacidad de 30 kWh [37] .
2. Se crea el perfil de demanda, en el cual, en caso de exigir energía de la batería, ya sea positiva o negativa, tiene el valor del 10 % de su capacidad total por periodo de tiempo, en nuestro caso resulta en 3 kWh cada 15 minutos.
3. Se crean diferentes escenarios para diferentes tipos de demanda para la regulación. En nuestro caso se crearon 4 escenarios posibles de demanda.

El escenario que se presenta plantea la situación de que la demanda de energía se realice durante toda la noche, variando entre 3 y -3 kWh representando un perfil como el siguiente:

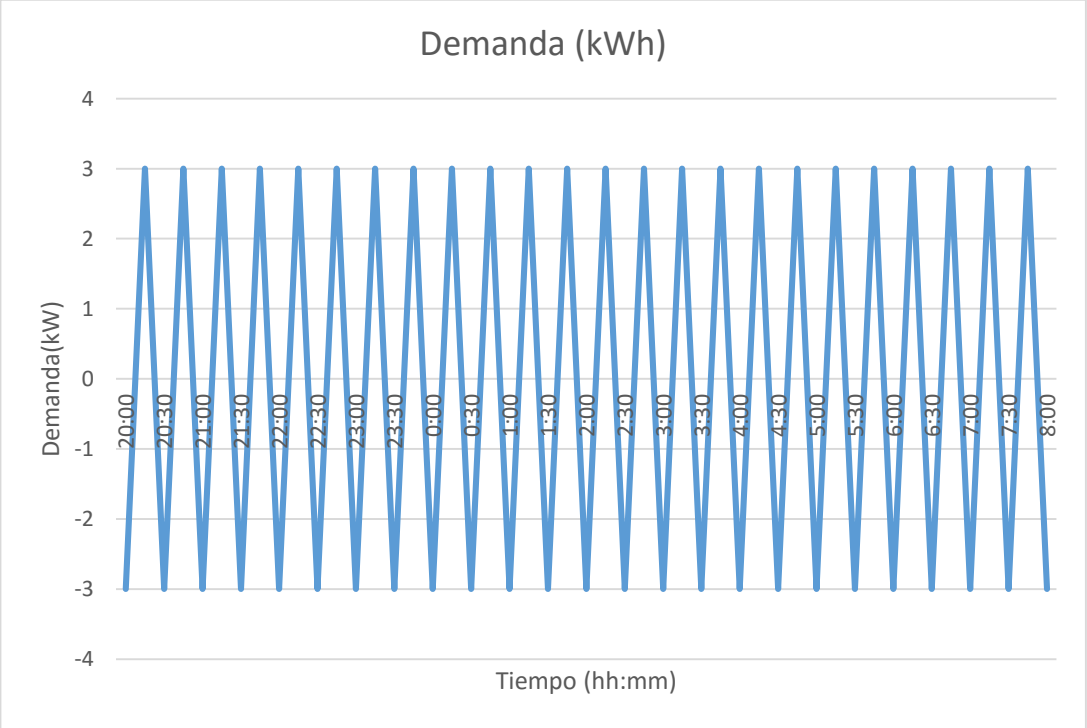

Fig. 20 Representación energía demandada por la red en los escenarios

Se puede observar que son ciclos que se mantienen constantes en el tiempo pero de muy escasa profundidad de descarga respecto de la capacidad total. Si se compara con el perfil diseñado con el que se han llevado a cabo los ensayos, podemos ver que es muy similar.

3.2.2.3 Obtención datos modelo lineal de optimización

Tal y como se ha podido ver en la sección 3.1.2, una de las gráficas que aportan los algoritmos de Matlab es la que representa la función lineal por tramos del modelo de degradación de la batería.

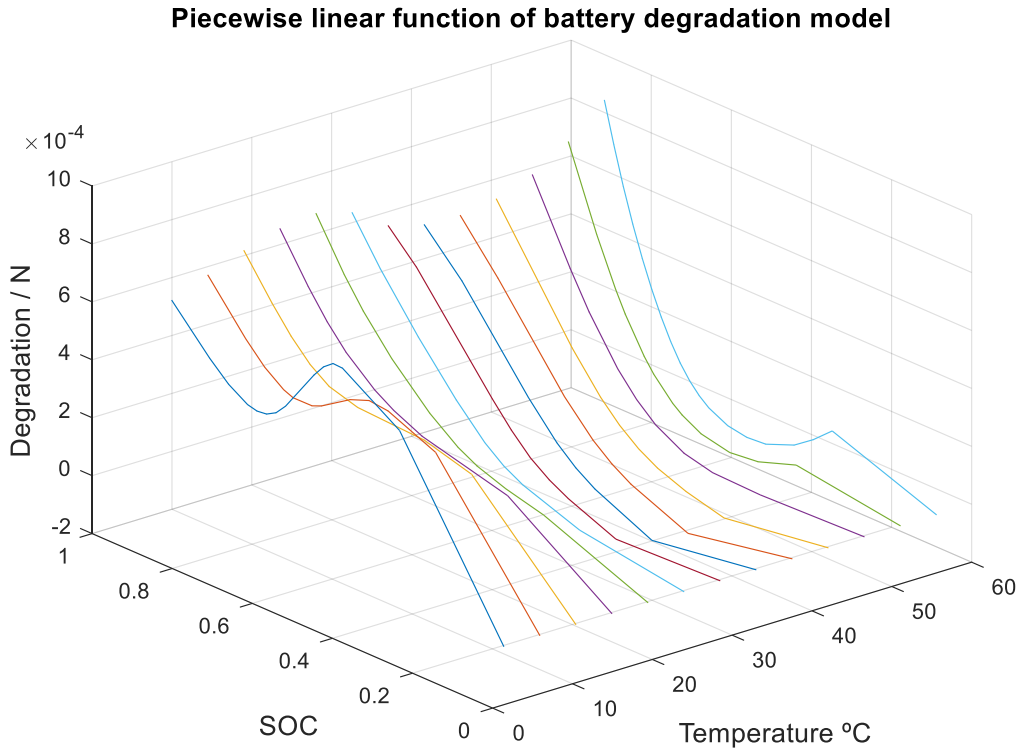

Fig. 21 Representación de la función lineal por tramos del modelo de degradación de la batería

Para que el código de GAMS siga un modelo basado en los datos obtenidos, se debe procesar esa función lineal. Para ello, se eligen una cantidad de rectas representativas, se procura tomar como mínimo las rectas que se encuentran próximas a las temperaturas a las que se han realizado los ensayos para tener mayor precisión.

El método de procesamiento de esta gráfica a datos para GAMS se realiza de la siguiente manera:

- Se eligen 5 líneas de las que se presentan en el gráfico de la función linear por tramos de la degradación. Cada línea representa una temperatura, por tanto deberían cubrir un amplio rango entre los 0 a 60 º C.

Temperaturas ºC					
	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
seg-1	55,61	37,54	23,99	14,96	1,41
seg-2	55,61	37,54	23,99	14,96	1,41
seg-3	55,61	37,54	23,99	14,96	1,41
seg-4	55,61	37,54	23,99	14,96	1,41
seg-5	55,61	37,54	23,99	14,96	1,41

Tabla 7 Temperaturas del modelo estimado de líneas. Coordenada X

- Cada línea se divide en segmentos aproximadamente rectos que se diferencian claramente. En el caso de este estudio, se ha dividido cada línea en 5 segmentos.
- Estos segmentos se van a diferenciar entre ellos según el SOC y la degradación de sus puntos. Por tanto, en la tabla, para cada segmento se escribe el punto de comienzo del tramo, siendo el punto del primer segmento el de mayor SOC de la línea.
- Se debe realizar una tabla para cada coordenada, es decir, una tabla para la degradación y otra tabla para el SOC

SOC					
	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
seg-1	0,8296	0,8296	0,8296	0,8296	0,8296
seg-2	0,6162	0,4977	0,4977	0,6636	0,6162
seg-3	0,3555	0,4029	0,4029	0,474	0,4029
seg-4	0,2606	0,2606	0,2606	0,2606	0,2606
seg-5	0	0	0	0	0

Tabla 8 SOC del modelo estimado de líneas. Coordenada Y

Degradación					
	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
seg-1	0,0009331	0,0006869	0,0008106	0,0008309	0,0006969
seg-2	0,00009094	0,00011	0,000215	0,0005019	0,0004422
seg-3	0,00002699	0,00001486	0,0001264	0,0003271	0,0007188
seg-4	0,0001329	0	0,00005554	0,0002505	0,0005898
seg-5	0	0	0	0	0

Tabla 9 Degradación por ciclo del modelo estimado de líneas. Coordenada Z

Todos estos puntos y coordenadas no tendrían sentido sin que GAMS los pudiera interpretar de nuevo como rectas. Por tanto, a continuación se explica la teoría de cómo a partir de unas coordenadas o puntos se pueden obtener las líneas que el algoritmo utiliza como modelo de degradación.

3.2.2.3.1 Formación de rectas a partir de puntos [38].

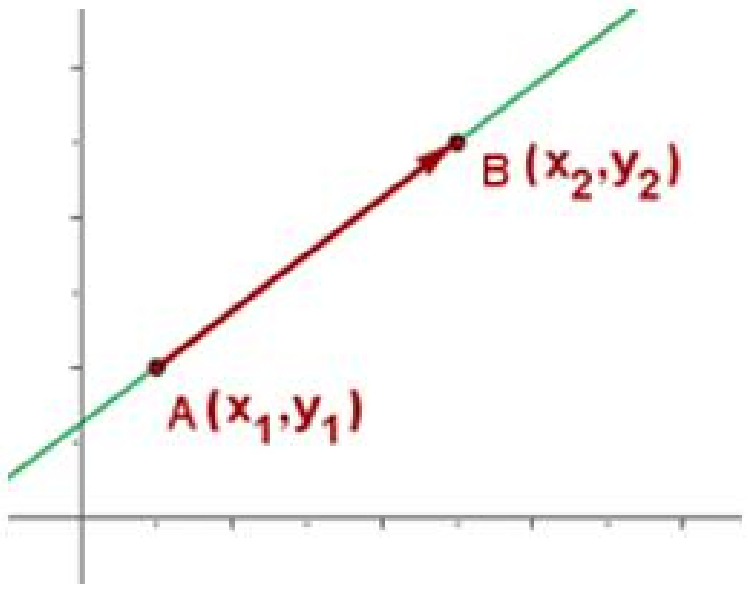

Fig. 22 Representación formación recta con dos puntos dados. [38]

Sean los puntos A (x1, y 1) y B (x2, y 2) que determina una recta r. Un vector director de la recta es:

$$\vec{V} = \overrightarrow{AB} (ec.\ 19)$$

Cuyas componentes son:

$$v_1 = x_2 - x_1 (ec.\ 20)$$

$$v_2 = y_2 - y_1 (ec.\ 21)$$

Sustituyendo estos valores en la forma continua:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} (ec.\ 22)$$

Si queremos escribir la recta de la siguiente manera:

$$y = b \cdot x + c (ec.\ 23)$$

Combinando las ecuaciones anteriores llegamos a las siguientes igualdades:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) + y_1 (ec.\,24)$$

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (ec.\,25)$$

$$c = \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1} \cdot x_1 + y_1 (ec.\,26)$$

4. Análisis de los resultados obtenidos

4.1 Resultados representación modelo degradación

Con el objetivo de mostrar los resultados de manera intuitiva, se han procesado los datos para poder representar diferentes gráficas donde se puedan apreciar los resultados más relevantes.

Debido a que algunas de las figuras están representadas en 3D, se ha decidido representar en este documento para ayudar a la visualización, se han representado tanto la figura en 3D como gráficos en 2D.

4.1.1 Representación 3D puntos.

En las siguientes gráficas se representan la figura en 3D que simboliza y permite tener una idea de los resultados reales que se han medido en el laboratorio.

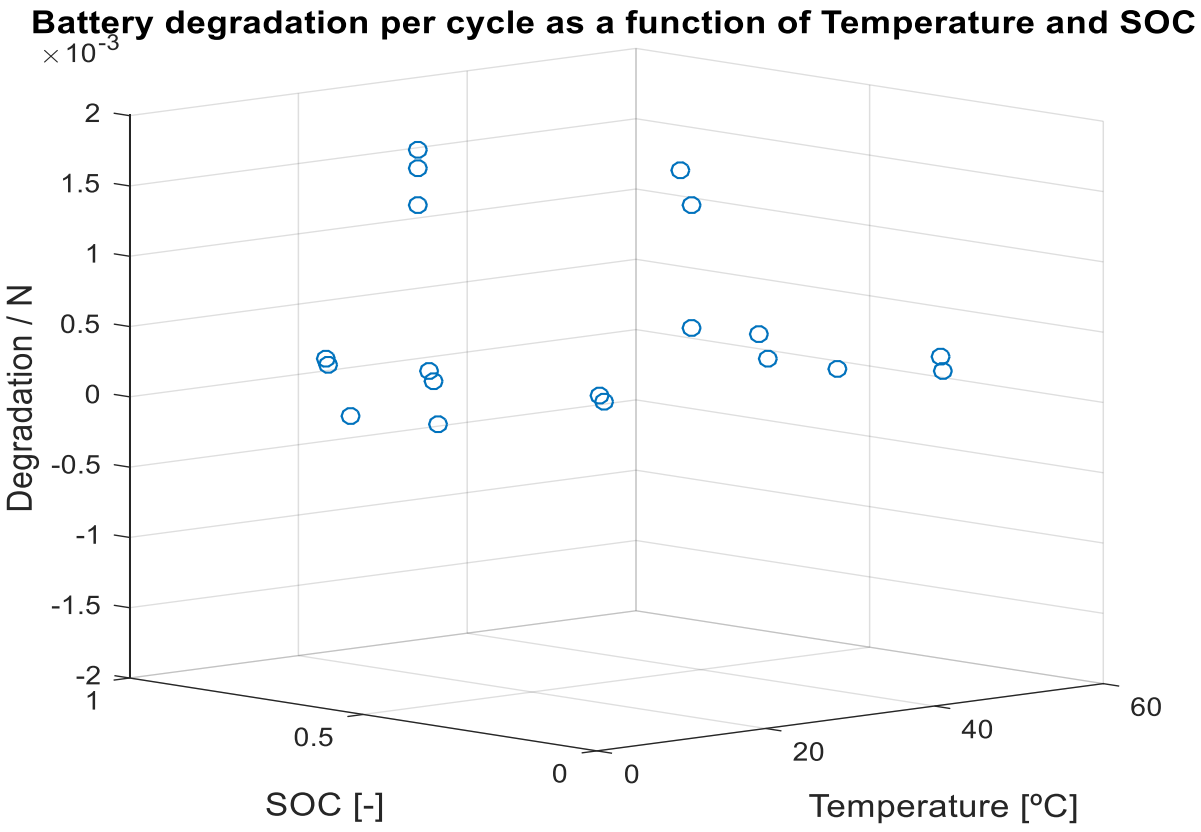

Fig. 23 Representación en 3D de la degradación de la batería por ciclo en función del SOC y la temperatura

Se puede apreciar que los puntos se encuentran lo suficientemente distribuidos para poder realizar una aproximación e interpolación de un modelo de degradación para diferentes temperaturas y diferentes porcentajes de SOC.

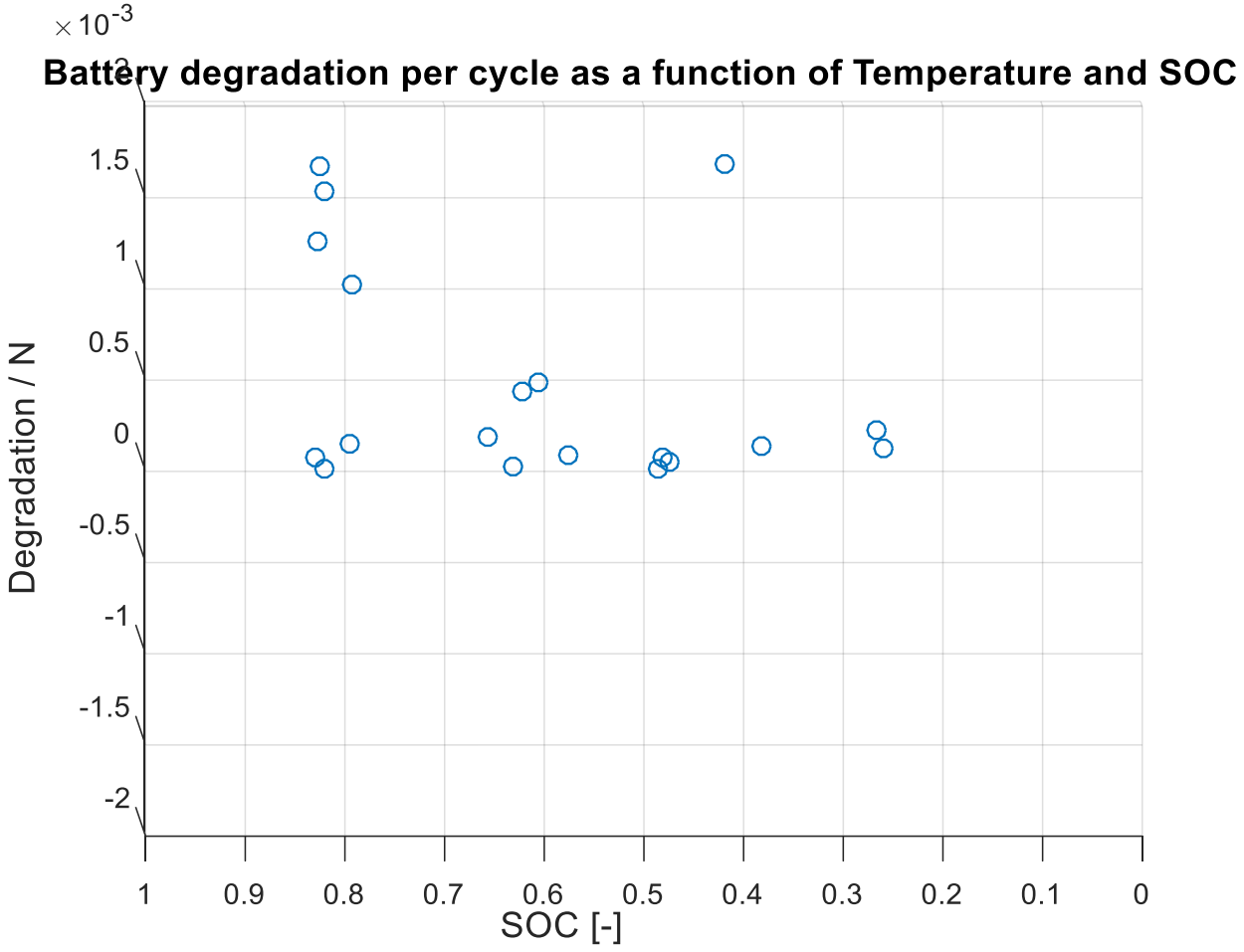

Fig. 24 Representación en 2D de la degradación de la batería por ciclo en función del SOC

En esta imagen se representa la degradación sufrida en los ensayos por la batería en función del SOC al que se han realizado los ciclos. Como observación, destaca que cuanto mayor es el SOC parece que se produce una degradación mayor.

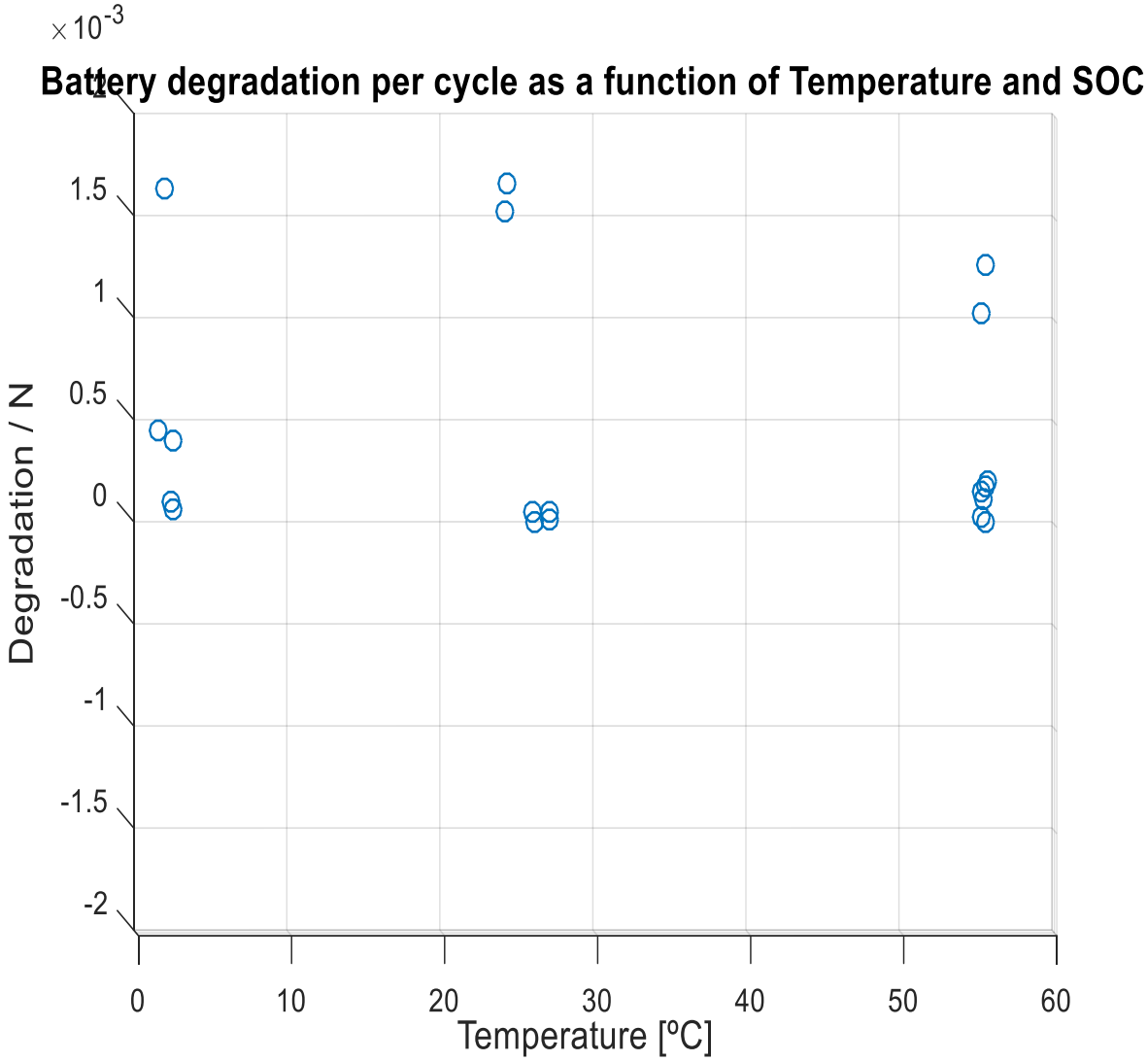

Fig. 25 Representación en 2D de la degradación de la batería por ciclo en función de temperatura

Por otro lado, en esta figura queda representada la visualización de los puntos que marcan la degradación producida por ciclos en función de la temperatura. En este caso, se puede apreciar el hecho de que se han tomado medidas en tres temperaturas, lo cual podría significar que son insuficientes, pero se han tomado a temperaturas extremas de la batería y nos da una visión de cómo se comportaría en esas condiciones, que en realidad serían las que habría que estimar.

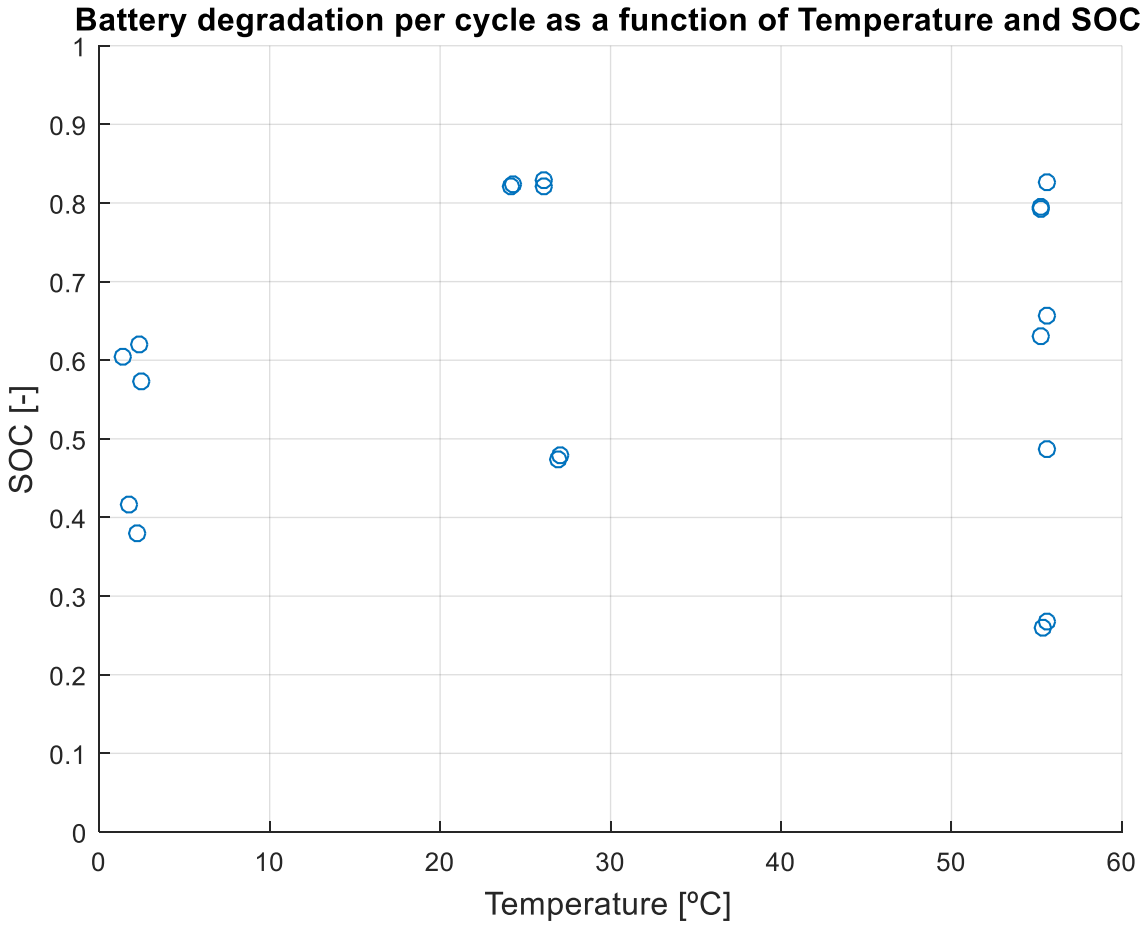

Fig. 26 Representación en 2D del SOC de la batería y la temperatura a la que se han realizado los ensayos

Esta imagen lo único que representa son la temperatura y SOC a los que se han realizado los diferentes ensayos o pruebas a las baterías. Sólo nos aporta la información de las pruebas que han tenido una degradación positiva.

4.1.2 Representación superficie aproximada del modelo

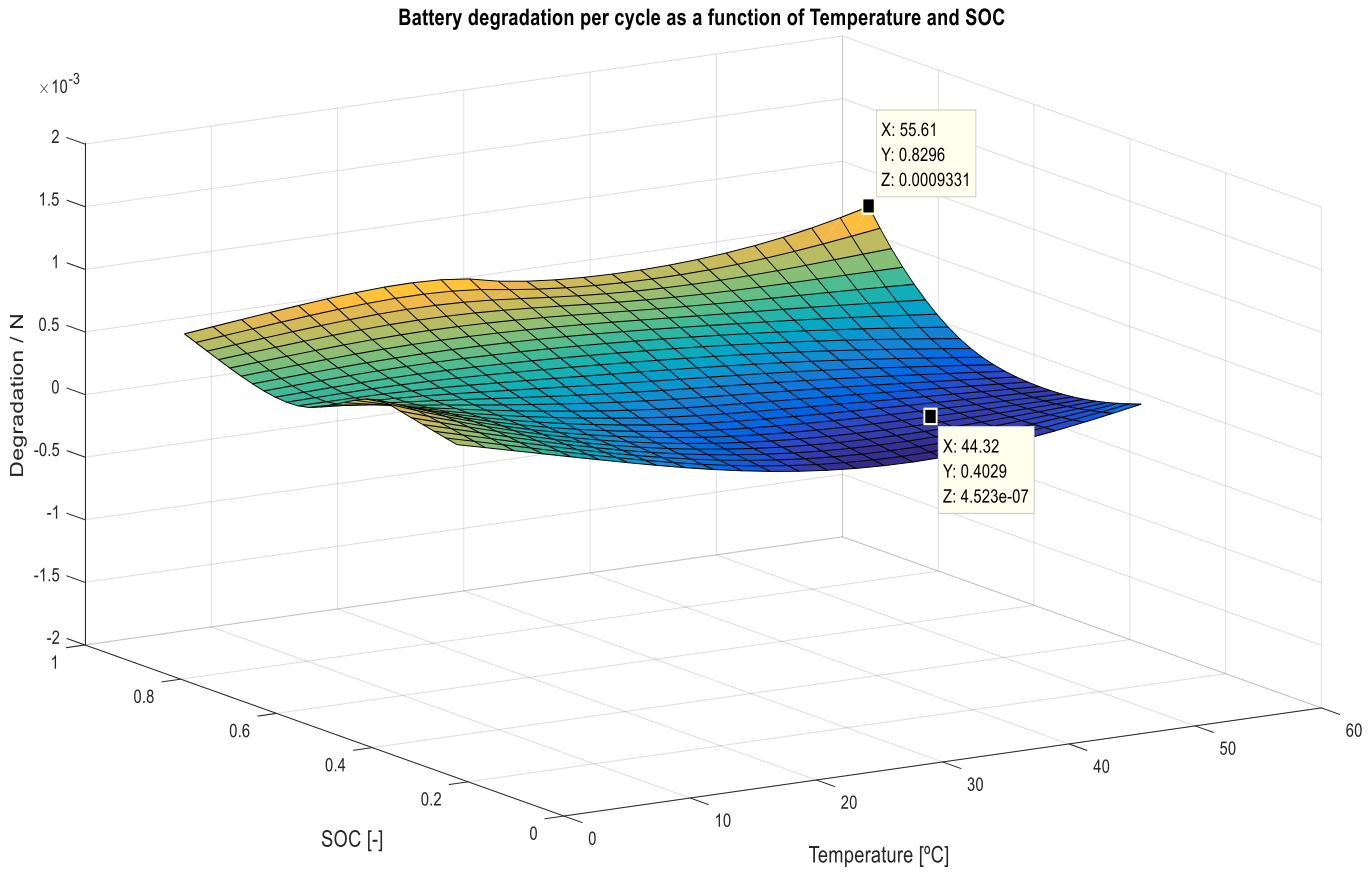

Fig. 27 Representación de la superficie interpolada para realizar el modelo a optimizar

En esta representación en 3D de la superficie podemos observar la distribución de la degradación en función del SOC y la temperatura. Esta superficie ha sido interpolada a partir de los diferentes puntos de los datos que se habían obtenido con anterioridad.

Se puede observar que el color varía en función del valor de la degradación, cuanto mayor es la degradación por ciclo, más cálido es el color.

Como se puede apreciar, se encuentra marcado el punto en que se produce la máxima degradación. El punto indicado como mínimo, en realidad no es el mínimo absoluto de la superficie, ya que al ser un modelo de estimación algunos puntos han resultado negativos, pero muy aproximados a 0, por tanto el punto marcado es válido como representación del mínimo.

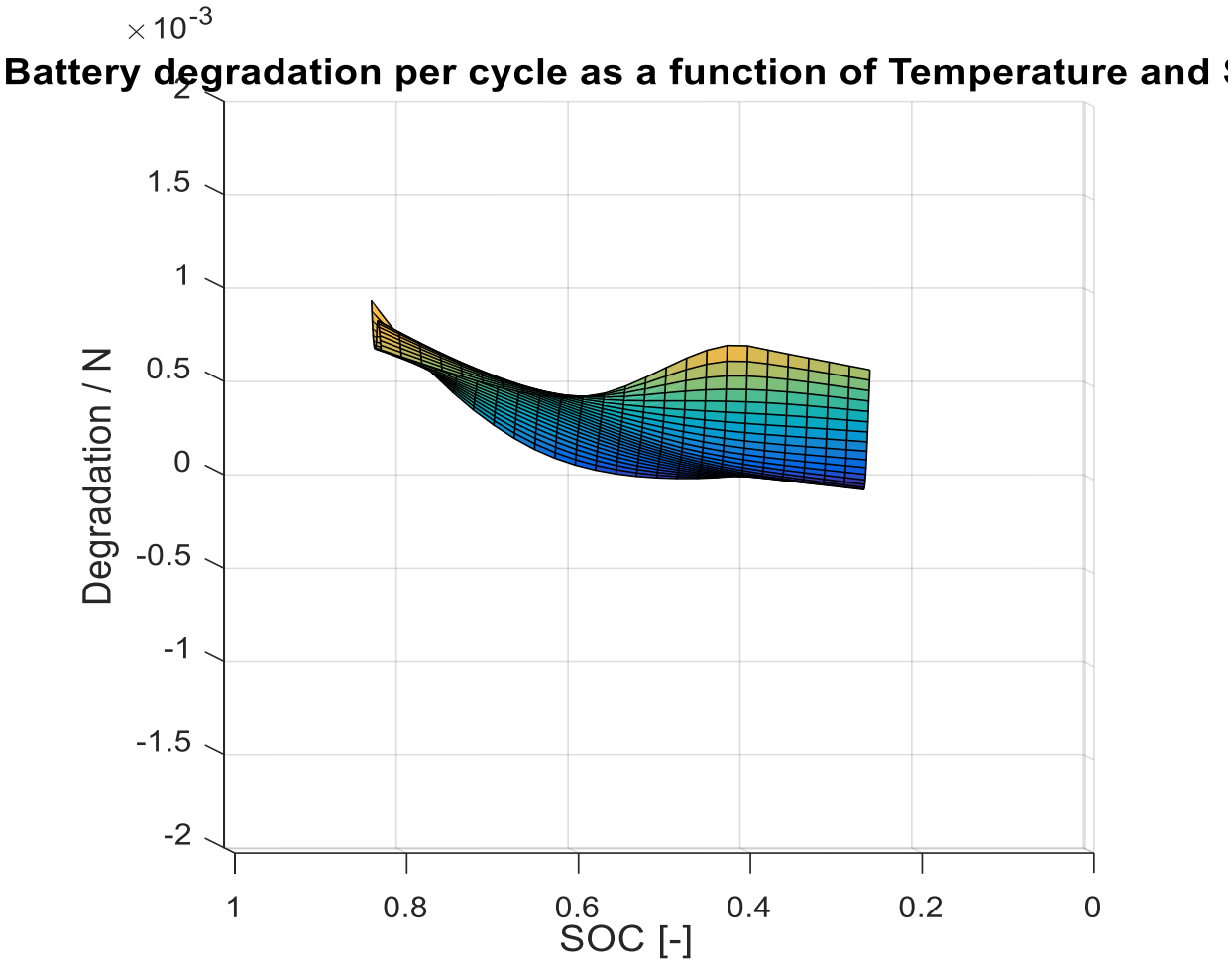

Fig. 28 Representación de la superficie interpolada de la degradación en función del SOC

En esta gráfica podemos observar la superficie desde el plano que representa la degradación por ciclos respecto al SOC de la batería.

Podemos apreciar que conforme aumenta el SOC del ciclo al que se somete la batería parece que aumenta la degradación mientras que sobre el 60% de SOC parece que esta degradación se reduce.

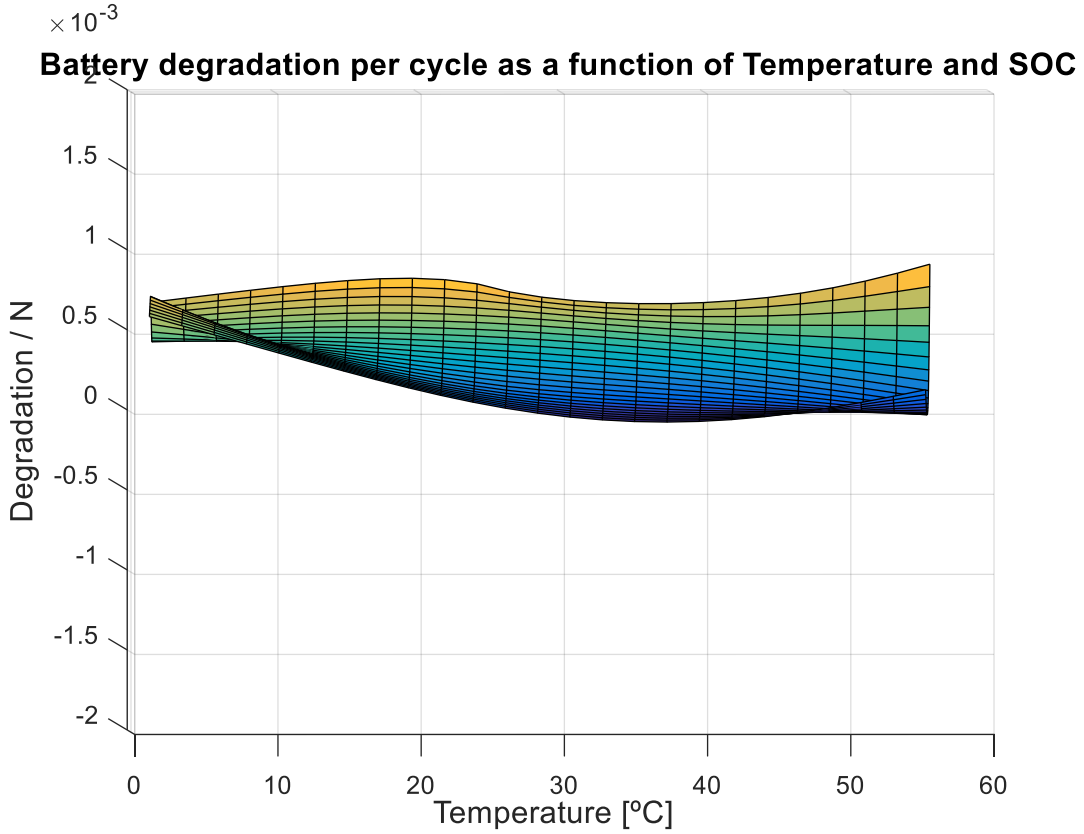

Fig. 29 Representación de la superficie interpolada de la degradación en función de la temperatura

Por otro lado, se representa la degradación sufrida por ciclo en función de la temperatura. En esta figura es más difícil diferenciar los puntos de degradación más destacados ya que para cada temperatura vemos que hay un rango muy amplio de degradaciones. Pero si nos basamos en las máximas, se puede apreciar que en las temperaturas de 30-40º C la degradación por ciclo es más baja, mientras que la más alta nos la podemos encontrar en la temperatura de 55 º C con un valor de 0.09331" respecto el fin de vida de la celda.

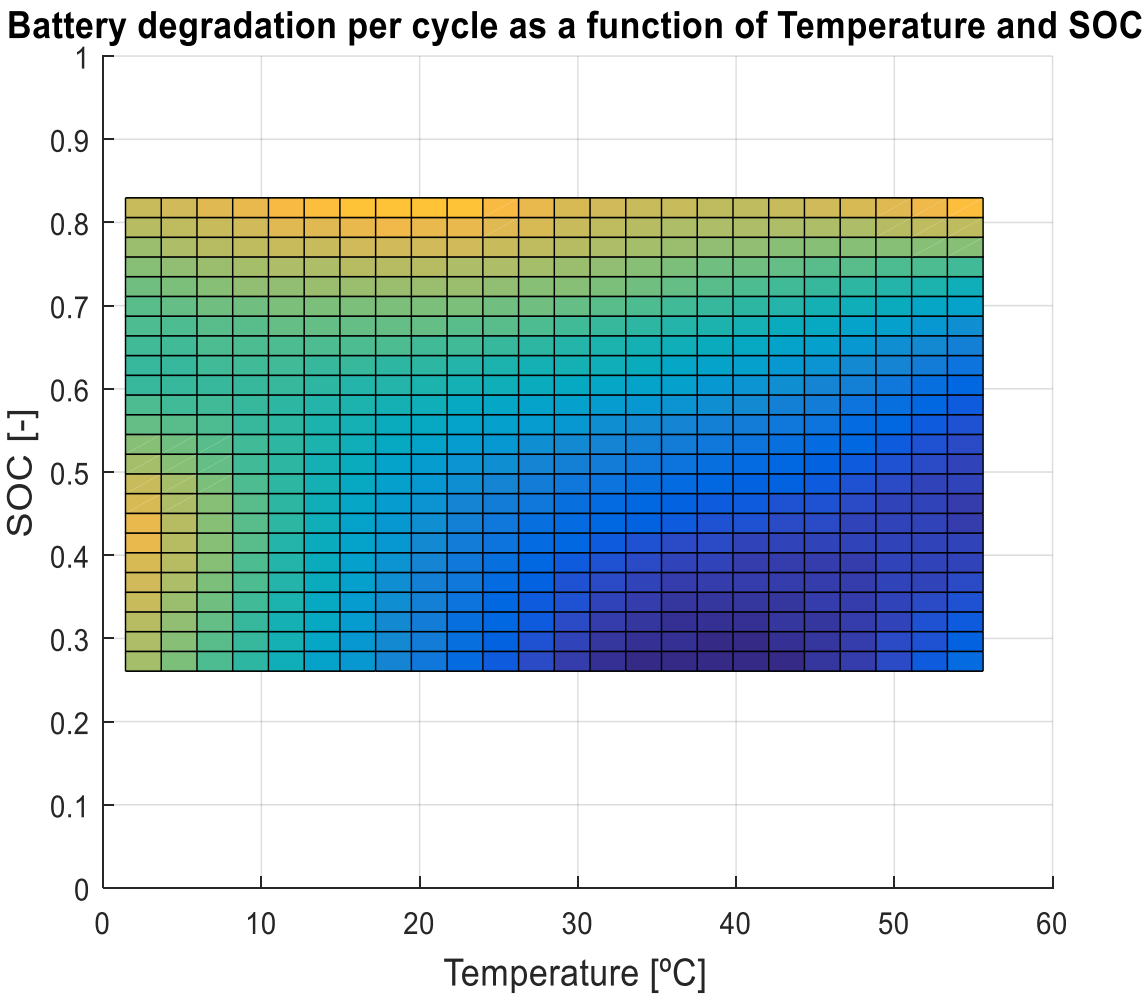

Fig. 30 Representación de la superficie interpolada del SOC en función de la temperatura

Esta gráfica nos aporta una visualización de la degradación según los colores. Podemos apreciar como al aumentar el valor del SOC los colores son más cálidos, aunque según los resultados, cuando la temperatura es muy baja, la degradación con un SOC del 30-40% también aumenta.

4.1.3 Modelo lineal por tramos de la degradación de la batería.

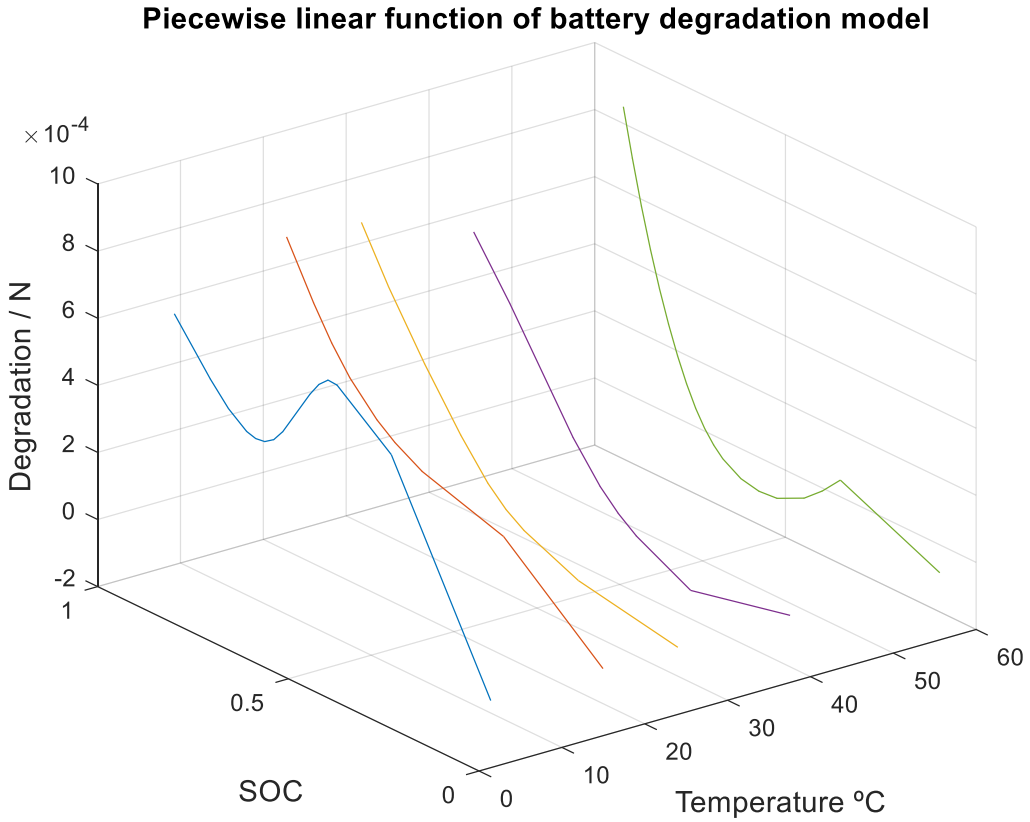

Fig. 31 Representación de la función lineal por tramos del modelo de degradación de la batería

Esta representación gráfica nos permite poder estimar un modelo con el que pueda trabajar el programa de optimización GAMS.

Se puede apreciar un valle entre las temperaturas de 30-40º C, mientras que aparece un pico en las temperaturas más bajas.

Cabe recordar que esta representación es una estimación de una modelo en el que basarse cuando se quiera optimizar la degradación en un determinado escenario. Por tanto, no todos los puntos son reales, sino aproximados.

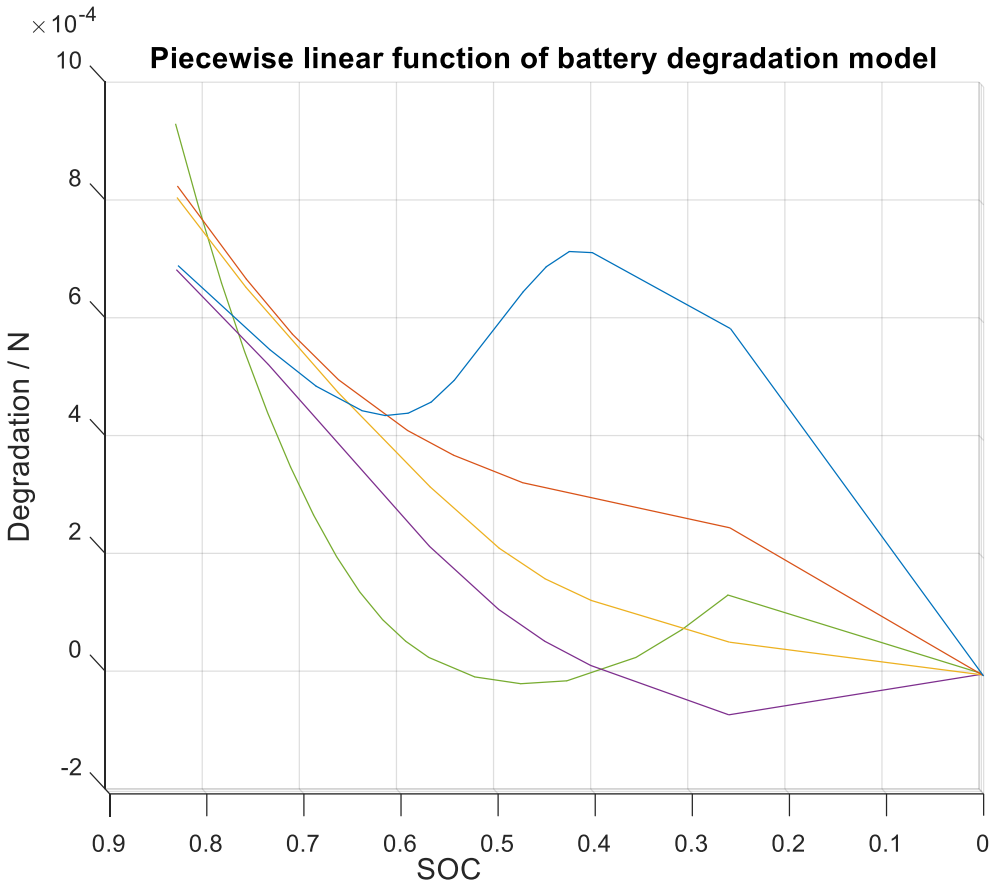

Fig. 33 Representación de la función lineal por tramos del modelo de degradación de la batería en función del SOC

Se puede apreciar una gran diferencia entre los puntos más bajos, que incluso descienden ínfimamente del 0, y los puntos más altos en los cuales se observa que mayormente se encuentran con valores de SOC más elevados.

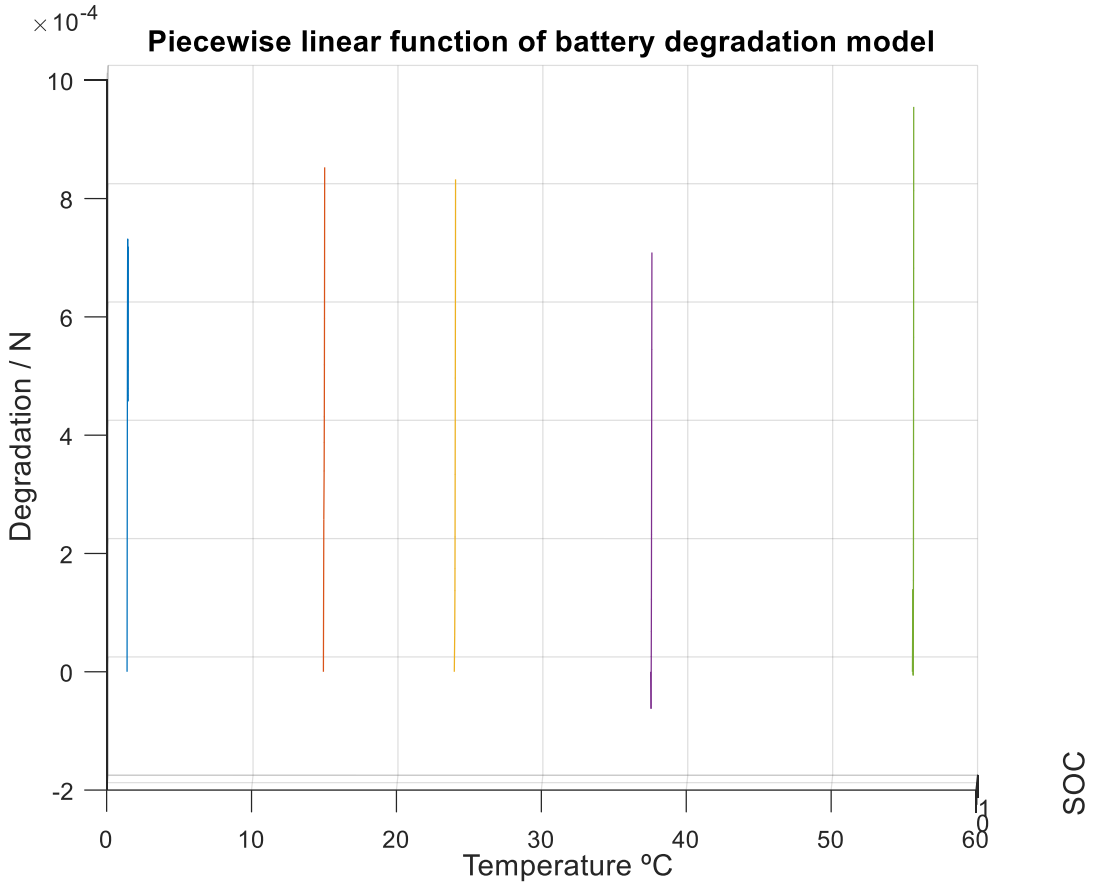

Fig. 33 Representación de la función lineal por tramos del modelo de degradación de la batería en función de la temperatura

La única aportación de esta gráfica es que se puede apreciar el valor de las temperaturas de las que se han realizado las líneas estimadas.

4.2 Resultados optimización de los escenarios planteados.

Para analizar los resultados de este estudio se han creado diferentes escenarios descritos a continuación, en los cuales varían las condiciones de temperatura y se cambia el límite de SOC mínimo que puede alcanzar la batería.

Se simula la actuación óptima que debería realizar la batería para cada escenario. Variando el SOC de la batería para que la degradación sea la mínima al final de la noche.

La degradación es medida de la forma en que se describe en la terminología del Anexo II. Es decir, como una fracción de la capacidad que ha perdido la celda respecto a la capacidad de final de vida o EOL. Esto significa que los resultados del porcentaje de degradación serán mayores de los que a primera impresión se podría esperar ya que el concepto cotidiano de la degradación es la pérdida de capacidad respecto a la capacidad nominal de la batería. Mientras que el concepto de degradación en este estudio es el mismo que tiene la Ref. 8, es decir, la pérdida de capacidad respecto al 20% de la capacidad inicial, por tanto los valores serán más elevados de lo que se pudiera pensar en primera instancia.

Escenario 1

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	3
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Enero
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total final = 2,1802 % respecto al fin de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}021802 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,8691 kWh y por tanto se han perdido 0.13081kWh. Lo cual resulta una pérdida normal de capacidad, pero que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

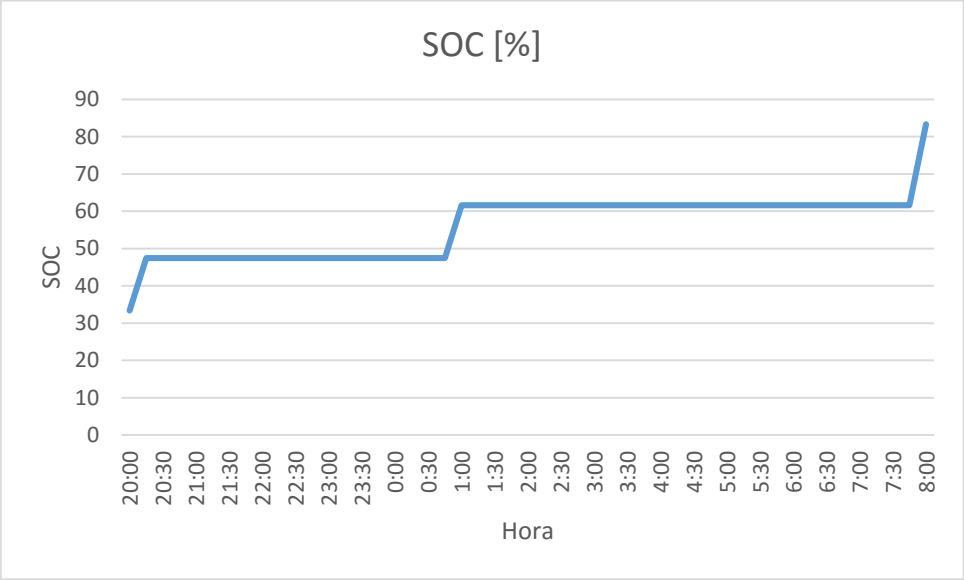

Fig. 34 SOC óptimo para las condiciones del escenario 1

Esta gráfica representa el SOC óptimo que va teniendo la batería durante la noche para minimizar la degradación que sufre con la demanda de energía de la red de la que se ha descrito el perfil anteriormente.

Se puede decir que el control trataría subir escalonadamente desde el SOC inicial de la batería hasta que al final de la noche se llegue hasta el porcentaje del SOC deseado. En el caso de este estudio, el SOC comienza en el 30%, es decir con 9 kWh; sube hasta el valor del 47,4 %, que se mantiene hasta la 1:00; sube hasta el valor de 61,62%, hasta que finalmente en el último periodo de 15 minutos se carga el restante hasta llegar al 83,33%, es decir 25 kWh, tal y como se le había establecido como condiciones iniciales al control.

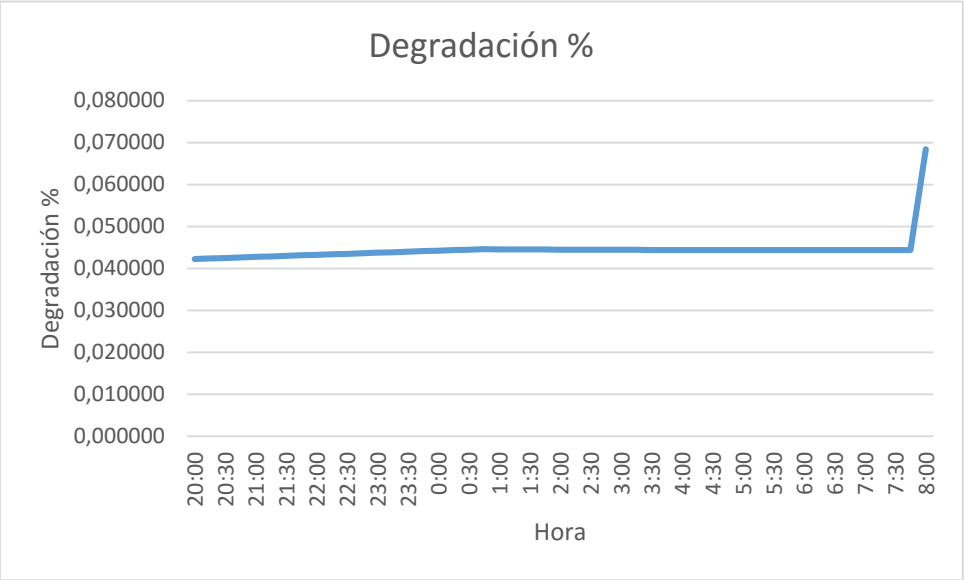

Fig. 35 Degradación para las condiciones del escenario 1 y SOC óptimo

Se aprecia que la degradación es constante durante todo el proceso a pesar de que el perfil del SOC es escalonado. Los valores de la degradación aumentan en el momento en que se tiene que volver a cargar para comenzar el día. Esto último se debe a que la según los resultados de Matlab obtenidos, la degradación es mayor a mayores valores de SOC.

Escenario 2

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	20
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Enero
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 2,4851 % respecto al fin de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}024851 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,85 kWh y por tanto se han perdido 0.149 kWh. Lo cual resulta una pérdida alta de capacidad, que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

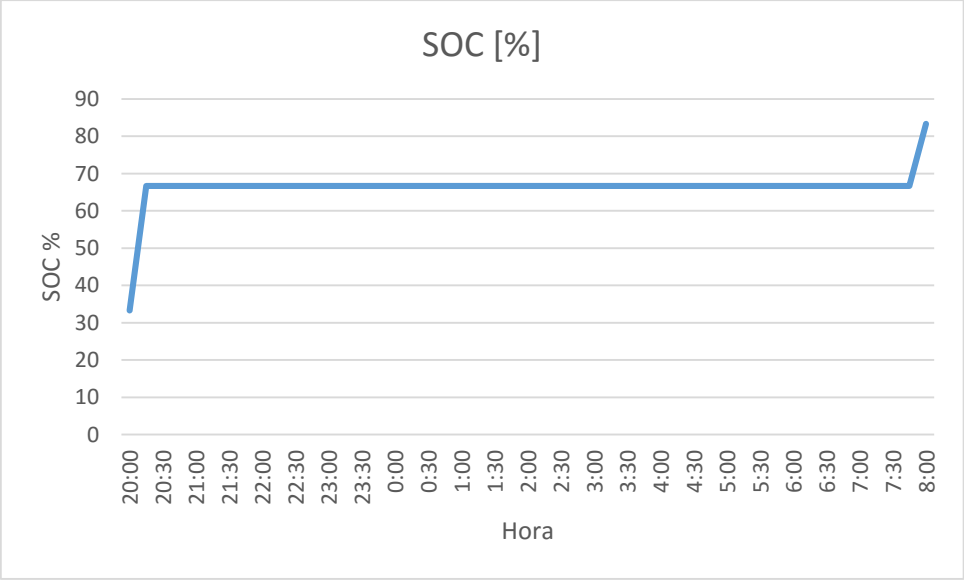

Fig. 36 SOC óptimo para las condiciones del escenario 2

Al limitar el SOC mínimo a 20 kWh, la herramienta de optimización trata de mantener ese mínimo hasta el último momento en que debe cargar la batería hasta la capacidad indicada, en este caso 25 kWh. Por eso se mantiene constante el SOC de la batería durante toda la noche.

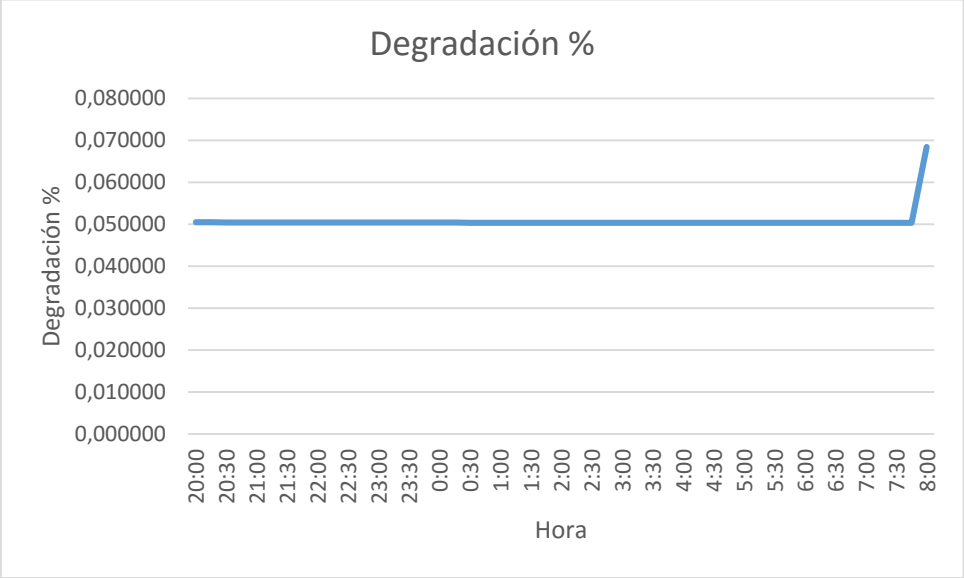

Fig. 37 Degradación para las condiciones del escenario 2 y SOC óptimo

A pesar de que el SOC no muestra un perfil escalonado, como en el escenario 1, sino constante, la degradación muestra un perfil muy similar. Al igual que en el escenario 1 se puede observar cómo el valor de la degradación aumenta en el momento de carga hasta el SOC final.

Escenario 3

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	3
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Junio
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 0.5952 % respecto al fin de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}005952 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,9964 kWh y por tanto se han perdido 0.0357 kWh. Lo cual resulta una pérdida baja de capacidad, que permitiría hacer de esta conexión algo rutinaria.

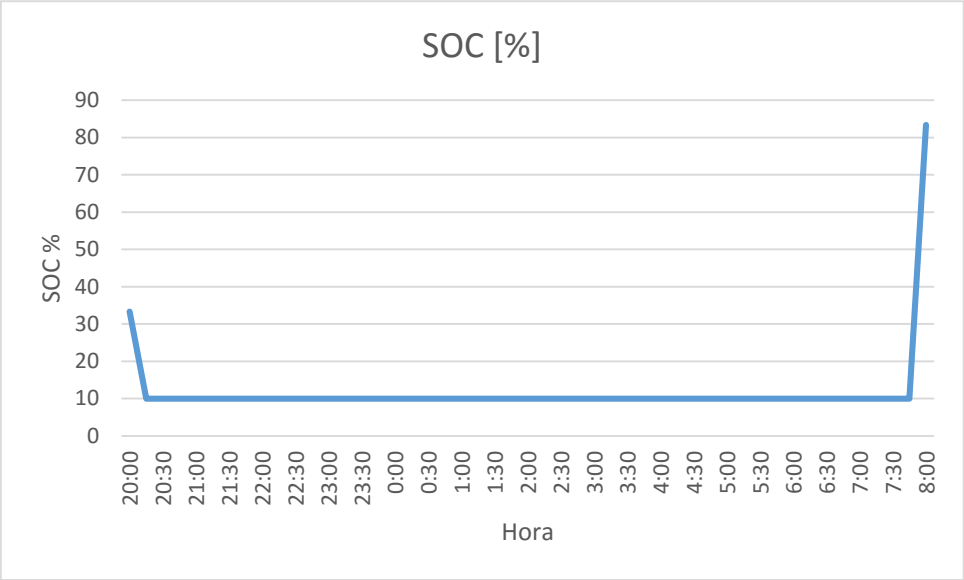

Fig. 38 SOC óptimo para las condiciones del escenario 3

Debido a la libertad de que el SOC mínimo pueda llegar hasta los 3 kWh, el modelo optimizado mantiene el valor del SOC constante en ese mínimo para reducir la degradación producida en la batería durante toda la noche.

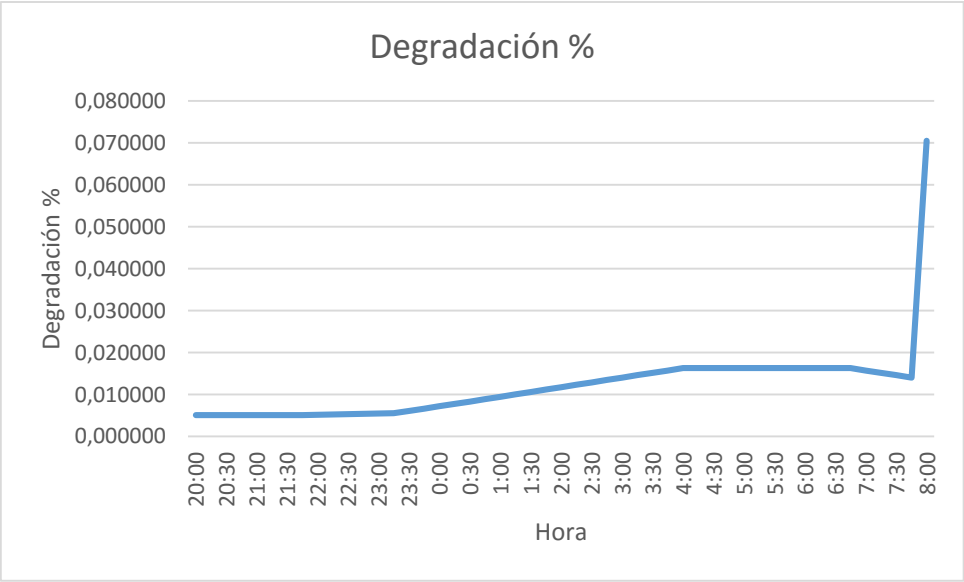

Fig. 39 Degradación para las condiciones del escenario 3 y SOC óptimo

La degradación producida en estas condiciones y el SOC que se considera óptimo, en este caso es muy reducida. A pesar de que el valor del SOC se mantiene constante, la degradación por periodo aumenta con el tiempo, aunque no alcanza valores tan elevados como en los escenarios de temperaturas de enero.

De todas formas, el valor elevado de la degradación al cargarlo hasta el SOC final sigue existiendo en ese periodo final.

Escenario 4

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	20
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Enero
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 2,5297 % respecto al fin de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}025297 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,8482 kWh y por tanto se han perdido 0.15782 kWh. Lo cual resulta una pérdida alta de capacidad, que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

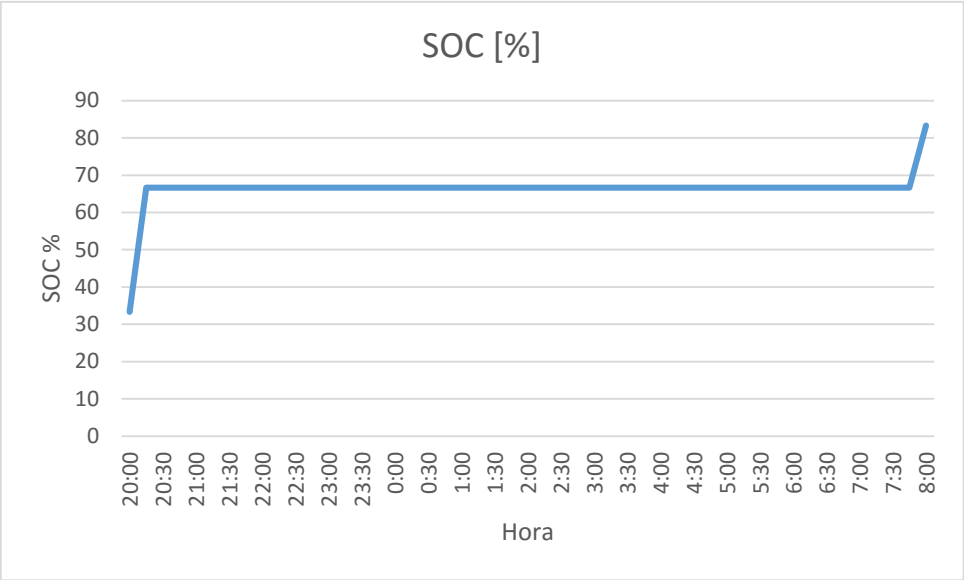

Fig. 40 SOC óptimo para las condiciones del escenario 4

En este escenario, el SOC es limitado a 20 kWh como valor mínimo, por tanto, al optimizar el modelo, se trata de mantener ese valor durante el mayor tiempo posible, hasta que tiene que cargar para alcanzar el SOC final.

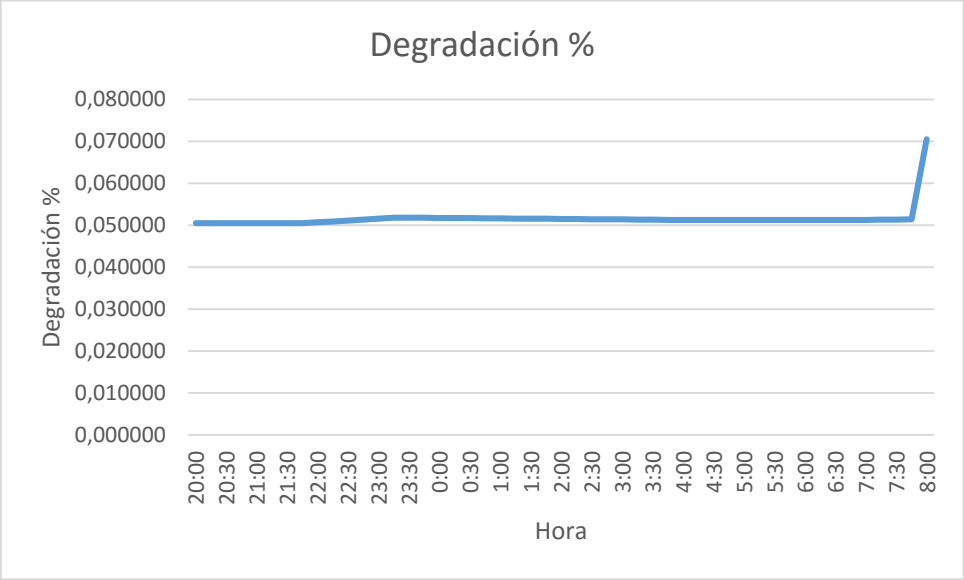

Fig. 41 Degradación para las condiciones del escenario 4 y SOC óptimo

Al igual que en los escenarios 1 y 2, la degradación se mantiene constante en un valor cercano al 0,05% durante toda la noche. Hasta que, al igual que en todos los escenarios, al cargarlo hasta el SOC final, el valor de la degradación en ese periodo aumenta.

Escenario 5

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	3
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Abril
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 1,7935 % respecto del final de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}017935 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,8923 kWh y por tanto se han perdido 0.1076kWh. Lo cual resulta una pérdida normal de capacidad, pero que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

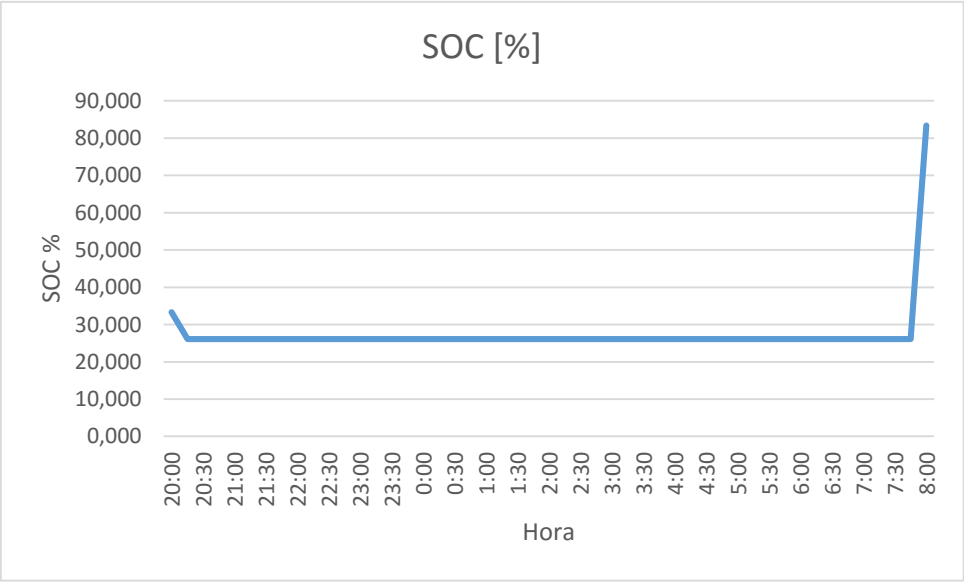

Fig. 42 SOC óptimo para las condiciones del escenario 5

En estas condiciones, a pesar de que se le permite reducir el valor del SOC hasta los 3 kWh, la optimización indica que para minimizar la degradación total es necesario mantener el SOC en aproximadamente un 30% de la capacidad, es decir 9 kWh.

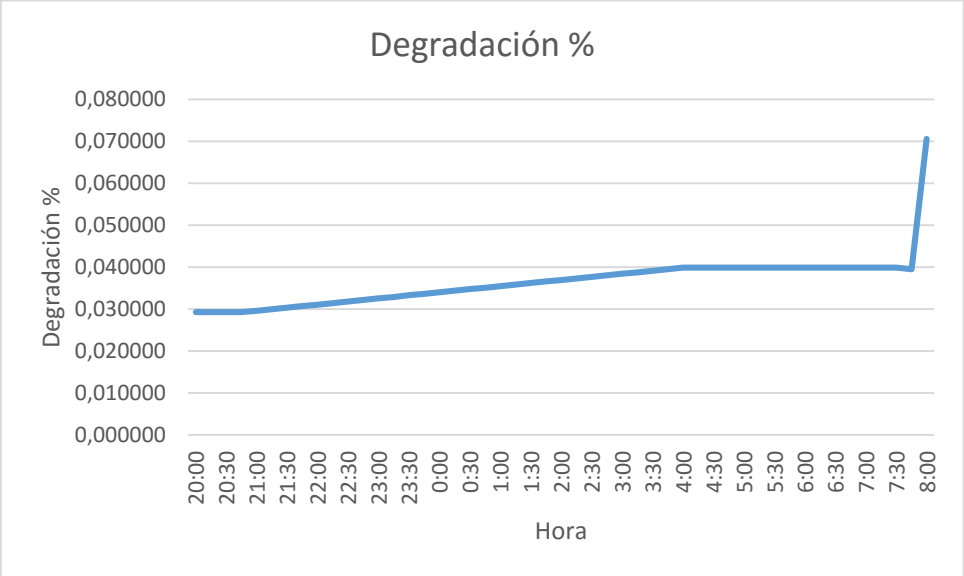

Fig. 43 Degradación para las condiciones del escenario 5 y SOC óptimo

A pesar de que el SOC se mantiene constante, la degradación va aumentando conforme avanza la noche. Esto se debe a que la temperatura va decayendo con el tiempo. Pero al igual que en todos los escenarios en el último periodo de carga la degradación alcanza el valor más elevado de la noche.

Escenario 6

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	27
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	24
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Abril
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 3,4039 % respecto del final de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}034039 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,7957 kWh y por tanto se han perdido 0.2042kWh. Lo cual resulta una pérdida alta de capacidad, que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

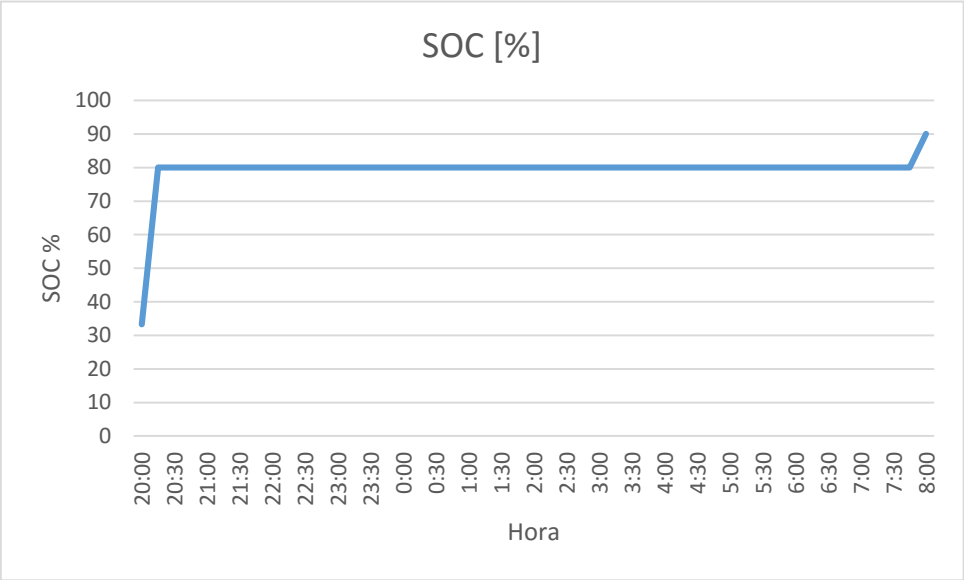

Fig. 44 SOC óptimo para las condiciones del escenario 6

En este caso, el valor mínimo al que puede reducirse el SOC es de 24kWh, y el valor con el que debe terminar es de 27 kWh, por lo que se ve un perfil de SOC con valores mayores que en los escenarios anteriores.

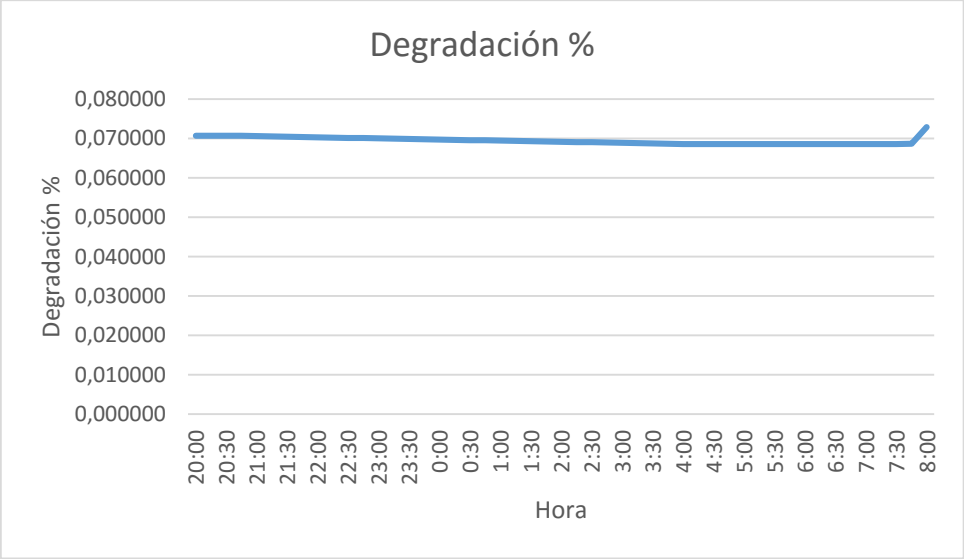

Fig. 45 Degradación para las condiciones del escenario 6 y SOC óptimo

Se puede observar que la variación de la degradación es mínima, ya que parece constante. Se puede apreciar que en este escenario, la degradación por la carga final no se puede apreciar apenas debido al alto valor de la degradación que se produce durante toda la noche.

Escenario 7

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	3
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Octubre
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 1,5465 % respecto el final de vida de la celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}015465 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,9072 kWh y por tanto se han perdido 0.09279 kWh. Lo cual resulta una pérdida baja de capacidad, que permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

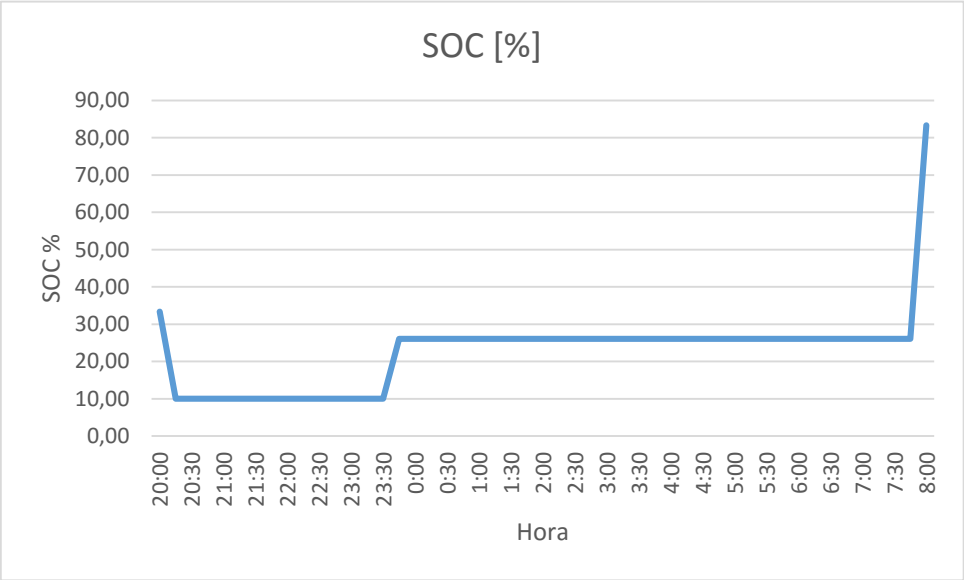

Fig. 47 SOC óptimo para las condiciones del escenario 7

En esta ocasión, la libertad de tener un SOC mínimo de 3 kWh permite al algoritmo controlar el SOC para que realice un perfil escalonado. Esto se debe a que, al reducirse la temperatura, la degradación se podrá reducir para otro SOC.

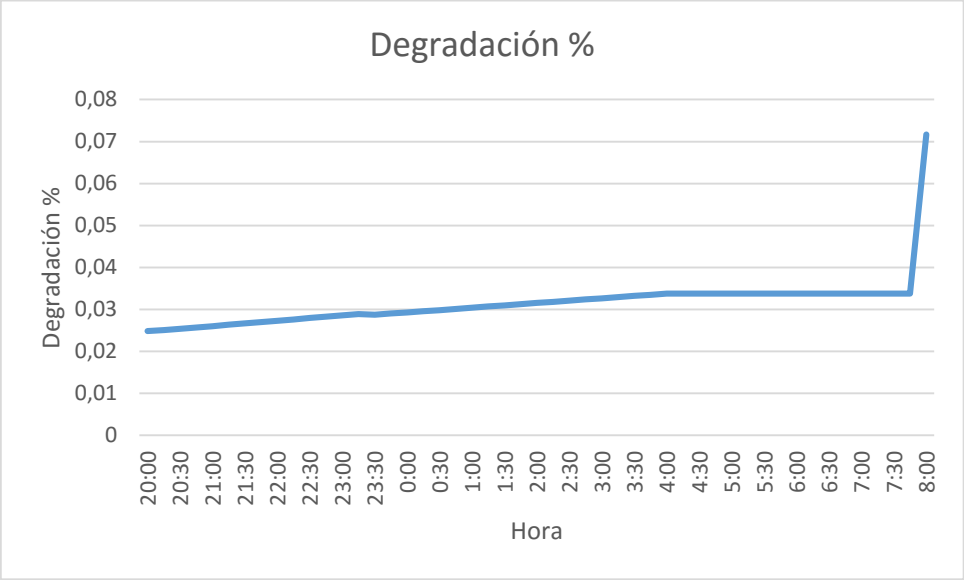

Fig. 48 Degradación para las condiciones del escenario 7 y SOC óptimo

La degradación se mantiene baja y tiene un perfil similar al del escenario 5 con las temperaturas de Abril. A pesar de los bajos valores de la degradación, la suma total es muy alta como para hacer una rutina de esta conexión.

Escenario 8

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	27
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	24
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Octubre
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 3,4569 % respecto el final de vida de una celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}034569 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,7925 kWh y por tanto se han perdido 0.20741kWh. Lo cual resulta una pérdida alta de capacidad, que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

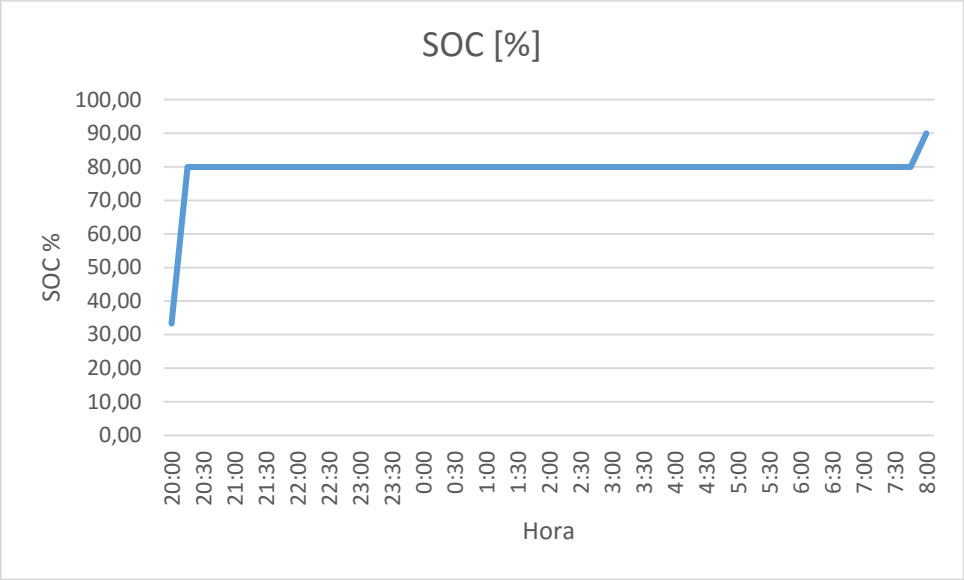

Fig. 49 SOC óptimo para las condiciones del escenario 8

Al igual que en el escenario 6, el SOC se mantiene constante en un valor muy alto ya que se encuentra limitada por un SOC mínimo de 24 kWh.

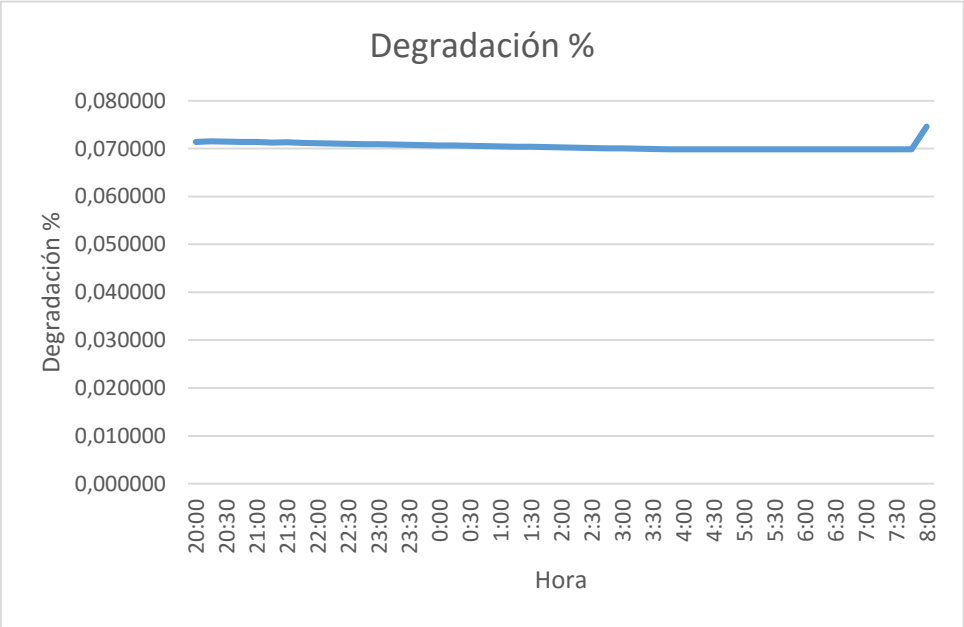

Fig. 50 Degradación para las condiciones del escenario 8 y SOC óptimo

Se puede apreciar que en estas condiciones la degradación se mantiene constante y con un valor muy alto. Es comparable al escenario 6 en el que también la degradación es muy alta y la diferencia con la alta degradación que se produce en la carga final no es apreciable.

Escenario 9

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	25
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	3
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Calor extremo
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 0,1921 % respecto el final de vida de una celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}001921 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,9884 kWh y por tanto se han perdido 0.0115kWh. Lo cual resulta una pérdida baja de capacidad, que permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

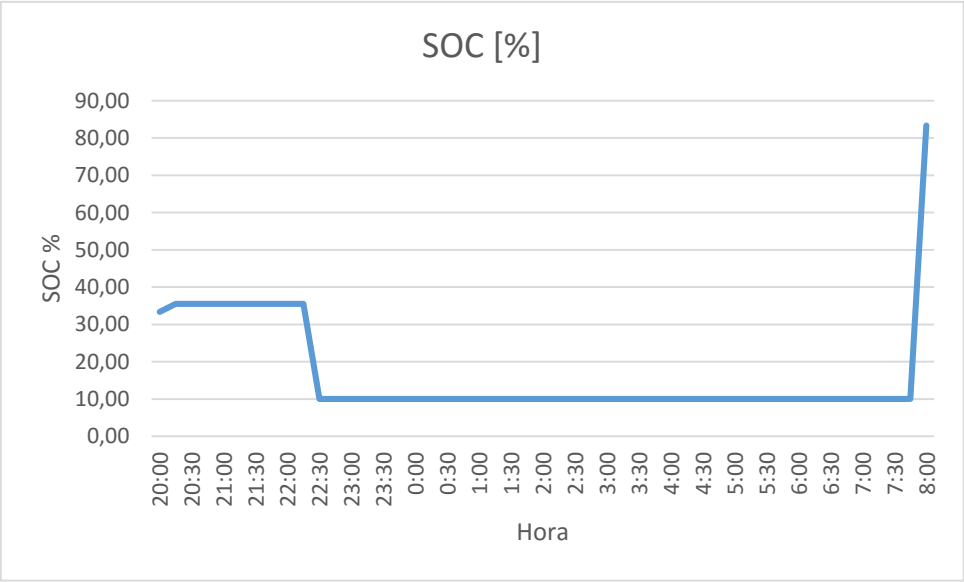

Fig. 51 SOC óptimo para las condiciones del escenario 9

En este caso, el algoritmo considera óptimo mantener, durante las primeras horas en las que hace más calor, el SOC sobre un 35% y después reducirlo al mínimo, es decir hasta el 10%.

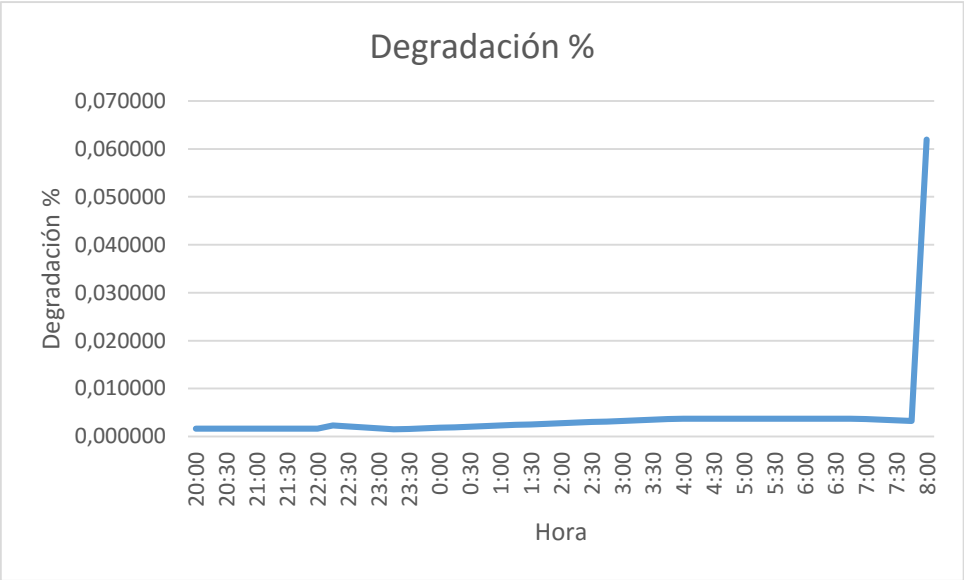

Fig. 52 Degradación para las condiciones del escenario 9 y SOC óptimo

Los valores de la degradación por periodo se muestran muy reducidos respecto el resto de escenarios. Esto se debe a la combinación de temperaturas altas y un SOC reducido. Pero al igual que en el resto de escenarios, en el periodo en que aumenta el SOC hasta el SOC final, la degradación en ese periodo aumenta considerablemente.

Escenario 10

SOC inicial del vehículo kWh	10
SOC final con el que debe terminar kWh	27
SOC mínimo que puede alcanzar kWh	24
Capacidad máxima batería kWh	30
Perfil Temperaturas	Calor extremo
Perfil Demanda de Regulación	Carga descarga continua a DoD de 3 kWh

Resultado

Degradación total = 2,8958 % respecto el final de vida de una celda

Si analizamos este valor, podemos hallar la cantidad de energía que es perdida al realizar durante una noche de estas condiciones este tipo de conexión, partiendo de la suposición de que la capacidad máxima de la batería es la nominal, es decir 30 kWh en el caso de este estudio:

$$Degradación = \frac{Q_0 - Q_t}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o}$$

Si sustituimos en la ecuación, quedaría de la siguiente forma:

$$0{,}028958 = \frac{30 - Q_t}{30 - 0.8 \cdot 30}$$

De donde se obtiene que la capacidad total que queda es 29,8262 kWh y por tanto se han perdido 0.1737kWh. Lo cual resulta una pérdida normal de capacidad, pero que no permite hacer de esta conexión algo rutinaria.

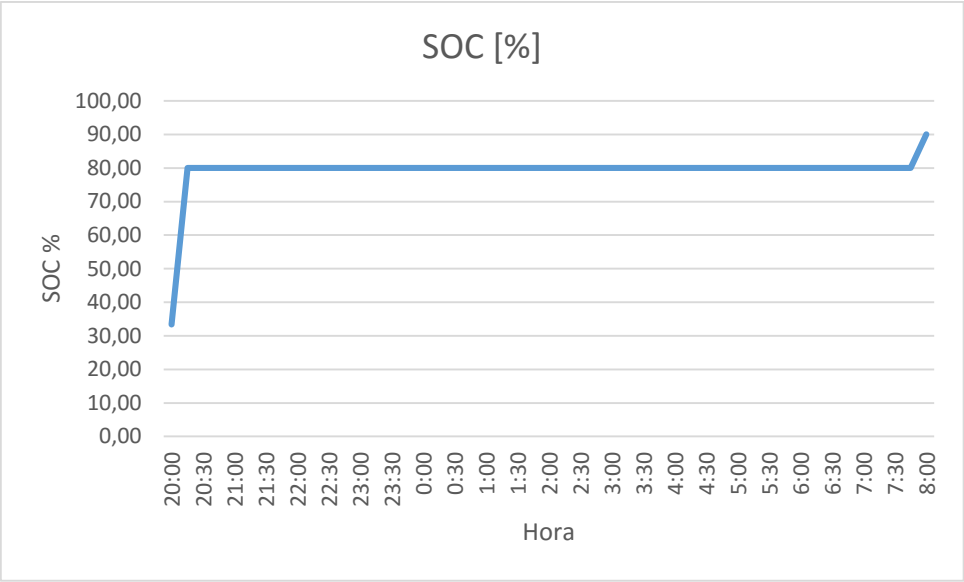

Fig. 53 SOC óptimo para las condiciones del escenario 10

Al igual que en los escenarios en los que se ha limitado el SOC mínimo a un valor alto, el algoritmo trata de mantenerse en ese valor hasta el periodo de carga final.

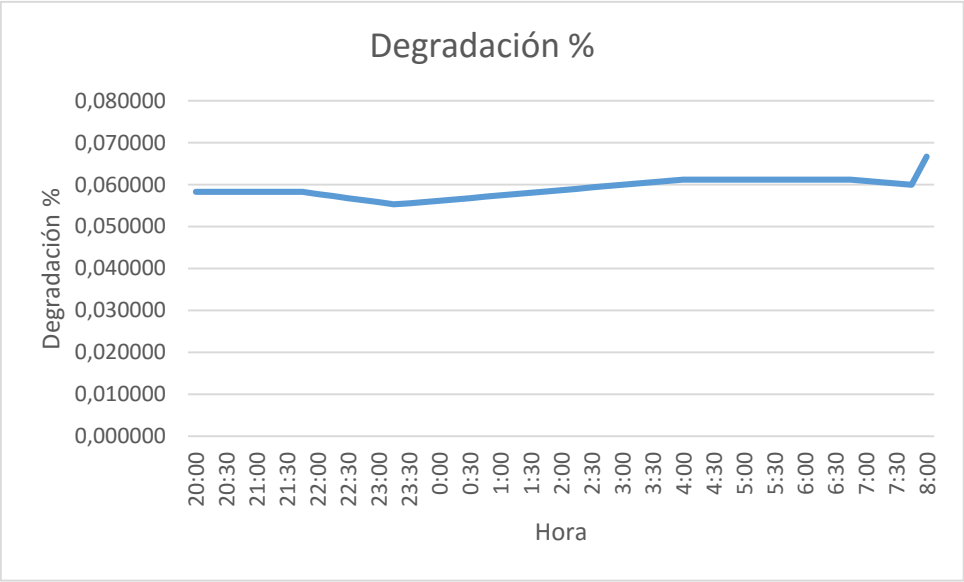

Fig. 54 Degradación para las condiciones del escenario 10 y SOC óptimo

En contraste con el escenario 9, en el que se tiene el mismo perfil de temperaturas, la degradación aumenta considerablemente. Esto se debe al límite de SOC impuesto al modelo de optimización. Este perfil es similar a los resultantes en los escenarios 6 y 8, en los cuales también se ha impuesto el límite de SOC mínimo alto.

4.2.2 Análisis de los resultados de optimización

Con el objetivo de obtener una visión global de los resultados obtenidos al tratar de minimizar la degradación en los diferentes escenarios propuestos, se realiza a continuación un análisis global de los resultados.

Como se ha podido comprobar al observar los valores de la degradación total de cada ensayo, se puede concluir que con las condiciones de SOC mínimo igual a 3, SOC inicial igual a 10 y SOC final igual a 25, cuanta mayor temperatura, menor degradación se producirá.

Esto se debe a que según los resultados obtenidos de Matlab, cuando la batería se encuentra a un SOC pequeño y la temperatura es alta, la degradación es menos.

Pero por el contrario, cuando en las condiciones se ha limitado el SOC mínimo a un valor de 20 kWh, se ha comprobado que la degradación ascendía considerablemente en cualquiera de las temperaturas.

Esto se debe a que a pesar de que las temperaturas sean altas o bajas, según los resultados obtenidos de Matlab, cuando el SOC es alto, la degradación es muy similar para diferentes temperaturas y además tiene un valor alto, como se puede observar en los resultados de la optimización.

Los ejemplos extremos más representativos a analizar son los meses de Julio y Enero, en los cuales las temperaturas suelen ser más extremas y por tanto las baterías están puestas a prueba. Y para compararlos, lo mejor es analizar el caso en que se les deja la libertad de reducir el SOC hasta los 3 kWh, lo que equivale en un 10% de la capacidad total, ya que el algoritmo de optimización tendrá más posibilidades de reducir la degradación.

En el mes de Julio la degradación total ha sido de 0.0357 kWh, mientras que en Enero la degradación ha resultado en 0.13081kWh. Por tanto, se puede concluir que la degradación en una noche de Enero es mucho más elevada que en una noche de Julio. Esto es, tal y como se ha mencionado anteriormente, debido a la diferencia de temperatura.

Si se compara las noches de Abril y Octubre, al tener unas temperaturas similares, la degradación es muy similar. De forma que en una noche de Abril la degradación total es de 0.1076kWh y en una noche de Octubre de 0.09279 kWh. Es decir, la degradación es prácticamente la misma.

Se puede apreciar que, tal y como cabía esperar, la degradación en los meses de Abril y Octubre tiene un valor que se encuentra entre la degradación producida en una noche de Enero y una noche de Julio.

Los resultados obtenidos en el escenario 9, a temperaturas altas, muestra una degradación muy pequeña y sólo comparable con la de Julio. En el escenario 9 la degradación resulta en 0.0115kWh, mientras que en una noche de Julio se ha obtenido 0.0357 kWh.

Por otro lado, tal y como se ha mencionado antes, cuando se han puesto los límites altos al SOC mínimo, los valores de la degradación han subido de una manera considerable. Teniendo la degradación máxima en una noche a tener un valor de 0.20741kWh en el estudio del escenario 8, es decir, limitando a 24 kWh el SOC mínimo en una noche de octubre.

Si analizamos de una manera práctica los resultados, se puede decir que la degradación para todos los casos es demasiado alta como para conectar el vehículo todas las noches. En el caso de Julio o días con temperaturas muy altas, al tener una degradación más reducida, se podría realizar este tipo de conexión varias veces al mes, pero en ocasiones en las que la temperatura sea reducida, no se recomienda conectarlo. Es decir, durante los meses de invierno, se podría conectar una vez al mes, de forma esporádica.

También hay que decir que las baterías que se han utilizado son de baja calidad en comparación con una batería real de vehículo eléctrico y por ello puede ser que se la degradación ser mayor de lo que debería.

En el caso que se quisiera conectar todas las noches el coche a la red, se debería poner un limitador, para que en el momento en que supere una degradación establecida, comience la carga hasta el SOC final y se corte la conexión.

4.2.2.1 Comparación temperaturas frías

Escenario 1	0.13081kWh
Escenario 2	0.149 kWh

Por tanto, la disminución entre haber utilizado la estrategia del escenario 1 al escenario 2 es del 12,20% de capacidad perdida.

4.2.2.2 Comparación temperaturas abril

Escenario 5	0.1076kWh
Escenario 6	0.2042kWh

Por tanto, la disminución entre haber utilizado la estrategia del escenario 5 al escenario 6 es del 47,30% de capacidad perdida.

4.2.2.3 Comparación temperaturas octubre

Escenario 7	0.09279 kWh
Escenario 8	0.20741kWh

Por tanto, la disminución entre haber utilizado la estrategia del escenario 7 al escenario 8 es del 55,26% de capacidad perdida.

4.2.2.4 Comparación temperaturas julio

Escenario 3	0.0357 kWh
Escenario 4	0.1578 kWh

Por tanto, la disminución entre haber utilizado la estrategia del escenario 3 al escenario 4 es del 77,37% de capacidad perdida.

4.2.2.5 Comparación temperaturas altas

Escenario 9	0.0115 kWh
Escenario 10	0.1737 kWh

Por tanto, la disminución entre haber utilizado la estrategia del escenario 9 al escenario 10 es del 93.37% de capacidad perdida.

4.3 Margen de error

4.3.1 Histograma

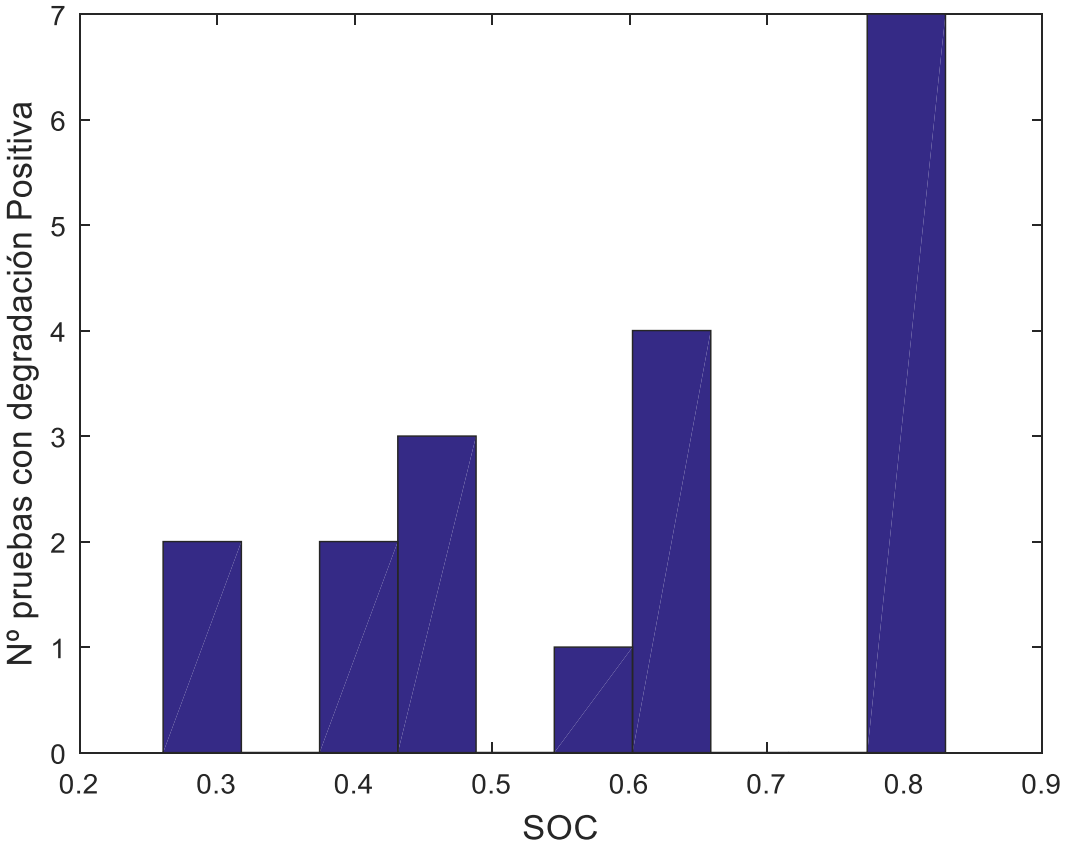

Fig. 55 Histograma de Nº pruebas con degradación positiva respecto del SOC

El histograma representa la cantidad de ensayos en las que se ha obtenido una degradación positiva con el SOC correspondiente.

Esta gráfica se ha realizado con el objetivo de aportar una visión de la calidad o fiabilidad de los datos y ensayos. Es decir, como con un SOC real de un 90 % o de un 100% no hay pruebas realizadas, no se podría estimar con exactitud o con mucha fiabilidad un modelo de optimización.

4.3.2 Error del modelo de estimación de la degradación

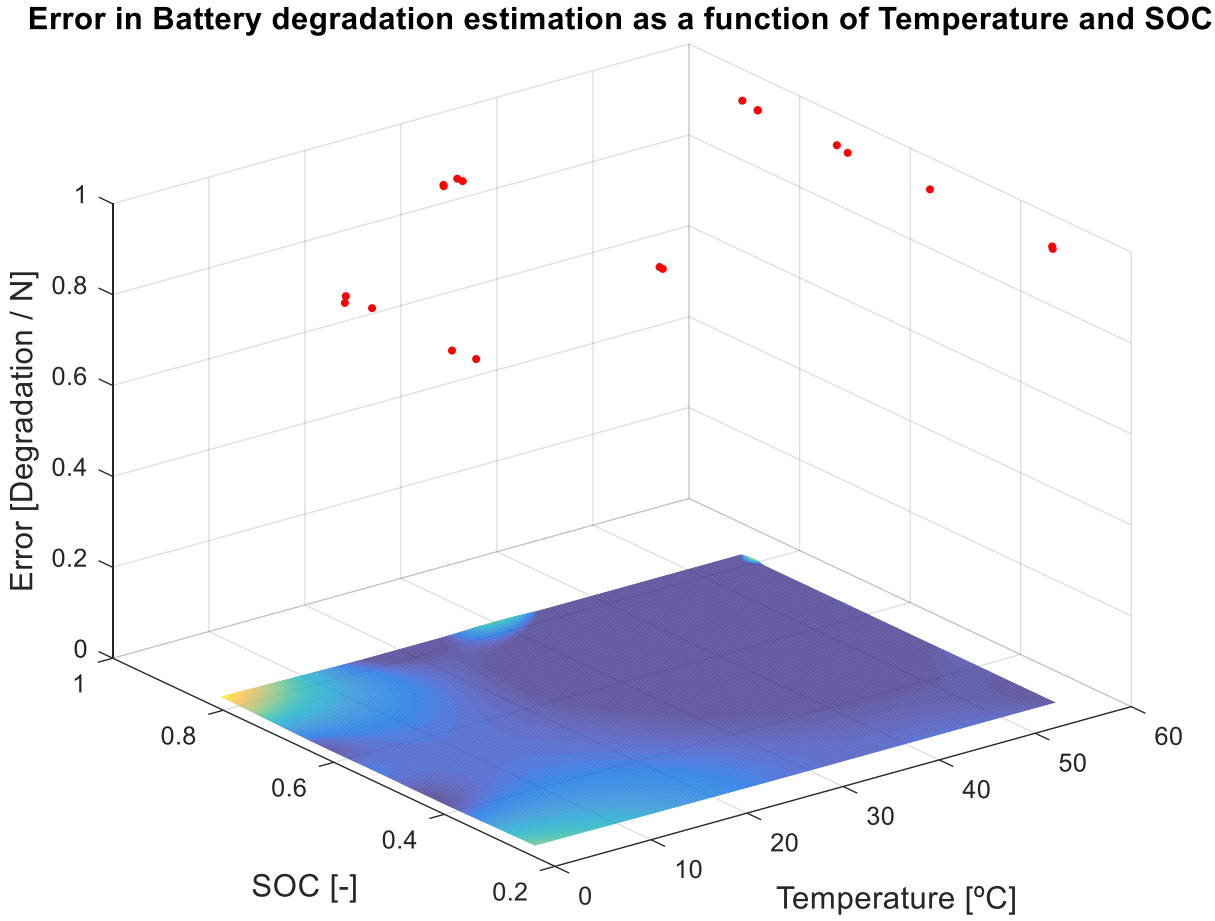

Fig. 56 Representación del error en la estimación de la degradación en función del SOC y la temperatura

Fig. 57 Representación del error en la estimación de la degradación en función del SOC y la temperatura

Tal y como se muestra en las dos figuras anteriores, el error se ve aumentado en los valores en los que la temperatura es baja. Esto se debe a la imposibilidad de realizar pruebas con valores de SOC superiores al 60 %. Por lo que los valores que existen para valores de SOC altos y temperaturas bajas son estimados por el algoritmo de Matlab y por tanto son menos fiables que los tomados con medidas reales.

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones Resultados

La conexión Vehicle-to-Grid de un vehículo eléctrico es uno de los temas que se debe tratar y desarrollar. Principalmente, el aspecto de la degradación de la batería, ya que de ello dependerá la viabilidad de este tipo de conexión con la red y el desarrollo de una red eléctrica más distribuida en vez de centralizada.

La principal conclusión que cabe destacar es que la degradación varía dependiendo de la temperatura y del SOC al que se realicen los servicios V2G.

A diferencia de otros estudios que analizan la profundidad de descarga como parámetro con el que varía la degradación, en este estudio se ha tratado de comprobar si el SOC de la batería a la hora de suministrar servicios de V2G es un parámetro importante a controlar, si se quiere desarrollar esta tecnología.

Se puede apreciar que la degradación sufrida por la batería varía en función de la temperatura y del SOC al que se realice el proceso de V2G. Los resultados muestran que cuando el SOC se encuentra entre un 20 y un 60 % aproximadamente, el valor de la degradación es mayor en temperaturas frías que calientes. Mientras que si el SOC es mayor, la degradación varía muy poco con la temperatura, aunque sí que es cierto que alcanza valores más elevados. Por esta razón, en los escenarios en los que se ha limitado el SOC mínimo a un valor alto, la degradación es mayor.

En este estudio se aprecia, tal y como se ha demostrado en otros estudios como el de la Ref. [43], que la degradación producida por la conexión del vehículo a la red para realizar servicios de V2G es demasiado grande y provoca que durante la vida del vehículo eléctrico haya que cambiar la batería en repetidas ocasiones. Esto lleva a replantear la viabilidad de este tipo de conexión, que tiene el motivo de la degradación como uno de sus principales frenos al desarrollo.

El estudio desarrollado apoya esta conclusión. Sin embargo, no puede ser generalizable ya que se han utilizado baterías de baja calidad respecto a una batería normal de un vehículo y los valores de degradación obtenidos de los cálculos pueden no corresponder con la realidad.

Uno de los hechos más sorprendentes al realizar los ensayos, es el mal funcionamiento de nuestras baterías a temperaturas bajas. No fue posible introducir perfiles con intensidad de carga mayor de 3 A debido a que saltaban las protecciones y por tanto no se pudieron someter a la diversidad de pruebas que a las baterías a temperatura ambiente y del horno. Esto puede deberse a que a bajas temperaturas, las reacciones químicas que se producen dentro de la batería cambian, debido a la ralentización de movimiento entre las partículas por el frío.

Otro resultado que sorprende es que la degradación a grandes temperaturas es menor que con el frío. Es algo que no se esperaba ya que en diversos estudios en los que se

argumenta que la pérdida de la capacidad por el aumento de la temperatura es debida a la formación de una capa en el electrodo que limita las reacciones químicas. [44].

Una de las cosas que más sorprendió al comenzar los ensayos fue la energía total del primer test de capacidad estática realizado a nuestras baterías. La capacidad nominal de éstas es de 5Ah, mientras que en algunas de ellas la energía que podían almacenar llegó a resultar en 5,8Ah.

Esta diferencia lleva a pensar que las baterías no han resultado de gran calidad, ya que, aparte de este detalle, en más ocasiones de las que cabía esperar, la degradación que se producía después de someterlas a un perfil, era negativa, es decir, que la capacidad inicial era menor que la final.

5.2 Conclusiones metodología

En principio la metodología empleada ha sido la correcta, ya que lo que se pretendía era llegar a resultados experimentales que aportaran cierta idea de lo que sucede al someter a las baterías a los perfiles y a las temperaturas empleadas.

Lo que nos aporta la información acerca de la capacidad real de la batería es el test de capacidad estática, el cual nos dice la energía total que la batería es capaz de almacenar. Este test es muy importante realizarlo bien ya que va a ser el que aporte los datos con los que se calculan la degradación. En este estudio se ha realizado de la manera indicada en la Ref. 8, descrita también en la sección 3.3.1.

Para hallar la degradación se aplicaba la fórmula descrita en la Ref. 8 utilizando las capacidades medidas en el test de capacidad estática antes de someter a un perfil a la batería y la de después.

El mayor inconveniente a la hora de realizar las pruebas era el tiempo. Normalmente lleva un tiempo de unas 20 horas los 50 ciclos que se le introducían a las baterías, por lo que una vez comenzadas las pruebas no se podía realizar nada hasta el día siguiente.

Por otro lado, los algoritmos que se han utilizado para procesar, analizar y optimizar los datos han sido llevados por programas como Excel, Matlab y GAMS. Los códigos en los que se ha basado este proyecto, inicialmente tenían algunos fallos a matizar, ya que algunas fórmulas estaban mal empleadas y también porque estaban enfocados a un estudio de la degradación debida a la profundidad de descarga y no al SOC como este.

De todas formas, después de tiempo tratando de modificarlos y depurarlos para que quedaran de la mejor manera posible, se puede decir que se han conseguido, de una forma bastante fiable, los resultados que se deseaban estudiar, analizar y representar.

5.3 Comentarios y sugerencias para futuros estudios

Los parámetros que se han estudiado en este proyecto han ido el SOC y la temperatura, pero también resultaría interesante poder realizar estudios para observar de qué manera se degradan las baterías respecto la profundidad de descarga o el valor de la intensidad o tensión a la que se realizan los ensayos.

El perfil de demanda introducido ha sido el descrito en la sección 3.4.3.2, en el cual se simula una carga y descarga continuada de un 10 % de profundidad de descarga durante toda una noche. Pero el desarrollo de un modelo con muchos más tipos de perfiles que simulen diferentes situaciones de demanda para la regulación de la red sería un estudio

muy interesante. Algunas sugerencias de perfiles se han diseñado y adjuntado en el anexo IV.

Debido a lo comentado anteriormente sobre la calidad de las baterías, habría resultado ideal para este estudio unas baterías más fiables.

Por otro lado, la conexión entre la máquina de medidas y el ordenador con el que se controlaba, se perdía continuamente, incluso eliminando datos de varios días. Esto no queda claro si es debido al ordenador, a la máquina o a la conexión por cable de internet, pero ha resultado un gran lastre ya que se ha perdido mucho tiempo en tratar de arreglar la conexión y se tardaba una gran cantidad de tiempo en recoger los datos obtenidos. Tiempo que se podría haber aprovechado para realizar más pruebas que aportaran más diversidad a este proyecto.

El hecho de haber probado sólo unas baterías no nos aporta datos suficientes para generalizar el modelo a todas las baterías, pero sí que nos aporta una visión de qué ocurre cuando se conecta el vehículo a la red para realizar servicios Vehicle-to-Grid. Aunque habría resultado muy interesante poder generalizar ese modelo y sería un posible estudio a llevar a cabo en un futuro.

Por último, este modelo no trata el aspecto económico de los resultados ya sea por falta de tiempo o de datos suficientes de la regulación de la red. Pero también se consideraría muy interesante importante un estudio sobre el impacto económico que tiene la degradación de la batería con los valores hallados en este estudio. A pesar de esa falta de datos, sí que se puede estimar que hoy por hoy no es viable una conexión diaria del vehículo a la red aportando los servicios V2G durante toda la noche, aunque si se limita a una cierta cantidad de degradación por noche, sería algo más viable.

ANEXO I

Resultados obtenidos

Resumen Resultados Excel

CycleID	Cap_Chg(mAh)	Cap_DChg(mAh)	RCap_Chg(mAh)	RCap_DChg(mAh)	Charge/Discharr	Energy_Chg(mW	Energy_DChg(mW	REnergy_Chg(mW	REnergy_Dchg(m	CC_Chg_Ratio(%	CC_Chg_Cap(m	Platform_Cap((	Platform_RCap	Platfrom_Effici	Platform_Time	Capacitance_C	Capacitance_Dr	Mid_value Vol	Discharge Fadi	Charge Time(h:
	Step ID	Step Type	Step Time(h:m	Cap(mAh)	CmpCap(mAh)	Energy(mWh)	CmpEnergy(m	Super Capacita	Start Vol(V)	End Vol(V)	Start Temperat	End Temperatu	End Cap	Charge Mid-Vo	Discharge Mid-	DCIR(mO)				
		Record ID	Time(h:m:s:ms	Voltage(V)	Current(mA)	Temperature(?	Cap(mAh)	CmpCap(mAh)	Energy(mWh)	CmpEnergy(mWh)	Realtime	Min-T(?)	Max-T(?)	Avg-T(?)						
3	500,1	500	500070	500024,9	99,991	2003,4	1751,6	2003363,9	1751585,2	100	500,1	0	0	0	0:00:00:000	21179,44	22699,74	rd(mO)	3,4985	697,71	0:06:00:000
	7	CC_Chg	0:06:00:000	3,9477	500,1	500070	2003,4	2003363,9	21179,44	3,9477	4,0327	0	500,1	4,0076	0	41,9053					
	524	0:00:00:000	3,9477	500,7	0	0	0	0	0	0	0	2016-05-11_17:58:27									
	525	0:00:05:000	3,9623	500,7	0	6,9	6945,4	27,5	27485,4	2016-05-11_17:58:32											
	526	0:00:10:000	3,9694	500,3	0	13,9	13890,7	55	55036,6	2016-05-11_17:58:37											
	527	0:00:15:000	3,9735	500,7	0	20,8	20836,1	82,6	82626,2	2016-05-11_17:58:42											
	528	0:00:20:000	3,9763	500,7	0	27,8	27781,6	110,2	110235,9	2016-05-11_17:58:47											
	529	0:00:25:000	3,9787	500,7	0	34,7	34727	137,9	137862,5	2016-05-11_17:58:52											
	530	0:00:30:000	3,9806	500,7	0	41,7	41672,4	165,5	165504,3	2016-05-11_17:58:57											
	531	0:00:35:000	3,9822	500,7	0	48,6	48617,8	193,2	193158	2016-05-11_17:59:02											
	532	0:00:40:000	3,984	500,7	0	55,6	55563,2	220,8	220823,9	2016-05-11_17:59:07											
	533	0:00:45:000	3,9849	500,7	0	62,5	62508,6	248,5	248498	2016-05-11_17:59:12											
	534	0:00:50:000	3,9862	500,7	0	69,5	69454,1	276,2	276181,2	2016-05-11_17:59:17											
	535	0:00:55:000	3,9874	500,7	0	76,4	76399,5	303,9	303871,9	2016-05-11_17:59:22											
	536	0:01:00:000	3,9884	500,7	0	83,3	83344,9	331,6	331569,6	2016-05-11_17:59:27											
	537	0:01:05:000	3,9893	500,7	0	90,3	90290,3	359,3	359273,9	2016-05-11_17:59:32											
	538	0:01:10:000	3,9902	500,7	0	97,2	97235,7	387	386984,8	2016-05-11_17:59:37											
	539	0:01:15:000	3,9911	500,7	0	104,2	104181,1	414,7	414701,6	2016-05-11_17:59:42											
	540	0:01:20:000	3,9921	500,7	0	111,1	111126,6	442,4	442424,8	2016-05-11_17:59:47											
	541	0:01:25:000	3,9927	500,7	0	118,1	118072	470,2	470153,6	2016-05-11_17:59:52											
	542	0:01:30:000	3,9936	500,7	0	125	125017,4	497,9	497887,3	2016-05-11_17:59:57											
	543	0:01:35:000	3,9942	500,7	0	132	131962,8	525,6	525626,5	2016-05-11_18:00:02											
	544	0:01:40:000	3,9952	500,7	0	138,9	138908,2	553,4	553371,2	2016-05-11_18:00:07											
	545	0:01:45:000	3,9958	500,7	0	145,9	145853,6	581,1	581121,1	2016-05-11_18:00:12											
	546	0:01:50:000	3,9964	500,7	0	152,8	152799,1	608,9	608875,9	2016-05-11_18:00:17											
	547	0:01:55:000	3,9973	500,7	0	159,7	159744,5	636,6	636636,2	2016-05-11_18:00:22											
	548	0:02:00:000	3,998	500,7	0	166,7	166689,9	664,4	664401,1	2016-05-11_18:00:27											
	549	0:02:05:000	3,9989	500,7	0	173,6	173635,3	692,2	692171,6	2016-05-11_18:00:32											
	550	0:02:10:000	3,9998	500,7	0	180,6	180580,7	719,9	719948	2016-05-11_18:00:37											
	551	0:02:15:000	4,0004	500,7	0	187,5	187526,1	747,7	747730,8	2016-05-11_18:00:42											
	552	0:02:20:000	4,0014	500,7	0	194,5	194471,6	775,5	775519,7	2016-05-11_18:00:47											
	553	0:02:25:000	4,0023	500,7	0	201,4	201417	803,3	803313,6	2016-05-11_18:00:52											
	554	0:02:30:000	4,0029	500,7	0	208,4	208362,4	831,1	831112,9	2016-05-11_18:00:57											
	555	0:02:35:000	4,0035	500,7	0	215,3	215307,8	858,9	858917,2	2016-05-11_18:01:02											
	556	0:02:40:000	4,0045	500,7	0	222,3	222253,2	886,7	886727,6	2016-05-11_18:01:07											
	557	0:02:45:000	4,0051	500,7	0	229,2	229198,6	914,5	914543	2016-05-11_18:01:12											
	558	0:02:50:000	4,006	500,7	0	236,1	236144,1	942,4	942363,8	2016-05-11_18:01:17											
	559	0:02:55:000	4,0066	500,7	0	243,1	243089,5	970,2	970189,7	2016-05-11_18:01:22											
	560	0:03:00:000	4,0076	500,7	0	250	250034,9	998	998021,6	2016-05-11_18:01:27											
	561	0:03:05:000	4,0085	500,7	0	257	256980,3	1025,9	1025859	2016-05-11_18:01:32											

Tabla 10 Recorte de datos brutos 05_V2G60_4

		Aux Vol(V)	Aux T(°C)
Record NO.	Realtime	U1	T1
1	11/05/2016 17:15	0	54,5
2	11/05/2016 17:15	0	54,5
3	11/05/2016 17:15	0	54,5
4	11/05/2016 17:15	0	54,5
5	11/05/2016 17:15	0	54,5
6	11/05/2016 17:15	0	54,6
7	11/05/2016 17:15	0	54,6
8	11/05/2016 17:15	0	54,7
9	11/05/2016 17:16	0	54,7
10	11/05/2016 17:16	0	54,7
11	11/05/2016 17:16	0	54,7
12	11/05/2016 17:16	0	54,7
13	11/05/2016 17:16	0	54,8
14	11/05/2016 17:16	0	54,8
15	11/05/2016 17:16	0	54,9
16	11/05/2016 17:16	0	55
17	11/05/2016 17:16	0	55
18	11/05/2016 17:16	0	55,1
19	11/05/2016 17:16	0	55,1
20	11/05/2016 17:16	0	55,1
21	11/05/2016 17:16	0	55,1
22	11/05/2016 17:17	0	55,1
23	11/05/2016 17:17	0	55,1
24	11/05/2016 17:17	0	55,1
25	11/05/2016 17:17	0	55,1
26	11/05/2016 17:17	0	55,1
27	11/05/2016 17:17	0	55,1
28	11/05/2016 17:17	0	55,1
29	11/05/2016 17:17	0	55,1
30	11/05/2016 17:17	0	55,1
31	11/05/2016 17:17	0	55
32	11/05/2016 17:17	0	55
33	11/05/2016 17:17	0	55
34	11/05/2016 17:17	0	55
35	11/05/2016 17:18	0	54,9
36	11/05/2016 17:18	0	54,9
37	11/05/2016 17:18	0	54,9

Tabla 11 Recorte de datos brutos Temperatura

Battery Id	TotalCycles	TotalAhThroug	TotalWhThroug	Num Cycles	T Media	T_Max	T_Min	T Median	T std. Dev	V Media
05	397	405639,6	1527616,4	189	55,31104533	56	54,5	55,4	0,35792541	3,69560799

V Max	V Min	V Median	V std. Dev	Ah_throughput C	Ah_Throuput Dc	Ah_ thoughp	Eff	Wh Chr	Wh DChg	Wh
3,9778	2,6984	3,8439	0,24953382	95321,6	93619,6	188941,2	99,129037	373509,4	320418	693927,4

media abs(I)	mediana abs(I)	max abs(I)	StdDev I	DoD	min abs(I)	Capacity [mAh	Capacity [mWh	CapacityIni[mAh	SOC_avg	SOCDev
5330,501107	5000,7	6000,7	942,179966	0,08289294	0	6000,5	20949152,6	6030	0,2606302	0,10592757

Degradation_Ini	Degradation	delta epsilon	Ciclos_ Efect	Deg_x_cicl_eff	Deg_x_Wh	Deg_x_Ah	Deg_x_ciclo
-0,030701462	0,02446103	0,05516249	15,6667662	0,003520988	3,52501E-08	1,29464E-07	0,000129423

Tabla 12. Resultados finales
después de procesado

Resultados negativos Matlab

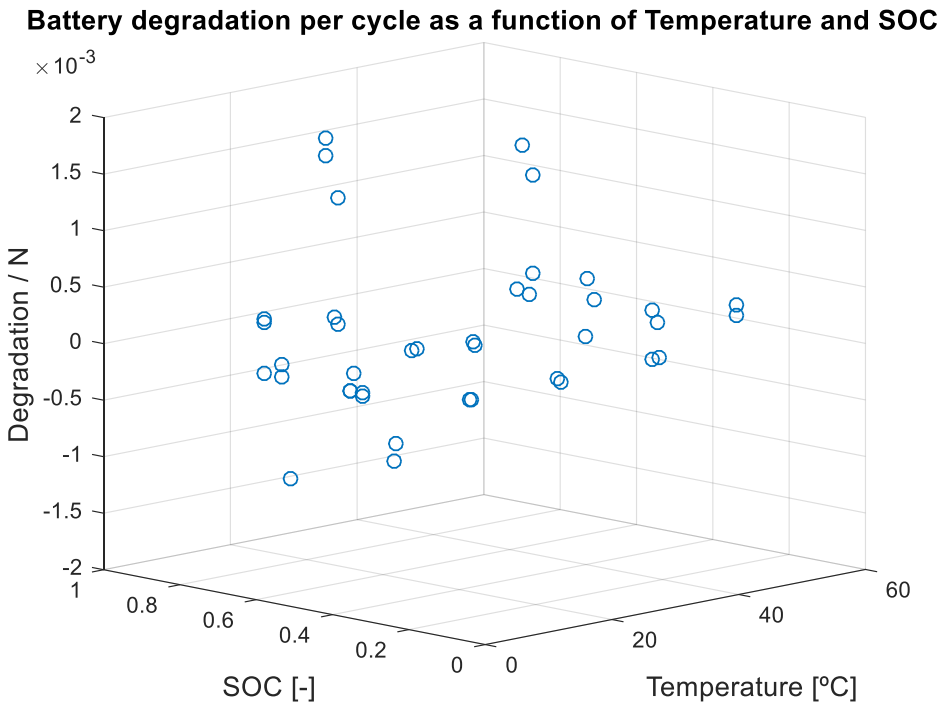

Fig. 58 Representación en 3D de la degradación de la batería por ciclo en función del SOC y temperatura

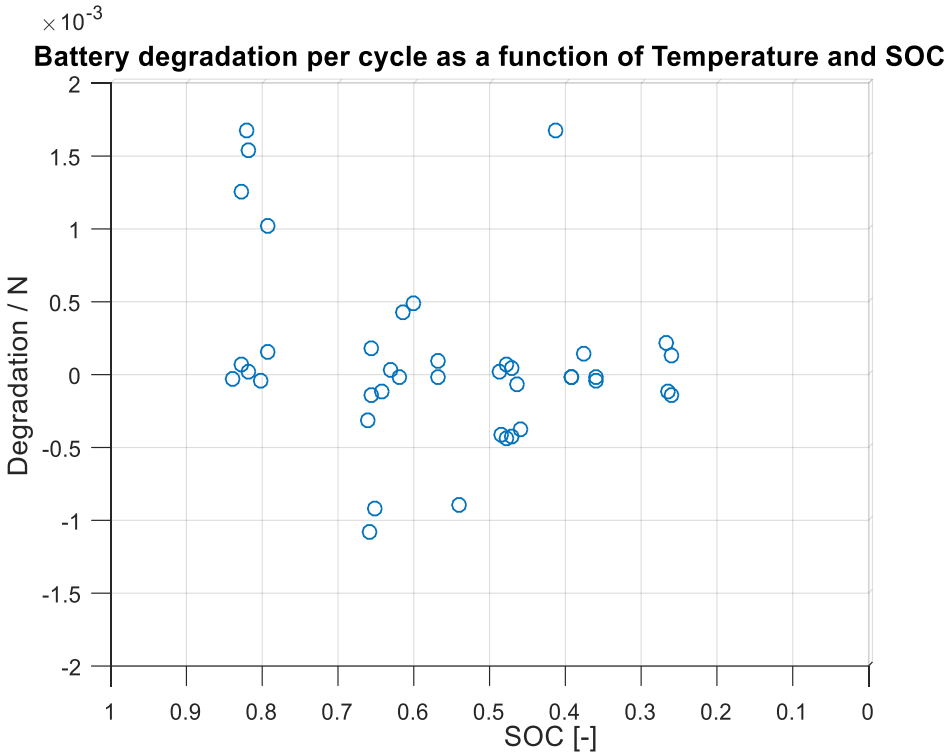

Fig. 59 Representación en 2D de la degradación de la batería por ciclo en función del SOC

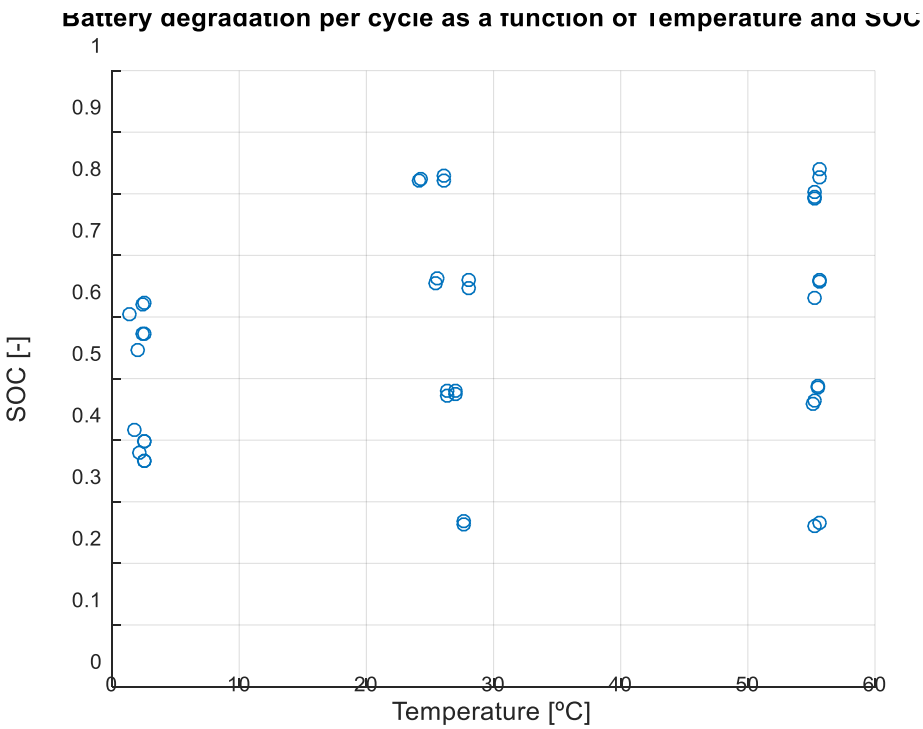

Fig. 60 Representación en 2D del SOC de la batería por ciclo en función de la temperatura

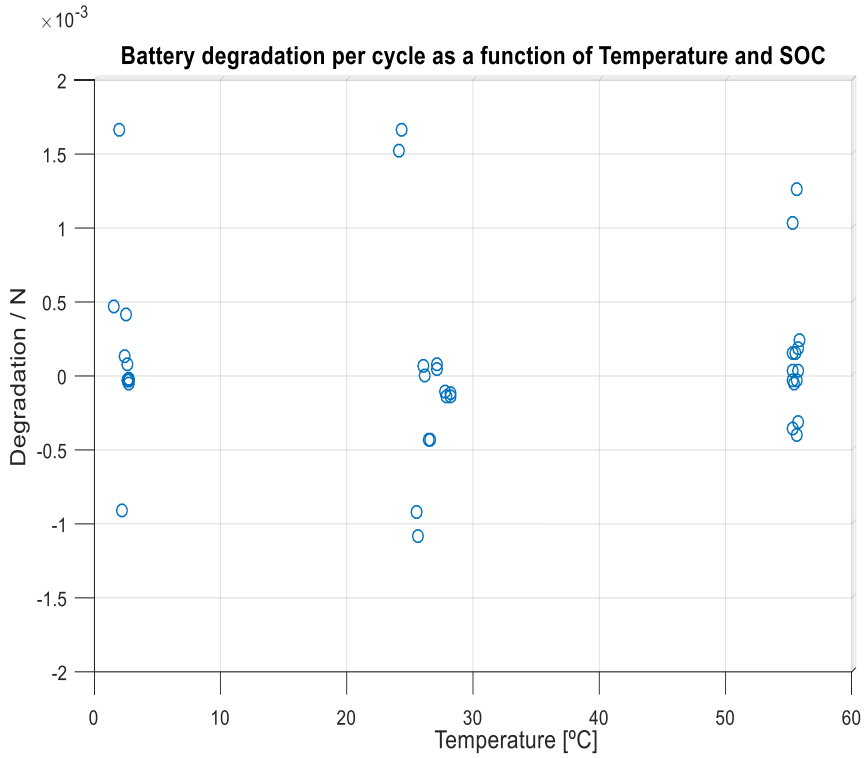

Fig. 61 Representación en 2D de la degradación de la batería por ciclo en función de la temperatura

Resultados Optimización GAMS

Escenario 1

Periodo 15 min	Hora [hh:mm]	SOC [kWh]	SOC [%]
1	20:00	10,00	33,33
2	20:15	14,22	47,40
3	20:30	14,22	47,40
4	20:45	14,22	47,40
5	21:00	14,22	47,40
6	21:15	14,22	47,40
7	21:30	14,22	47,40
8	21:45	14,22	47,40
9	22:00	14,22	47,40
10	22:15	14,22	47,40
11	22:30	14,22	47,40
12	22:45	14,22	47,40
13	23:00	14,22	47,40
14	23:15	14,22	47,40
15	23:30	14,22	47,40
16	23:45	14,22	47,40
17	0:00	14,22	47,40
18	0:15	14,22	47,40
19	0:30	14,22	47,40
20	0:45	14,22	47,40
21	1:00	18,49	61,62
22	1:15	18,49	61,62
23	1:30	18,49	61,62
24	1:45	18,49	61,62
25	2:00	18,49	61,62
26	2:15	18,49	61,62
27	2:30	18,49	61,62
28	2:45	18,49	61,62
29	3:00	18,49	61,62
30	3:15	18,49	61,62
31	3:30	18,49	61,62
32	3:45	18,49	61,62
33	4:00	18,49	61,62
34	4:15	18,49	61,62
35	4:30	18,49	61,62
36	4:45	18,49	61,62
37	5:00	18,49	61,62

38	5:15	18,49	61,62
39	5:30	18,49	61,62
40	5:45	18,49	61,62
41	6:00	18,49	61,62
42	6:15	18,49	61,62
43	6:30	18,49	61,62
44	6:45	18,49	61,62
45	7:00	18,49	61,62
46	7:15	18,49	61,62
47	7:30	18,49	61,62
48	7:45	18,49	61,62
49	8:00	25,00	83,33

Tabla 13 SOC óptimo durante la noche del escenario 1

Periodo 15 min	Hora [hh:mm]	Degradación total	Degradación %
1	20:00	0,000422	0,042241
2	20:15	0,000424	0,042361
3	20:30	0,000425	0,042495
4	20:45	0,000426	0,042614
5	21:00	0,000427	0,042734
6	21:15	0,000429	0,042868
7	21:30	0,000430	0,042987
8	21:45	0,000431	0,043107
9	22:00	0,000432	0,043241
10	22:15	0,000434	0,043360
11	22:30	0,000435	0,043479
12	22:45	0,000436	0,043599
13	23:00	0,000437	0,043733
14	23:15	0,000439	0,043852
15	23:30	0,000440	0,043972
16	23:45	0,000441	0,044106
17	0:00	0,000442	0,044225
18	0:15	0,000443	0,044345
19	0:30	0,000445	0,044479
20	0:45	0,000446	0,044598
21	1:00	0,000445	0,044532
22	1:15	0,000445	0,044519
23	1:30	0,000445	0,044505
24	1:45	0,000445	0,044492

25	2:00	0,000445	0,044479
26	2:15	0,000445	0,044465
27	2:30	0,000445	0,044452
28	2:45	0,000444	0,044439
29	3:00	0,000444	0,044425
30	3:15	0,000444	0,044415
31	3:30	0,000444	0,044399
32	3:45	0,000444	0,044386
33	4:00	0,000444	0,044372
34	4:15	0,000444	0,044372
35	4:30	0,000444	0,044372
36	4:45	0,000444	0,044372
37	5:00	0,000444	0,044372
38	5:15	0,000444	0,044372
39	5:30	0,000444	0,044372
40	5:45	0,000444	0,044372
41	6:00	0,000444	0,044372
42	6:15	0,000444	0,044372
43	6:30	0,000444	0,044372
44	6:45	0,000444	0,044372
45	7:00	0,000444	0,044372
46	7:15	0,000444	0,044372
47	7:30	0,000444	0,044372
48	7:45	0,000444	0,044372
49	8:00	0,000684	0,068429

Tabla 14 Degradación durante la noche del escenario 1

ANEXO II

Terminología

- *Celda:* Una batería consiste en un conjunto de celdas; las cuales pueden ser conectadas en serie o en paralelo. [18]
- *Capacidad:* Cantidad de energía eléctrica, medida en Amperios-Hora [Ah], que una batería es capaz de almacenar.[18]
- *Capacidad nominal:* Es la energía correspondiente a la capacidad estimada por el fabricante, medida en Ah durante una hora de descarga a 30ºC. [8]
- *Ciclo:* Es la descarga de la batería seguida de la carga hasta l total recuperación de la energía sustraída. [8]
- *Capacidad estática:* Es la capacidad total de la celda en un instante de tiempo determinado. Es también conocida como Estado de Salud o State of Health, que es de donde viene la terminación que se usará en adelante SOH. [8]

  Para medir la capacidad estática, la celda de la batería es sometida a un procedimiento que no se describe en este documento. Es medida en Ah y se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_t = \int_0^{descarga\ completa} I(t)\, dt \quad (ec.\ 27)$$

- *Estado de carga (SOC) [%]:* Expresión que indica la capacidad actual de la batería en forma de porcentaje relativo a la capacidad total de la batería. [18]
- *Depth-of-Discharge:* This is the percentage of the static capacity that is consumed by a discharge or added by a charge.[8]
- *Profundidad de descarga (Depth of discharge,DOD)[%]:* Relación entre la capacidad en Ah suministrada por la batería durante la descarga y capacidad nominal [18]. Es decir, el porcentaje de la capacidad estática consumida o añadida a la carga respecto a la capacidad nominal [8].
- *Capacidad perdida [%]:* Es la pérdida permanente de la capacidad de una celda de la batería debido a la degradación de ella. Esta pérdida se mide con la siguiente ecuación:

$$Capacidad\ perdida_t = 100 \cdot (1 - \frac{Q_t}{Q_0}) \quad (ec.\ 28)$$

  Donde Q_O es la capacidad estática inicial, y Q_t es la capacidad estática en el instante t. [8]
- *Final de vida (EOL):* Es el momento en el que la capacidad perdida de la celda alcanza el 80%. En otras palabras, el momento en el que la capacidad estática es igual al 20% de la capacidad estática inicial de la celda. [8]
- *Vida de la batería:* Tiempo que tarda la batería desde su primer uso hasta que alcanza el EOL. Normalmente la vida de la batería es medida con el número de ciclos completados trabajando en ciertas condiciones. [18]

- ***Resistencia interna (Ri):*** Es uno de los parámetros claves que determina el estado actual de los sistemas electromecánicos de almacenamiento. Es crucial para determinar factores como el estado de salud de la batería [29]. En la mayoría de baterías, este parámetro incluye la Resistencia óhmica, la cual es la causante de la variación instantánea de tensión con el cambio de corriente, y la resistencia de polarización, que desemboca en una variación gradual de la tensión cuando la corriente cambia. Normalmente, el último tipo de Resistencia no se tiene en cuenta en los modelos de batería simples, ya que solo incluyen la Fuente de tensión y la resistencia óhmica. Sin embargo, en los modelos donde la Resistencia de polarización es incluida, es modelada como un Sistema RC como se puede observar en la figura 1. [30]

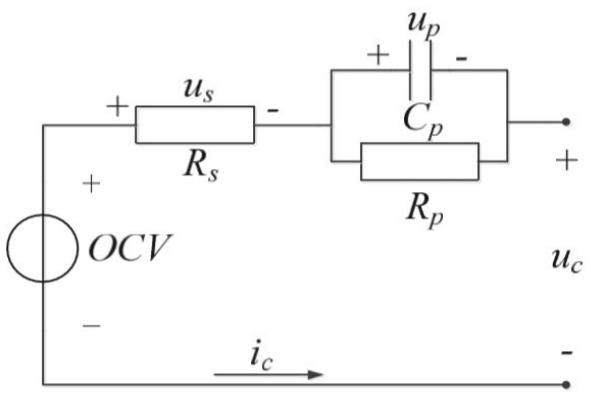

Figura 62. Modelo Thévenin equivalente para una batería [18]

Es imposible medir directamente la resistencia interna de una batería [18]. Pero podemos obtener su valor a partir de las corrientes y tensiones medidas:

$$R_i = \left(\frac{V_{sincarga} - V_{carga}}{I}\right) (ec.\,29) \qquad R_i = \left(\frac{V_{sincarga}}{I}\right) - R_{carga} (ec.\,30)$$

Donde **I** es la corriente suministrada por la batería a la carga.

- ***Degradación:*** Es la diferencia entre el SOH actual y el SOH inicial de la batería, todo ello dividido por la capacidad estática que tendría en el EOL. Se entiende como la degradación sufrida por la batería, dada como una fracción de la capacidad que ha perdido l celda relativa al final de vida o EOL. Puede ser expresada con la siguiente ecuación:

$$Degradación = \frac{Q_t - Q_0}{Q_0 - 0.8 \cdot Q_o} (ec.\,31) \quad [8]$$

Donde Q_O es la capacidad estática inicial, y Q_t es la capacidad estática en el instante t.

- ***Ah_rendimiento:*** Es la cantidad de energía que la batería ha suministrado en un rango de tiempo entre t_1 y t_2. Puede ser expresado de la siguiente forma:

$$Ah_rendimiento(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} abs\big(I(t)\big)dt (ec.\,32) \quad [8]$$

- *Auto-descarga:* Pérdida de capacidad cuando la batería no se encuentra conectada.[18]
- Energía específica [Wh/kg]: Energía que puede ser almacenada por unida de peso.*[18]*
- *Potencia específica [W/kg]:* Potencia que puede ser almacenada por unidad de peso de la batería. [18]
- *Densidad energética [Wh/l]:* Energía almacenada por unida de volumen. [18]
- *Densidad de potencia [W/l]:* Potencia almacenada por unida de volumen. [18]
- *Eficiencia [%]:* Es la relación entre la energía suministrada por la energía y la energía necesaria para volver a recargarla. [18]

ANEXO III

Estado del Arte

1. Dispositivos de almacenamiento de energía

En general, las baterías se pueden clasificar en dos tipos: primarias y secundarias. Las baterías primarias son aquellas que una vez suministrada la energía eléctrica como resultado de la reacción química interna, éstas no se pueden volver a cargas y por tanto resultan desechables [17]. Por el contrario, las baterías secundarias son capaces de recargarse tantas veces como permita su vida útil [2]. Nos centraremos en las baterías secundarias y por ello las baterías primarias no serán descritas.

1.1 Baterías Secundarias:

Se pueden cargar para volver a utilizarlas y por tanto son las que podemos utilizar en los vehículos eléctricos. Este tipo de baterías son utilizadas en el mercado en dispositivos en los que son siguientes requisitos tienen importancia:

- Son usadas principalmente como fuente de energía de dispositivos en los que se necesiten numerosos ciclos de carga y descarga, como pueden ser las sillas de ruedas o por ejemplo los teléfonos móviles.
- Están diseñadas para aportar tanto largos o cortos periodos de potencia, como puede ser, el tiempo de conducción de un coche eléctrico o por el contrario el chispazo que se produce para arrancar los motores de combustible.
- En casos en los que se requiera energía de un momento a otro. Las baterías al estar siempre conectadas, en cualquier momento son capaces de suministrar la energía necesaria. Son casos como en los ordenadores o luces de emergencia.
- Dispositivos en los que la descarga sea muy lenta pero después se puedan recargar, como pueden ser las boyas marinas o los faros.

A continuación se muestra una tabla con los principales tipos de baterías secundarias y sus características más destacadas:

Tipo batería	Pb-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Tensión nominal[V]	2V	1.25	1.25	3.6
Energía específica [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	110-160
Potencia específica[W/kg]	180	150	250-1000	1800
Tolerancia a la sobrecarga	Alta	Media	Baja	Muy baja
Autoconsumo	Bajo	Medio	Alto	Muy bajo
Rango de temperatura[ºC]	[-20, 60]	[-40, 60]	[-20, 60]	[-20, 60]
Ciclos	200-300	1500	300-500	500-1000
Ventajas[19]	• Facilidad de fabricación	• Muchos ciclos	• Poco contaminante	• Carga rápida

	• Bajo coste • Baja autoconsumo • Alta potencia específica	• Carga ultra-rápida • Buen rendimiento • Es la mejor en relación precio-ciclo	• Es posible reciclarla • Mayor capacidad que la NiCd	• Capacidad para grandes cargas • Larga vida • Buena eficiencia • Bajo autoconsumo
Limitaciones[19]	• Recarga lenta (14-16 horas) • Alta toxicidad • Pocos ciclos. • Baja energía específica	• Baja energía específica • Efecto memoria • El cadmio es muy tóxico • Alto autoconsumo	• Complejo algoritmo para la recarga • No absorbe bien las sobrecargas • Alto autoconsumo	• Requiere circuito para limitar la tensión y corriente • Degradación a altas temperaturas • Coste alto

Tabla 15. Características baterías secundarias [19]

1.1.1 Baterías de Plomo-ácido (PbA):

Inventadas por el físico francés Gaston Planté en 1859, fueron las primeras baterías utilizadas para el uso comercial [19]. A pesar de esta antigüedad, este tipo de baterías se ha seguido utilizando hasta día de hoy constituyendo una parte importante del mercado mundial debido a que son ideales para el arranque de motores de combustión [18].

Para controlar la seguridad de este tipo de baterías, se consiguió en la época de los 70 el sellado total, lo que permitía trabajar en situaciones de carga intensa y rápida descarga. Lo que provoca que no hubiera ningún vertido de ácido a la hora de volcar la batería y permite que pueda trabajar en cualquier orientación física sin vertido [19].

Dentro de este tipo de baterías podemos encontrar las baterías de gel o también conocidas en inglés como “absorbent glass mat” (AGM) o también baterías de plomo-ácido de válvula regulada. Las cuales se aventajan de las comunes en una carga más rápida y poder administrar altas corrientes demandadas [19].

Ventajas

- Tensión alta por celda, lo que disminuye el tamaño de la batería para una tensión concreta [18].
- Capacidad de suministrar picos de intensidad altos durante la descarga, esta es la característica que más destaca de este tipo de baterías [19].
- Bajo autoconsumo [18].
- Facilidad de fabricación, debido a que la tecnología está muy desarrollada [19].
- Alta potencia específica [19].

Desventajas

- Elevado peso, por el plomo de la batería [18].
- Baja energía específica, (menor de 30-50 Wh/kg). No son suficientemente grandes para mover un vehículo.
- Vida útil reducida (500-600 ciclos) [18].
- Carga lenta, aproximadamente 14-16 horas [19].
- No se considera muy ecológica [19], aunque es fácil de reciclar [18].

1.1.2 Baterías de plomo-ácido de válvula regulada.

En inglés denominada como "Valve-regulated Lead Acid", representan una innovación dentro de las baterías de tipo plomo-ácido. Una de las principales ventajas que tienen este tipo de baterías respecto de las tradicionales es que las necesidades de mantenimiento se reducen ya que deja escapar los gases generados por las reacciones debidas a la sobrecarga, cuando el 100% de SOC está a punto de alcanzarse. De esta manera no se pierde el electrólito en forma de gases [18].

1.1.3 Baterías AGM

Denominadas en inglés "Absorbent Glass Mat" (AGM), se trata de una tecnología que reduce el peso e incrementa la seguridad de la batería. El ácido sulfúrico que contiene la batería es absorbido por una fina fibra de vidrio, haciendo este tipo de baterías a prueba de derrames.

Ventajas

- Carga 5 veces más rápida que las baterías de ácido tradicionales [19].
- Resistencia a derrames [19].
- Resistencia a vibraciones debido a la construcción en forma de sándwich.

Desventajas

- Coste de fabricación más alto.
- Sensible a sobrecargas [19].
- Baja energía específica [19].

1.1.4 Baterías Níquel-Cadmio (NiCd)

Inventadas en 1899 por Waldemar Jugner [19], las baterías de Níquel-Cadmio ofrecían varias ventajas sobre las baterías de plomo-ácido, las únicas existentes hasta esa fecha [19]. Aunque tanto los componentes como la fabricación de este tipo de baterías resultaban de un coste alto.

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrolito de hidróxido de potasio [18]. Durante muchos años este tipo de baterías fue elegido y utilizado para equipamiento médico o cámaras de video profesionales [19].

Entre algunos de los inconvenientes de estas baterías cabe destacar el efecto memoria. Se denomina así al hecho de que las celdas se comporten como si tuvieran menor capacidad de la que en realidad tienen, esto ocurre cuando no son descargadas completamente antes de volver a recargarlas, es decir, si no se da un ciclo de descarga completa periódica [19].

Ventajas

- Gran cantidad de ciclos de vida si se lleva un mantenimiento adecuado [19]. Superior a 1500 ciclos [18].
- El único tipo de baterías que se pueden cargar de una manera ultra-rápida sometiéndose a poco daño [19].
- Buen funcionamiento en un amplio rango de temperaturas (-40 - 60ºC) [18].
- Las baterías NiCd son las que tienen un menor coste por ciclo [19].

Desventajas

- Efecto memoria muy alto
- Baja energía específica comparada con nuevos sistemas de almacenamiento [19].
- El cadmio es un metal muy tóxico y no puede ser depositado en vertederos [19].
- En muchos países desarrollados ya no se fabrican [18].
- Valor de tensión nominal bajo (1,2 V por celda) [18].
- Alta auto-descarga [19].

1.1.5 Baterías de Níquel-Zinc (NiZn)

Estas baterías son muy similares a las NiCd, con la diferencia de la tensión, ya que las baterías NiZn son capaces de aportar 1,65 V por celda en vez de los 1,2 V de las NiCd [19].

Las baterías NiZn se cargan a una tensión constante de 1,9V/celda. La energía específica es de 100Wh/kg y puede llegar hasta 200-300 cilos, lo cual significa una reducción en la cantidad de ciclos de vida.

La mayor ventaja de estas baterías es que son poco contaminantes y son fácilmente reciclables [19].

Las características que hacen de este tipo de baterías dispositivos de almacenamiento atractivos es el bajo coste, alta potencia de salida y buen funcionamiento en un amplio rango de temperaturas [19].

Este tipo de baterías se puede encontrar en una amplia gama de productos como pueden ser desde herramientas eléctricas inalámbricas hasta los coches eléctricos ligeros, pasando por las bicis eléctricas e incluso las cámaras fotográficas.

1.1.6 Baterías de Níquel metal hidruro (NiMH)

Desde el año 1967 se comenzó a investigar con este tipo de baterías, sin embargo, la inestabilidad con el metal-hidruro dejo el desarrollo de estas baterías pausado [19]. Finalmente, las baterías de Níquel-hidruro metálico fueron introducidas comercialmente en la última década del siglo XX [18].

La principal diferencia con las baterías de NiCd es que eliminan el cadmio de la batería y se implemente un ánodo de hidróxido de níquel y el cátodo de una aleación de hidruro metálico. Con este cambio se consigue un aumento en la capacidad, una disminución del peso y un menor efecto memoria [18].

Las celdas de estas baterías son de 1,2V al igual que las de NiCd y tienen aproximadamente una capacidad de 2,7 Ah de capacidad [19].

Estas baterías tienen una auto-descarga bastante importante, por lo que generalmente son usadas en productos en los que se vayan a estar utilizando continuamente.

Actualmente la mayoría de bicicletas eléctricas de alta gama está empleando este tipo de baterías.

Ventajas

- Capacidad un 30-40% mayor que las baterías de tipo Níquel-Cadmio estándar [19].
- Efecto memoria reducido [19].
- Mucho menos tóxica y ecológica ya que contiene menos materiales tóxicos por estar libre de Cadmio [18].
- Fácil reciclado [19].
- Amplio rango de temperaturas de funcionamiento.
- Seguras [18].

Desventajas

- Alta auto-descarga, entre un 15 y 20% por mes [18].
- Las descargas profundas reducen la vida útil [19].
- Requiere un algoritmo de carga complejo [19].
- Sensible a la sobrecarga [19].
- Tiempos de carga superiores a los de las baterías NiCd [18].

1.1.7 Baterías de Litio-ion (Li-ion)

Este tipo de baterías es actualmente las más utilizadas en el mundo, desde los teléfonos móviles hasta los vehículos eléctricos. Por este motivo van a ser las que se va a tratar de explicar con mayor detalle.

El litio es uno de los metales más ligeros que podemos encontrar, tiene el mejor potencial electromecánico y aporta una gran cantidad de energía específica por peso.

Al principio, estas baterías recargables poseían el ánodo de Litio-Metal, las cuales pueden aportar extraordinariamente alta densidad de energía. Sin embargo, cada vez que se descargan se depositan residuos en el ánodo. Este crecimiento de partículas provoca cortocircuitos que hacen que la temperatura de la batería incremente rápidamente y se consigue incluso llegar a la temperatura que derrite el litio provocando un escape térmico que se conoce con el nombre de “venting with flame”, es decir la batería es prendida en llamas. Por tanto se consideran bastante inestables, especialmente durante el proceso de carga.

Esta inestabilidad provocó el desarrollo de las baterías compuestas de Litio-ion ya que, a pesar de poseen menor densidad energética que las de Litio-metal, son mucho más seguras. En 1991 la compañía japonesa Sony comercializó la primera batería Litio-Ion, y hasta el día de hoy es la más usada en el mercado, aunque se sigue investigando en las baterías de Litio-Metal para poder hacerlas más seguras.

Ventajas:

- Alta energía específica debido a su alto voltaje por celda, 3.6V
- Alta densidad energética
- Recarga rápida
- Soporta altas cargas, por tanto es posible utilizarlas en coches eléctricos
- No mantenimiento
- Ciclos de descarga largos

- Gran vida útil
- Buena eficiencia
- Muy poca auto-descarga

Desventajas:

- A altas temperaturas y cuando se cargan a alto voltaje se degradan las celdas
- A temperaturas bajo 0°C se cargan lentamente
- Precio más elevado que las baterías de níquel
- Necesitan limitaciones del voltaje y corriente para evitar que ardan.

Hay varios tipos de baterías Litio-ion y se diferencian por sus materiales activos. Para distinguirlas por su nombre, las palabras se escriben ya sea en su totalidad o acortándose mediante los símbolos químicos de estos componentes activos [19]. Por ejemplo, el óxido de cobalto de litio, uno de las baterías Li-ion más comunes, tiene el símbolo químico $LiCoO_2$ y LCO como abreviatura. Por razones de simplicidad, la forma Li-cobalto también se podría utilizar. En ese caso, el cobalto es el material principal activo que le da a esta batería su nombre [19]. A continuación se describen las principales químicas que se utilizan es estas baterías Li-ion.

1.1.8 Tipos de baterías Litio-ion:

Litio-Oxido de Cobalto ($LiCoO_2$):

- Muy alta energía específica
- Potencia específica limitada
- El cobalto es bastante caro
- Utilizada en móviles, tablets, ordenadores portátiles y cámaras.
- Bastante extendida en el mercado

Litio-Óxido de manganeso ($LiMn_2O_4$):

- Gran potencia
- Poca capacidad
- Más segura que la anterior
- Utilizada en dispositivos médicos, herramientas potentes y en motores eléctricos.

Litio - Óxido de níquel manganeso y cobalto ($LiNiMnCoO_2$ o NMC):

- Gran capacidad
- Alta potencia
- Cada vez están más presentes en el mercado
- Utilizadas en las bicicletas eléctricas, vehículos eléctricos y en procesos industriales.

Litio-Fosfato de hierro ($LiFePO_4$):

- Una de las baterías más seguras de Li-ion.
- Autodescarga demasiado alta
- Poca capacidad
- Utilizada en aplicaciones en las que se necesite gran intensidad y resistencia

Litio-Óxido de níquel cobalto y aluminio ($LiNiCoAlO_2$):

- Comparte características con las baterías de Litio-Cobalto
- Tesla las está utilizando en algunos de sus modelos de coches eléctricos
- Utilizado también en servicios médicos y en procesos industriales

Litio-Titanio ($Li_4Ti_5O_{12}$):

- Larga vida útil
- Recarga rápida
- Puede trabajar en un amplio rango de temperaturas
- Baja energía específica
- Muy caras
- Las baterías más seguras entre las Li-ion.

1.1.9 Baterías Litio-ion polímero (LiPo)

La primera batería de polímero data de los años 70 y se utilizó un polímero sólido que se parecía a una capa de plástico. Este aislante, permite el intercambio de iones y remplaza el tradicional separador poroso que se mojaba con el electrolito [19].

Las baterías Litio-ion polímero (LiPo), son muy utilizadas en el mundo de la energía portátil, debido a su alta densidad de carga, permitiendo la expansión y el desarrollo de las tecnologías móviles [34]. Parecen destinadas a formar la siguiente generación de baterías, por s alta densidad energética, alto número de ciclos de vida, su flexibilidad y seguridad [35].

Estas baterías se diferencian de otro tipo de sistemas de almacenamiento de energía, en el electrolito utilizado [19].

Las celdas de polímero de litio, utilizan una bolsa flexible de aluminio en lugar de fundas rígidas, por lo que se reduce el peso y el tamaño de cada celda, llegando a ser un 20% más ligera que el equivalente a pila cilíndrica.

Ventajas [36-37]

- Pueden tener espesores muy pequeños de hasta 1 milímetro.
- Muy versátil para empaquetar de diferentes formas.
- Alta densidad energética.
- Poco peso.
- Sin efecto memoria.
- Baja auto-descarga.

Desventajas [36-37]

- Requiere circuito de seguridad para mantener los límites del voltaje.
- Limitaciones de las compañías aéreas para su transporte.
- Tecnología en desarrollo.
- Si se perforan explotan.

2. Estrategias de carga

Los vehículos eléctricos están surgiendo como una alternativa eficiente y sostenible del transporte tanto público como privado en la carretera. Desde el punto de vista de la red eléctrica, actualmente los vehículos eléctricos están considerados como simples cargas que sólo consumen potencia, esto es debido a la poca importancia que tiene la conexión de los vehículos a la red. Sin embargo, al estar aumentando esta cantidad de vehículos, la implementación de un sistema de gestión inteligente sería necesario para evitar los gastos de reforzar la red y los efectos negativos que se podrían producir como las desviaciones de tensión, saturaciones de transformadores y líneas, el incremento de pérdidas, etc. [21]. Estos efectos negativos perjudicarían la confianza y la seguridad de la red eléctrica.

El aumento de los vehículos eléctricos también promueve el desarrollo de la conexión de los vehículos a la red distribuida para poder poner a disposición de la red la energía de las baterías. Este concepto es denominado como Vehicle-to-Grid (V2G) y también causaría un gran impacto en la red.

Por este motivo, muchas investigaciones se han llevado a cabo para diseñar y proponer diferentes soluciones para estrategias de conexión de los vehículos eléctricos a la red. En el documento de la Ref. 21 se ha encontrado una representación de la mayoría de las diferentes estrategias, algoritmos y sistemas de control de carga inteligente que se pueden encontrar hoy en día.

2.1 Tipos de carga dependiendo de la potencia.

Carga lenta

Se necesita un enchufe, que aunque suele variar de país a país, es estándar. En Europa, a potencia suele ser de 3.7 KW (230V y 16A) [21].

Carga rápida

No es el enchufe estándar el que se utiliza, pero el tipo de enchufe que es capaz de dar esta potencia se puede encontrar en áreas residenciales o en zonas comerciales. A este tipo de enchufes le llega una conexión trifásica y la potencia que pueden aportar es de entre 10 y 20kW [21].

Carga ultra-rápida

Se necesitan cargadores externos para poder suministrar la potencia. El tamaño de estos cargadores es muy grande debido a su necesidad de refrigeración. La potencia que puede llegar a aportar es de 50kW o más. Este tipo de carga puede ser utilizado con una conexión trifásica o de corriente continua. Se utiliza para ahorrar mucho tiempo a conductores o en casos de emergencias [21].

2.2 Estrategias de carga de vehículos

Según la Ref. 22 se estima que la demanda de energía de 30 millones de vehículos eléctricos podría requerir 10 TWh por día y una potencia adicional de 35GW.

Las estrategias de carga permiten tanto a los consumidores como a la gestión de la red acordar un horario de carga para obtener tanto beneficios económicos como técnicos. La carga inteligente es capaz de controlar mediante algoritmos que optimizan la carga para conseguir diferentes objetivos como evitar la saturación de los transformadores y las líneas, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar los costes de generación, etc.

Existen dos modos de operación entre la red y el vehículo dependiendo de la dirección en la que circule la energía. El modo de carga es cuando la dirección es desde la red al vehículo y por el contrario el modo descarga es desde el vehículo a la red, o como se denomina en inglés Vehicle-to-Grid (V2G). El método V2G se puede considerar como una función añadida de la carga inteligente, ya que permite inyectar energía a la red actuando el vehículo como generador o sistema de almacenamiento [23]. Esta consideración es posible gracias a la estimación de que un vehículo eléctrico suele estar aparcado el 96% del tiempo [24].

El uso de la conexión V2G pueden ser por ejemplo los servicios auxiliares, como son el control de frecuencia o balance de carga, proporcionar a la red la energía necesaria cuando hay poca demanda o reducir el pico de demanda energética. Además se puede considerar una herramienta excelente para corregir las intermitentes generaciones de energía causadas por los recursos eólicos o solares [25-28]. Sin embargo, el mayor inconveniente de utilizar la conexión V2G es la degradación prematura de la batería del vehículo [21]. Por tanto, si se desea que este tipo de conexión tenga futuro, se debe encontrar una forma de minimizar esa degradación.

Para intentar gestionar algunas estrategias de carga surge la figura denominada como distribuidor, o tal y como se ha encontrado en varios documentos en inglés “aggregator” [27]. El cual tiene la función de recoger la energía que viene de la red y de los vehículos y gestionarla o distribuirla o a la red o a los vehículos.

A continuación se describen las diferentes estrategias de carga presentadas en la Ref. 21:

2.3 Arquitectura de control centralizada

La arquitectura de control centralizado, también conocida como control directo, deja al distribuidor como total responsable de administrar la carga de todos los vehículos eléctricos en su región de control. El control que tiene el distribuidor engloba tanto a vehículos particulares como a estaciones de carga de varios vehículos.

El distribuidor también es responsable de la participación de los vehículos en el mercado eléctrico, de manera que debe actuar en función de los datos pasados, de las preferencias de los consumidores, etc. Para realizar el control de esta gestión aparece la figura del operador del sistema de distribución (OSD), el cual se responsabiliza de la seguridad de la red en las operaciones que realiza el distribuidor. Después de la aprobación del OSD, el distribuidor negocia el precio de mercado y después el operador del sistema de transmisión (OST) evaluará y cambiará el perfil de demanda en caso de que existiera algún problema para la red.

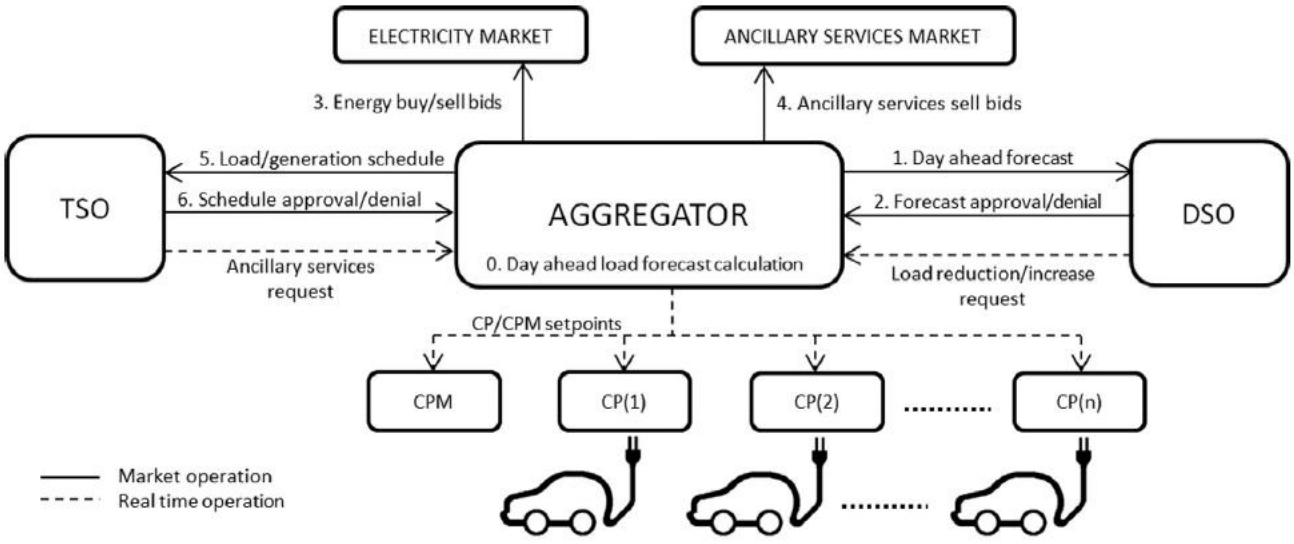

Fig 63. Representación esquemática de un control centralizado [21]

En el siguiente esquema se representa la información intercambiada entre el vehículo y el distribuidor a través de los puntos de carga:

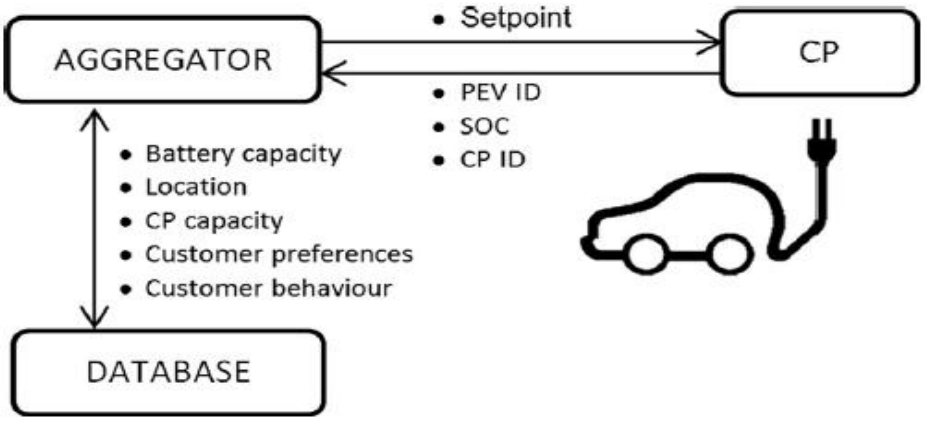

Fig 64 Esquema información requerida por el distribuidor [21]

Podemos observar que para que el distribuidor pueda gestionar de una manera correcta y óptima la carga del vehículo debe tener en cuenta en una base de datos diferentes parámetros como la capacidad total de la batería, la localización o los hábitos y preferencias del usuario. De manera que una vez se conecte el vehículo sólo envía tanto su identificación como la del punto de carga y el estado de carga que tiene en ese momento.

Los objetivos de las estrategias de control pueden ser muy variados y las herramientas o métodos para optimizar ese objetivo también. En la Ref. 21 podemos encontrar una tabla con todas las referencias en las que se estudian los diferentes objetivos que se nombran a continuación:

- Regulación de frecuencia
- Regulación de tensión
- Minimización de coste de generación
- Reducir el coste de carga
- Maximizar los beneficios del distribuidor
- Reducir pérdidas de potencia
- Evitar problemas de la red de distribución
- Reducir las emisiones de CO_2

2.4 Arquitectura de control descentralizada

También conocida como control indirecto, distribuido o local, se caracteriza porque las decisiones las toma el vehículo eléctrico, es decir, cada propietario. Esto quiere decir que cada vehículo o puesto de carga debe tener cierta inteligencia o autonomía para la toma de decisiones.

La decisión que toma el vehículo es la de cuando y como cargarse. A pesar de ello, está sujeto a unas condiciones que limitan esta autonomía ya que tratan de optimizar estos factores. Los factores que influyen a estas condiciones normalmente son en forma de precios o señales de control que se envían desde el distribuidor.

A la hora participar en el mercado eléctrico, el vehículo también es el que decide cuándo y cómo poner a disposición de la red esa energía. Aunque en este caso se toma continuamente la información del distribuidor en cuanto a precios o señales de control para cambiar los perfiles de carga de los vehículos eléctricos.

Los objetivos que se estudian por la mayoría de documentos que tratan sobre el control descentralizado se centran en minimizar los costes de carga. Esto se debe a que al ser realizado el control por parte del usuario, se busca principalmente el objetivo de reducir el coste económico del vehículo. Incluso hay controles que gestionan la carga de todos los vehículos eléctricos que existan en una comunidad de vecinos o en una empresa y los gestiona para que resulte más económico para todos.

Pero también podemos encontrar diferentes estudios sobre otros objetivos parecidos o similares a los que se plantean anteriormente con el control centralizado.

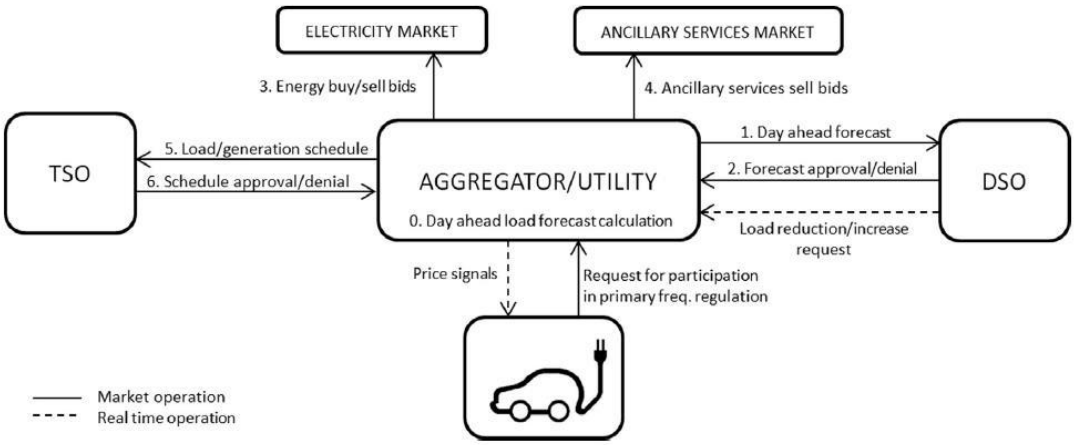

Fig 65 Esquema arquitectura de control descentralizada [21]

El agente, ya sea físico o virtual, que controle la carga del vehículo debe tener las siguientes funcionalidades según la Ref. 28:

- Autonomía: Debe tener capacidad para designar objetivos sin un usuario que lo guíe.
- Sensibilidad: Capacidad de percibir los cambios y responder a ellos.
- Habilidad social: Capacidad de interactuar con otros agentes.
- Actividad: Poder tomar decisiones y llevar a cabo acciones para conseguir los objetivos propuestos

	Ventajas	Desventajas
Control centralizado	• Es conocido • Utiliza mejor la capacidad de la red eléctrica • Mejores servicios auxiliares para regulación	• Infraestructura de comunicación cara y compleja • Necesidad de un controlador • Mayor complejidad cuanto mayor es el número de vehículos conectados • Muchos datos a procesar
Control descentralizado	• Escalable • Decisión de carga del usuario • Mayor aceptación en los usuarios • Menor infraestructura de comunicación	• Servicios auxiliares limitados • Necesidad de predicción del comportamiento de los usuarios • Efectos avalancha por conexiones de usuarios.

Tabla 16 Comparación control centralizado y descentralizado [21]

2.5 Otras estrategias de carga

Con el objetivo de minimizar el gasto económico causado por los coches eléctricos, existen varias estrategias de carga, como puede ser la denominada la carga rápida o la carga inteligente.

La carga rápida se caracteriza porque el vehículo se carga sin utilizar ningún dispositivo que controle los momentos de carga. Se podría decir que es la estrategia de carga más simple, ya que el vehículo comienza su carga cuando se conecta a la red y finaliza cuando la batería está completamente cargada o se desconecta el vehículo de la red eléctrica [3].

Por otro lado, la carga inteligente utiliza un dispositivo que permite controlar el tiempo y la velocidad de carga [3]. Gracias a este control, se pueden programar diferentes

estrategias de carga según el objetivo. Por lo que voy a realizar una tabla con los diferentes tipos de carga inteligente encontrados con sus características:

Tipo de carga inteligente	Descripción	Características
Basada en el precio	Utiliza la información en tiempo real de los precios de la electricidad. Dependiendo de ese precio, se regulará la velocidad de carga de la batería [3]. Cuando el precio sea máximo, la batería no se cargará, y cuando sea mínima se alcanzará la máxima velocidad de carga [3].	• Mayor ahorro económico. • No tiene en cuenta la degradación de la batería • Depende del momento del día en que se cargue será más o menos lenta la carga.
Basada en el SOC	El estado de carga de la batería es lo que determina en este caso la velocidad de carga del vehículo [3]. De esta forma conforme el estado de la batería (SOC) sea mayor la velocidad de carga se irá reduciendo y viceversa. Por tanto, cuando el estado de carga de la batería sea máxima, la batería no se cargará, y cuando sea mínima se alcanzará la máxima velocidad de carga [3].	• Consigue un ahorro económico. • Es una carga progresiva pero constante.
Precio + Degradación	El algoritmo que controla la carga de la batería, trata de optimizar una función que tiene en cuenta tanto el precio a tiempo real de la energía eléctrica como la degradación de la batería [20].	• Menor ahorro que si sólo se basa en el precio. • Mayor cuidado de la batería. • Menor degradación.

Tabla 17. Estrategias de carga de las baterías de los vehículos eléctricos

La carga inteligente en la que se va a centrar este estudio será la que tiene en cuenta el precio y la degradación de la batería. Para tomar la decisión de cómo cargar la batería, el algoritmo utilizado para el control tiene en consideración los costes de la energía eléctrica y la degradación de la batería [20].

El problema de optimización se puede plantear según la ref. [20], obteniendo el mínimo coeficiente de carga de la siguiente forma:

$$\min \sum_{t=1}^{T} \left(p_t \cdot \varphi_t + \varphi_t^2 \cdot \gamma_p + \varphi_t \cdot \gamma_e\right) + K_f \, (ec.\, 33)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$0 \leq SOC_t \leq \overline{SOC} \; (ec.\, 34)$$

$$0 \leq \; \varphi_t \leq z_t \cdot \overline{\varphi_t} (ec.\, 35)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} - d_t + \eta_c \cdot \varphi_t (ec.\, 36)$$

$$SOC_1 = SOC_{inicio} - d_t + \eta_c \cdot \varphi_t (ec.\, 37)$$

$$SOC_T = SOC_{final} (ec.\, 38)$$

Donde p_t es el precio en función del tiempo, φ_t es la velocidad de carga en función del tiempo (kWh), γ_p es el coste de la potencia perdida por la degradación (EUR/kWh2), γ_e es el coste de la energía perdida por la degradación (EUR/kWh) y Kf es el coste del dispositivo de control.

Por otro lado, $\overline{SOC}$es la capacidad total de la batería (kWh), η_c es la eficiencia de carga (%), zt es la posición del vehículo en función del tiempo y dt es la energía consumida en el instante t (kWh).

2.6 Conexión del vehículo a la red o "Vehicle to grid" (V2G).

La idea se basa en conectar el vehículo a la red vendiendo la energía eléctrica y consiguiendo así un ingreso de dinero [20]. Este aporte de energía a la red se realiza en las horas en las que el precio de la energía es alto para conseguir un mayor ingreso de dinero [17]. Visto de otro modo, se puede considerar una reducción en el coste de energía del vehículo.

V2G implica una relación entre el consumidor del vehículo y la organización que controla la red eléctrica. Esta relación se puede considerar como un negocio, es decir el consumidor controla los periodos en los que oferta la energía de su vehículo, mientras que la organización de la red decide cuando necesita comprarla.

Desde el punto de vista del consumidor V2G implica la existencia de diferentes estrategias sobre cuándo ofertar esa energía a la red. Si seguimos la ref. [14], podemos encontrar dos estrategias. La primera llamada "mean strategy" que se basa en la media aritmética de los periodos de oferta que obtuvieron mayor beneficio la semana anterior.

Por otro lado encontramos la denominada “margin strategy”, en la cual se ofrece el precio máximo de salida del mismo intervalo de tiempo de la semana anterior.

Comparando ambas estrategias, se observa que la probabilidad de que se acepte la oferta por la red es mayor con la “mean strategy”, mientras que utilizando “margin strategy” las ofertas que son aceptadas son más altas en precio [14].

Pero desde el punto de vista de la organización de la red, el aporte de energía de las baterías conectadas a la red normalmente es utilizado para la regulación terciaria de frecuencia y potencia [14].

Además de los temas técnicos, también se debe regular un modelo de gestión de todos esos vehículos conectados. Ya que la conexión simultánea de muchos vehículos puede provocar un gran impacto en la red, tanto en términos eléctricos como económicos [13].

En la referencia [13] se proponen dos modelos de gestión de esta conexión. Por un lado encontramos el primero denominado “Retailer-to-CP” en el cual la empresa que controla la electricidad es la que establece el contrato con el propietario de las estaciones de carga, mientras que en la segunda, llamada “Retailer-to-EV”, el contrato se establece directamente con el propietario del vehículo eléctrico.

Si se combina esta estrategia a la carga inteligente elegida anteriormente, se consigue una reducción aún mayor en el coste de carga del vehículo. Para realizar la combinación se podría formular el problema de optimización de la carga inteligente restando las ganancias obtenidas por la venta de la energía al mercado [20].

Desde el punto de vista del consumidor esta combinación permite consumir energía eléctrica cuando los precios son bajos y venderla cuando son altos, suponiendo un ahorro notable en el gasto económico del vehículo.

2.7 Qué es la regulación de frecuencia.

Para poder conseguir una imagen de lo que es la regulación de frecuencia, en primer lugar, se debe describir la estructura de la red eléctrica.

Si comenzamos desde los elementos más grandes físicamente y desde donde comienza todo el proceso, nos encontramos con las grandes centrales de producción de energía eléctrica, ya se trate de centrales hidroeléctricas (con sus empresas de contención y embalses), las centrales que utilizan combustibles fósiles, como el carbón o el gas, para la generación, o centrales nucleares, con sus torres de refrigeración [39].

La tensión de esta electricidad generada, se eleva mediante enormes transformadores a tensiones muy altas, como 440 o 220 kV [39], adecuadas para el transporte ya que las pérdidas son reducidas.

En general, las centrales de generación se encuentran ubicadas muy lejos de los grandes centros de carga como son las ciudades o industrias, por lo que se requiere una buena implementación de la red de transporte [39]. Para ello, se construyen las líneas de alta tensión, con sus gigantes torres y que recorren centenas de kilómetros. Estas líneas son conectadas entre sí en las subestaciones, las cuales se puede considerar que constituyen la columna vertebral del sistema eléctrico [39].

A continuación, nos encontramos con transformadores que reducen los valores de tensión para que se adapten la distribución a otros grandes consumidores o a otras subestaciones que transforman a tensiones menores. Esta reducción de tensión se va

reduciendo progresivamente, dando lugar a una red capilar de tensiones inferiores, que alcanza a todas las instalaciones industriales, comerciales, residenciales o de otro tipo que consumen energía eléctrica.

Finalmente, queda añadir que a estas últimas redes de diferentes tensiones se van añadiendo agentes generadores de menor importancia a nivel de cantidad de energía generada, como son la energía solar o la energía eólica [39].

Una observación que llama la atención es que al tomar medidas de tensión, los valores suelen ser muy estables. Siendo un sistema tan grande, ¿cómo puede mantenerse la estabilidad de la red?

La frecuencia de la tensión debe permanecer dentro de unos límites muy estrictos para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables [40]. Si la frecuencia se aleja del valor nominal, en caso de España 50 Hz, puede hacer que diversos dispositivos industriales o domésticos funcionen mal. Por tanto, se debe tener un control muy estricto de la frecuencia.

La frecuencia de un sistema eléctrico está muy relacionada con el equilibrio entre generación y carga. En régimen permanente, la carga y la generación son prácticamente iguales. Pero si en un momento dado aumenta la carga, es decir la potencia eléctrica demandada en el sistema, la frecuencia eléctrica disminuye progresivamente y viceversa, es decir, si la demanda disminuye de repente, la frecuencia aumenta [40].

Por tanto para mantener la frecuencia en su valor nominal, se debe generar o consumir la diferencia de potencia entre la generación y la demanda.

Actualmente, las transacciones de electricidad en un instante determinado entre áreas quedan programadas con antelación, y cada área debe disponer de las suficientes reservas de energía para hacer frente a sus posibles desequilibrios entre generación y demanda [40].

El control de frecuencia debe conseguir los siguientes objetivos [40]:

- Mantener el equilibrio entre generación y demanda.
- Mantener la frecuencia de referencia en el sistema.
- Cumplir los compromisos de intercambio de energía con las áreas vecinas.
- Mantener la suficiente energía de reserva.

Para cumplir con estos objetivos, el control de frecuencia se organiza en tres niveles [40]:

1. *El control primario*: es el más rápido, operando en un margen de tiempo de entre 2 y 20 segundos. Actúa de forma local en cada generador síncrono, atendiendo a la velocidad de giro del eje.
2. *El control secundario*: opera en un margen de tiempo de entre 20 segundos y 2 minutos. Actúa en el ámbito del área de control, atendiendo a la frecuencia y al intercambio de potencia con las áreas vecinas.
3. *El control terciario*: Opera en un margen de tiempo superior a 10 minutos. Actúa en el ámbito de un sistema eléctrico extenso, buscando un reparto de cargas optimizado que asegure suficientes reservas de energía.

2.9 Red distribuida

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, para mantener la frecuencia en su valor nominal, en caso de España unos 50 Hz, hay que generar o consumir de alguna forma la diferencia de potencia entre la generación y la demanda.

Típicamente, este control de la generación de potencia se realiza de manera que las centrales de generación son las responsables casi totalmente de abastecer esa diferencia de potencia. Con el tiempo, poco a poco se va progresando hacia una distribución de esa responsabilidad. Es decir, la potencia a la red ya no es solamente aportada por las centrales principales de generación, sino que a ella se le unen diferentes recursos de energía a diferentes tensiones, lo que permite una distribución de la potencia que se debe aportar, tanto para la regulación como para cubrir la demanda.

Este tipo de generación puede provenir de diversos recursos, como puede ser la batería de un vehículo eléctrico que se pone a disposición de la red, placas solares de una casa particular que aporta la potencia que le sobra a la red, etc.

También se incluyen en este modelo las fuentes de energía renovable como los campos de aerogeneradores o placas fotovoltaicas, aunque con el crecimiento de su capacidad de generación ya se consideran como generación principal.

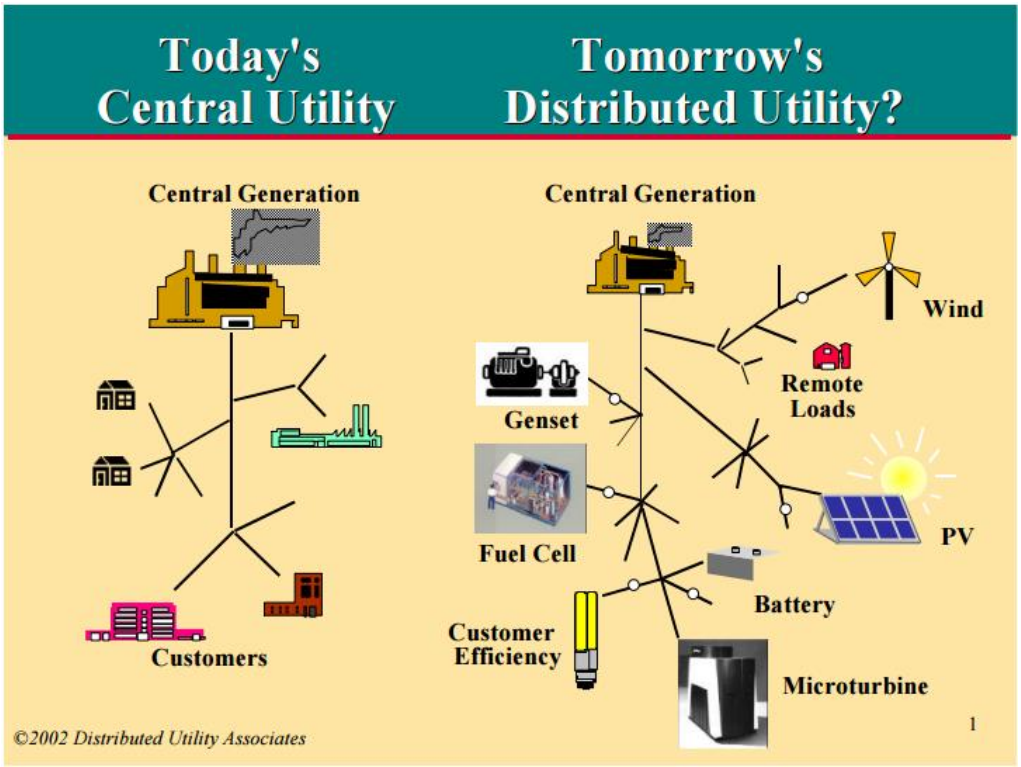

Fig. 66 Comparación entre una red centralizada y una red distribuida

En la última década, el crecimiento de la generación distribuida y la energía renovable conectadas a redes de baja tensión ha sido destacable, principalmente debido a

aspectos medioambientales y comerciales [41]. Por ejemplo, la Unión Europea se ha propuesto como objetivo alcanzar un 20% de recursos renovables para 2020 [42].

Por ahora, la repercusión de los vehículos eléctricos y la distribución de generación no tienen tamaño suficiente para competir con la generación convencional bajo las mismas condiciones de mercado [21]. Una posible solución sería un control inteligente para administrar la participación de estos grupos pequeños. Actualmente hay dos soluciones que integran estos grupos, las plantas de potencia virtuales (VPP) o las microrredes [21].

La primera solución puede ser definida como un modelo que trata de administrar la generación y demanda eléctrica, geográficamente dispersa, como si la planta de potencia virtual fuera una única entidad para el sistema operador [21]. Tiene la ventaja de reducir el riesgo financiero en cuanto a la participación individual de cada generador distribuidor [21].

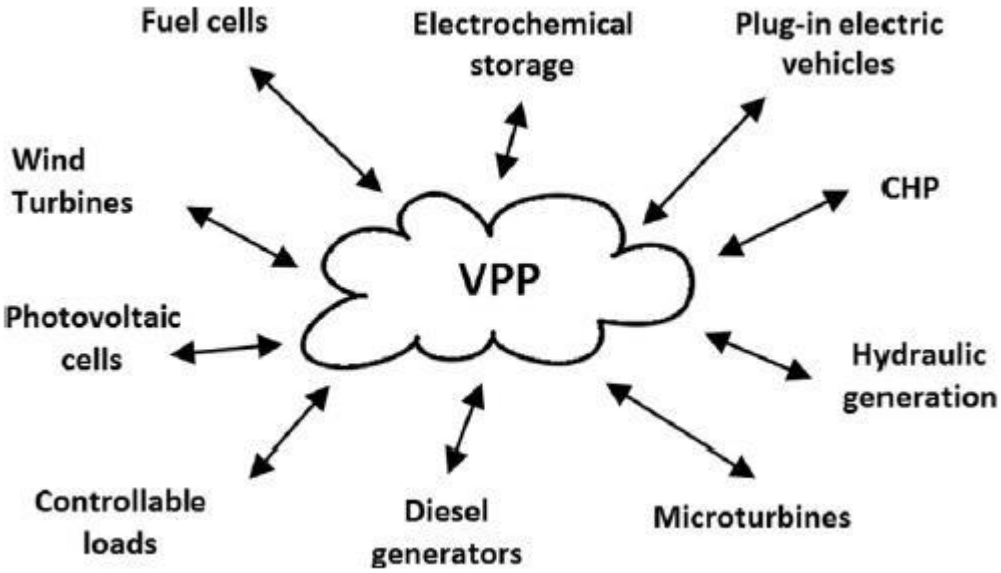

Fig 67. Tecnologías que pueden ser integradas en la planta virtual de potencia [21].

Por otro lado, el concepto de microrred engloba a micro-generadores y dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica que son capaces de trabajar como un único sistema, que provee tanto energía eléctrica como calor [21]. Al contrario que las VPP, los dispositivos que componen la microrred deben estar geográficamente cercanos y pueden operar aislados completamente de la red.

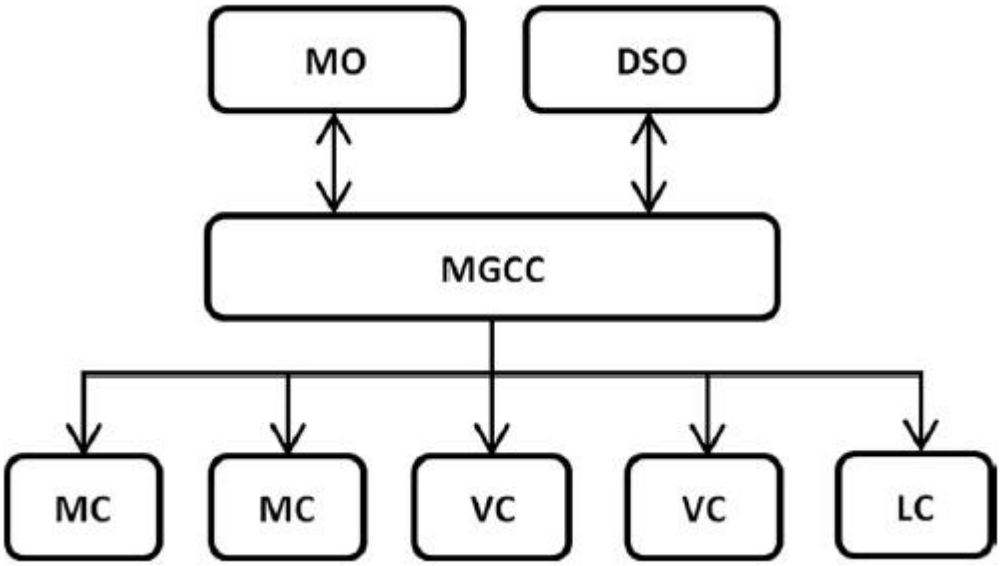

Fig 68. Arquitectura de una microrred con vehículos elétricos [21].

En este esquema se puede observar cómo está distribuida una microrred. El MGCC es el controlador central de la microrred, el MO es el operador con el mercado, VC es denominado el controlador que lleva incorporado el vehículo eléctrico, MC es el controlador de un micro-recurso y LC es el controlador de las cargas [21].

ANEXO IV

Modelos alternativos a optimizar.

Con el objetivo de diseñar un modelo real y práctico de una conexión del vehículo a la red para que sea utilizado para la regulación de frecuencia, en un primer lugar este estudio se ha basó en la Ref. 7. En este documento se muestra en su figura 10 la representación real de una señal de demanda de potencia de la conexión de su vehículo a la red PJM de Estados Unidos. Esta señal de demanda, se cubre con una potencia aportada por el vehículo mediante la conexión Vehicle-to-Grid, lo cual implica que, si la potencia es positiva, la batería se descargará y, si por el contrario es negativa, se cargará, aumentando su SOC.

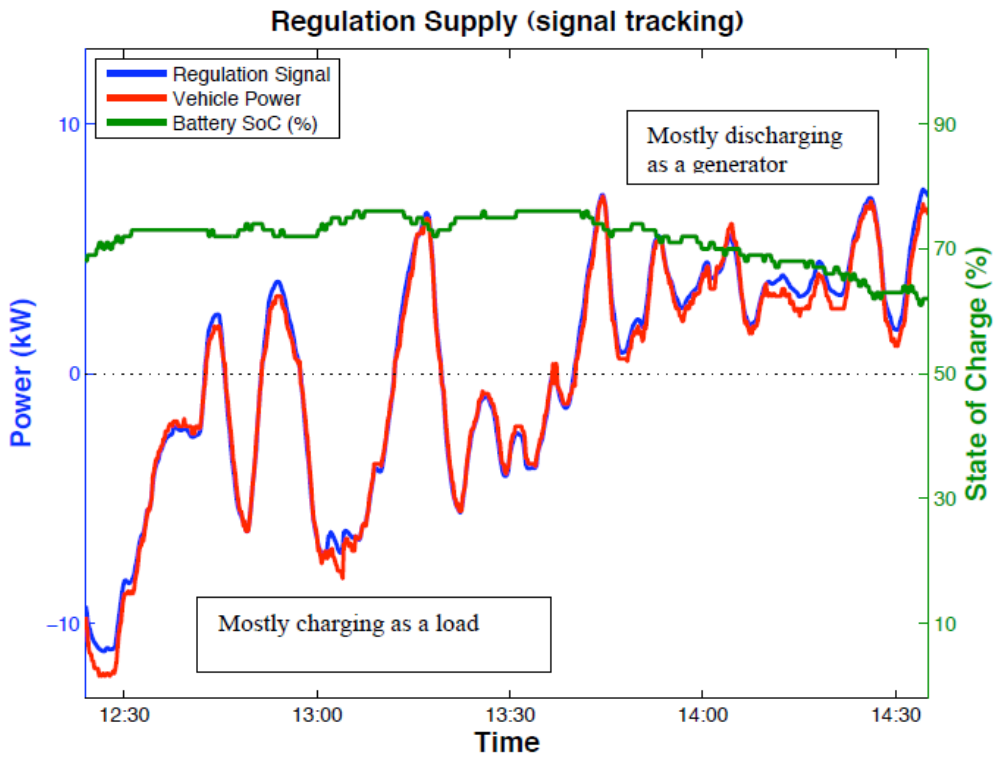

Fig. 65 Representación de la señal obtenida en el experimento de la Ref. 7

En este caso, el servicio de regulación es realizado por el vehículo, es decir, el vehículo trata de responder a la demanda tal y como se puede observar en que la potencia que aporta el vehículo (señal roja) trata de seguir a la potencia demandada por la red, la señal azul. Esta señal es la que representa la demanda que llega de la red PJM, mostrando las fluctuaciones de la regulación escaladas a la capacidad del vehículo, la cual es del valor de 35kWh [7]. Se puede observar también, que el SOC de la batería, representado en verde, varía entre el 60% y el 70%.

Cabe destacar, en este caso, que la electrónica de potencia del vehículo y la batería responden muy bien a la señal de regulación que les llega de la red ya que la señal azul y roja coinciden prácticamente en todo el periodo registrado.

El modelo propuesto de estudio, se realiza desde las 8pm hasta las 8am ya que se estima un periodo en el que normalmente el vehículo se encuentra en casa ya que ha terminado la jornada laboral y por tanto es conectado a su estación de carga hasta que vuelve a comenzar otra jornada laboral.

El problema de haber escogido el perfil representado en el documento de la Ref. 7 sólo muestra dos horas de regulación, pero nuestro perfil debe tener más, por tanto, se ha descartado este modelo.

En segundo lugar se propone basarse en la demanda en tiempo real de la red eléctrica española para detallar el perfil de regulación. El perfil de regulación será el correspondiente a la diferencia de potencia entre la demanda prevista y la real. Por tanto, para analizar y diseñar el perfil de regulación de frecuencia se ha utilizado la representación real de esas dos variables durante el día 27 de mayo de 2016 [33].

El proceso para la obtención de los datos es el siguiente:

1. Basados en los picos que se observan en la gráfica real de la Ref. 7, se realiza la

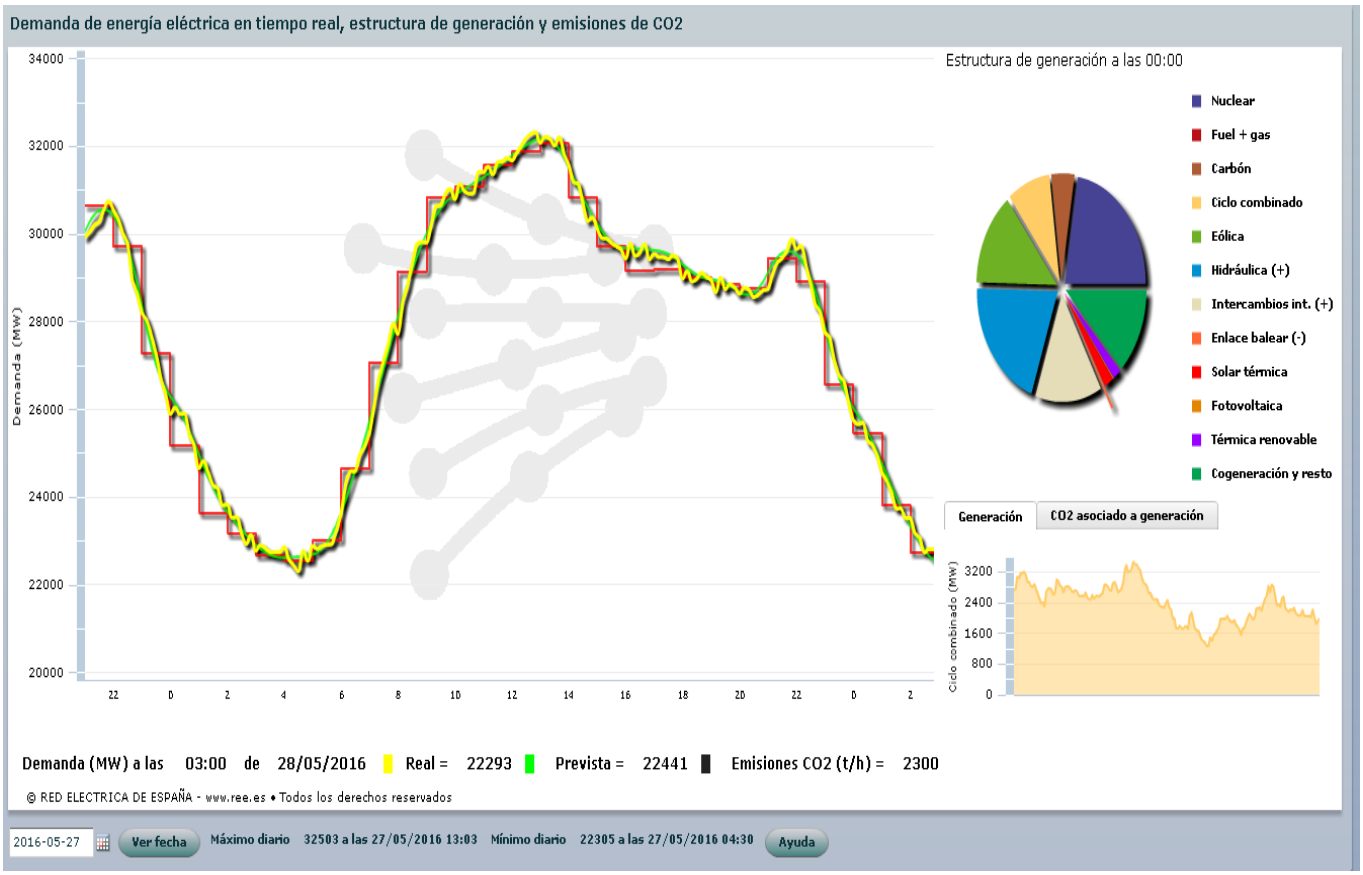

Fig 69. Representación de la demanda eléctrica en tiempo real de la Red Española el día 27/05/2016 [33]

escala de que en los picos mayores se asignará el valor de 10 kW. En los valores en los que la demanda real sea superior a la demanda prevista, la potencia que deberá suministrar el coche será positiva, mientras, si por el contrario la demanda

real se encuentra por debajo de la demanda prevista, la regulación exigirá una potencia negativa.

2. Se analiza la gráfica de un día estándar, como puede ser el 27/06/2016 desde las 8pm del día anterior hasta las 8am de ese día, en el cual no ocurrió ningún evento especial en el que no se pudiera prever la demanda y la regulación por tanto resultó normal.
3. Se adaptan los valores de regulación correspondientes a cada hora según la escala que se ha estimado a partir de los valores de la Ref. 7.

El resultado que se obtiene al realizar las estimaciones de los valores y del análisis de la gráfica es el siguiente:

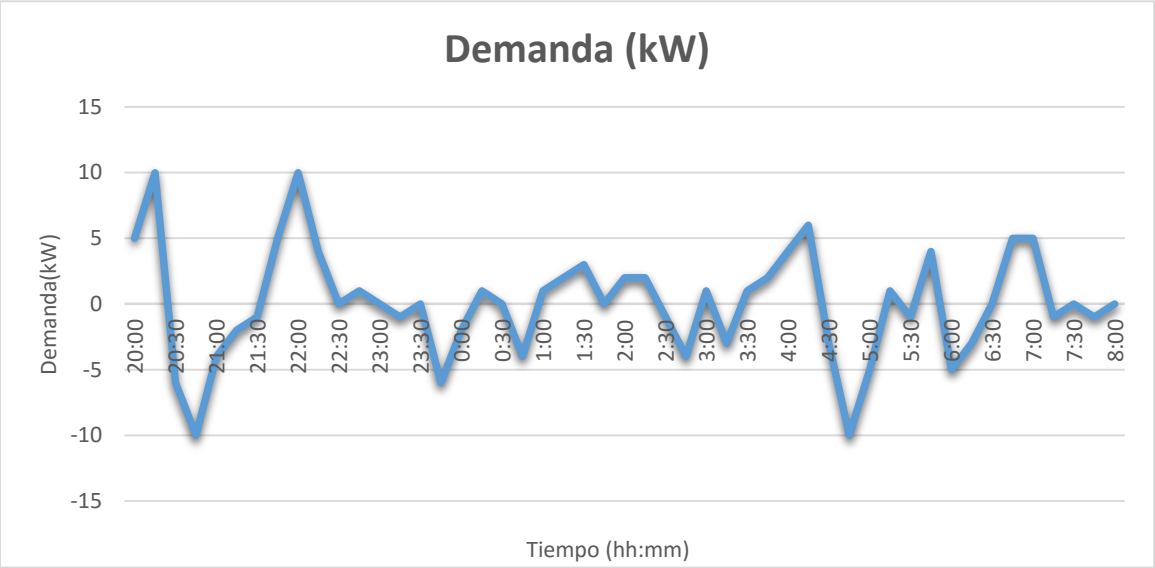

Fig. 70 Representación modelo estimado potencia demandada por la regulación de la red

Se puede observar que los periodos en los que más potencia demanda la regulación en la red eléctrica española corresponden a los espacios de tiempo entre las 20:00 pm y las 22:00 pm que es cuando la gente llega a sus hogares después de la jornada laboral, y luego entre las 4:00am y las 7:00am que es aproximadamente cuando la gente comienza a despertar.

En tercer lugar, se diseñó el escenario 2, con el objetivo de representar una situación en la que le demanda pare durante el periodo de mitad de la noche, es decir, entre las 00:30 y las 5:00. En este caso el perfil que se queda representado es de la siguiente manera:

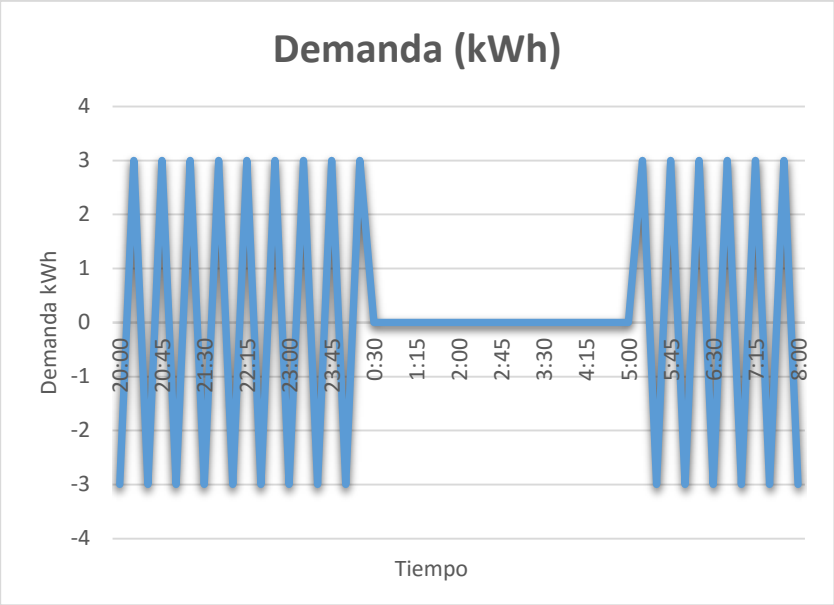

Fig. 71 Representación energía demandada por la red en Escenario 2

En este caso se observa que hay un periodo en el cual no se les exige o demanda energía a las baterías por parte de la red.

El tercer escenario se podría describir como el opuesto al escenario 2, es decir, la energía para la regulación de frecuencia sólo es demandada por la red en mitad de la noche. Tal y como se puede ver en la figura siguiente:

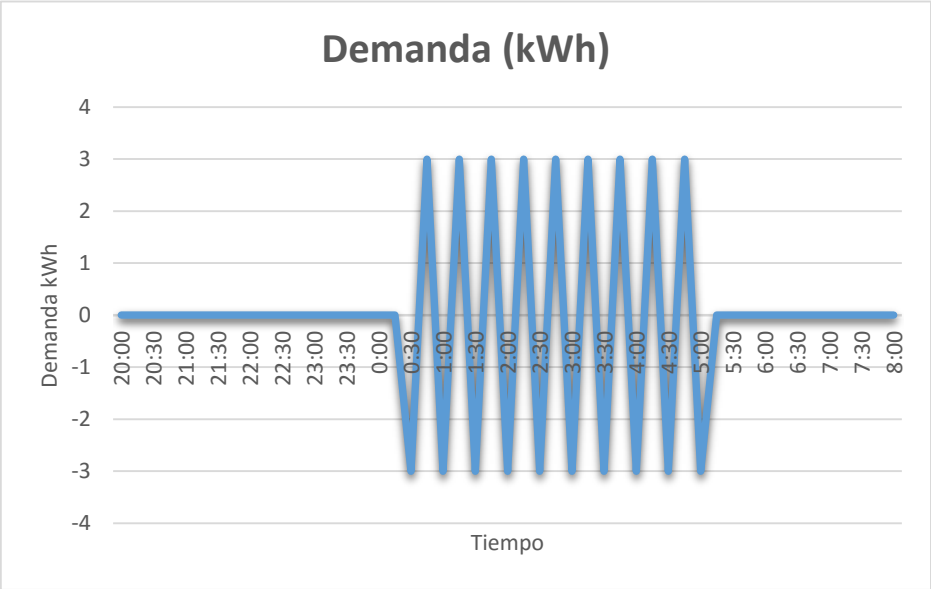

Fig. 72 Representación energía demandada por la red en Escenario 3

Finalmente, se creó el escenario número 4, con el objetivo de representar un perfil en el que se varía entre la exigencia de energía durante una hora y el reposo durante la

hora siguiente. La gráfica que representa este último escenario se puede ver en la figura siguiente:

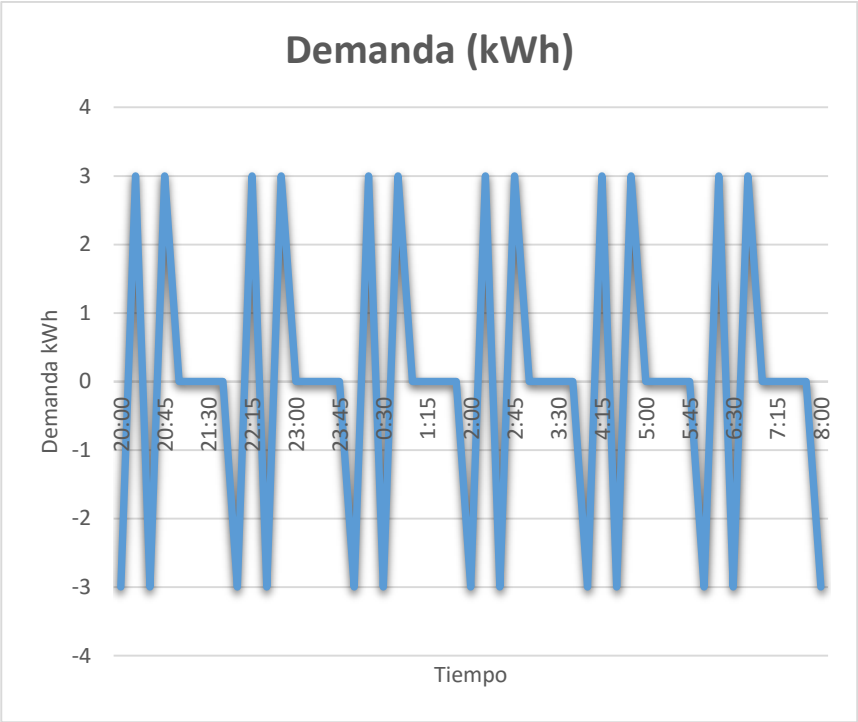

Fig. 73 Representación energía demandada por la red en Escenario 4

No fue posible llevar a cabo todos estos escenarios ya que el modelo de optimización se basaba en una carga y descarga continuada y acumulativa y no tenía en cuenta los periodos en los que la demanda era nula.

BIBLIOGRAFÍA

1. **[JIAY09] Wang Jiayuan, Sun Zechang, Wei Xuezhe** "Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications" en "New Energy Automotive Engineering Center" pp. 1657-1661, año 2009
2. **[ANGL14] Anglin, Donald L. and Sadoway, Donald R.,** "Battery,"*AccessScience* (McGraw-Hill Education, 2014).
3. **[AHMA14] M. R. Ahmad, I. Musirin y M. M. Othman** "Optimal Charging Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithm" 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)
4. **[XIAO12] Xiaopeng Chen** «An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles», en *IPEC, 2012 Conference on Power Energy*, 2012, 230.
5. **[WANG16] Yujie Wang, Chenbin Zhang, Zonghai Chen**, An adaptive remaining energy prediction approach for lithium-ion batteries in electric vehicles, Journal of Power Sources, Volume 305, 15 February 2016, Pages 80-88, ISSN 0378-7753,
6. **[HOKE14] A. Hoke, A. Brissette, K. Smith, A. Pratt and D. Maksimovic**, "Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, no. 3, pp. 691-700, Sept. 2014.
7. **[KEMP08] Kempton W, Udo V, Huber K, Komara K, Letendre S, Baker S**, et al. A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system. Res Ind – Univ Res Partnership 2008:32.
8. **[FERN13] I.J. Fernández, C.F. Calvillo, A. Sánchez-Miralles, J. Boal,** "Capacity fade and aging models for electric batteries and optimal charging strategy for electric vehicles", Energy, Volume 60, 1 October 2013, Pages 35-43, ISSN 0360-5442,
9. **[KOKA16] KOKAM Li-ion/polymer cell superior lithium polymer battery (SLPB)** Available at: http://www.kokam.com/wp-content/uploads/2016/03/SLPB-Cell-Brochure.pdf (Accessed: 16 May 2016).
10. **[KOKA06] Co, K. and Ltd (2006) Cell specification data SLPB 50106100**. Available at: http://www.houseofbatteries.com/documents/SLPB50106100.pdf (Accessed: 8 June 2016).
11. **[NEWA15] Instruments, N.B.T. (2015) BTS3000 - basic type.** Available at: http://www.newarebattery.com/index.php/products/bts3000 (Accessed: 15 May 2016).
12. **[SCHUL14] Alexander Schuller, Benjamin Dietz, Christoph M. Flath, and Christof Weinhardt** "Charging Strategies for Battery Electric Vehicles: Economic Benchmark and V2GPotential" en "Transactions on power systems", pp 2014-2022, vol.29,no.5,September 2014.
13. **[SANC14] Álvaro Sánchez-Miralles, Tomás Gómez San Román, Ismael J. Fernández, and Christian F. Calvillo** "Business Models Towards the Effective Integration of Electric Vehicles in the Grid" en "Intelligent transportation systems magazine" ,pp 45-56, winter 2014
14. **[SCHM14] Johannes Schmidt, Matthias Eisel y Lutz M.** Kolbe "Assessing the potential of different charging strategies for electric vehicle fleets in closed transport systems" en Energy policy, 74, (2014), pp 179-189
15. **[WIKI16] Wikipedia contributors**, "Vehicle-to-grid," Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vehicle-to-grid&oldid=715447194(accessed May 19, 2016).
16. **[BELT08] Belt J.** Battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles. Tech. Rep. Idaho National Laboratory (INL); 2008.
17. **[POWE94] Powers, R.A.,** "Advances and trends in primary and small secondary batteries," in *Battery Conference on Applications and Advances, 1994., Proceedings of the Ninth Annual* , vol., no., pp.80-85, 11-13 Jan. 1994
18. **[PENA11] Carlos Peña Ordóñez,** «Estudio de baterías para vehículos eléctricos», mayo de 2011, 18, http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805.

19. **[BUCH11]** **Isidor Buchmann**, "Batteries in a Portable World", 3rd Edition , Sección: "Battery types", ISBN 978-0-9682118-3-0, 2011
20. **[SCHU14]** **Alexander Schuller, Benjamin Dietz, Christoph M. Flath, and Christof Weinhardt** "Charging Strategies for Battery Electric Vehicles: Economic Benchmark and V2GPotential" en "Transactions on power systems", pp 2014-2022, vol.29,no.5,September 2014.
21. **[GARC14]** **J. García-Villalobos, I. Zamora, J.I. San Martín, F.J. Asensio, V. Aperribay,** Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 38, October 2014, Pages 717-731, ISSN 1364-0321,
22. **[OFFE11]** **Offer GJ,Contestabile M,Howey D a, Clague R, Brandon NP**. Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK. Energy Policy2011;39:1939–50.
23. **[KEMP05]** **Kempton W, Tomić J.** Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. J Power Sources 2005; 144:268–79.
24. **[KEMP05]** **Kempton W, Tomić J.** Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. J Power Sources 2005; 144:280–94.
25. **[NEBE11]** **Nebel A, Kruger C, Merten F**. Vehicle to grid and demand side management— an assessment of different strategies for the integration of electric vehicles. In: IET conference renewable power generation(RPG2011). IET: Edinburgh 2011:143.
26. **[DRUI12]** **Druitt J, Früh W- G.** Simulation of demand management and grid balancing with electric vehicles.JPowerSources2012;216:104–16.
27. **[LOPE09]** **Lopes JAP, Rocha Almeida PM, Soares F J.** Using vehicle-to-grid to maximize the integration of intermittent renewable energy resources in islanded electric grids.In:2009internationalconferencecleanelectricalpower.IEEE: Capri 2009:290–5.
28. **[WOOL95]** **Wooldridge M, Jennings N.** Intelligent agents: theory and practice. Knowl Eng Rev1995:1–62.
29. **[GRZE15]** **Grzegorz Piłatowicz** «A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion, lead-acid, nickel metal-hydride batteries and electrochemical double-layer capacitors as examples», Journal of Power Sources 296 (20 de noviembre de 2015): 365, doi:10.1016/j.jpowsour.2015.07.073.
30. **[YONG14]** **Yongqi Li** «Investigation of the internal resistance in LiFePO4 cells for battery energy storage system», en 2014 IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014, 1596, doi:10.1109/ICIEA.2014.6931423.
31. **[AEME16]** **Meteorología, A.E. Valores climatológicos normales: Madrid, Retiro - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España.** Available at: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=3195&k=mad (Accessed: 28 May 2016).
32. **[NETW16]** **Network, T. Calendario Madrid - Horas de Luna, Sol y fases lunares**. Available at: http://www.tutiempo.net/Calendario-Madrid-E28001.html (Accessed: 28 May 2016).
33. **[REDE16]** **RED ELECTRICA DE ESPAÑA -** Seguimiento de la demanda de energía eléctrica (no date) Available at: https://demanda.ree.es/demanda.html (Accessed: 28 May 2016).
34. **[BOTE12]** **J. S. Botero Valencia,** "Characterization of Li-Ion Polymer battery to estimate the download time on systems with constant load," *2012 XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA)*, Antioquia, 2012, pp. 128-131.
35. **[APPE11]** **G.B. Appetecchi, G.T. Kim, M. Montanino, F. Alessandrini, S. Passerini,** Room temperature lithium polymer batteries based on ionic liquids, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 16, 15 August 2011, Pages 6703-6709, ISSN 0378-7753, http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.070.
36. **[TORRE10]** **Cristina Torrejón Pérez.:** "Diseño de un pack de baterías para una motocicleta electrica", Universidad Carlos III, 2010
37. **[NISS16]** **España, N. (2016) Nissan LEAF - Coche 100% eléctrico.** Available at: http://www.nissan.es/ES/es/vehicle/electric-vehicles/leaf.html (Accessed: 3 June 2016).
38. **[VITU16]** **Ecuación de la recta que pasa por dos puntos** Available at: http://www.vitutor.com/geo/rec/d_7.html (Accessed: 4 June 2016).

39. **Antonio Gómez Expósito** "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica" Ed. Mc Graw Hill. 2002
40. **[LEDE08] Pablo Ledesma** "Regulación de frecuencia y potencia" Universidad Carlos III 21-09-2008
41. **[LOPE07] Lopes JAP, Hatziargyriou N, Mutale J, Djapic P, Jenkins N.**"Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities". Electr Power Syst Res 2007;77:1189–203.
42. **[EURO16] European Commission.** "Energy 2020: a strategy for competitive, sustainable and secure energy". Available on line at:⟨http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0639:FIN:EN:PDF⟩.
43. **[JUST13] Justin D.K. Bishop, Colin J. Axon, David Bonilla, Martino Tran, David Banister, Malcolm D. McCulloch,** Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV, Applied Energy, Volume 111, November 2013, Pages 206-218, ISSN 0306-2619,http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094.
44. **[LENG15] Feng Leng, Cher Ming Tan, Michael Pecht**, "Effect of temperature on the aging rate of Li Ion Battery operating above room temperature" Scientific Reports, Nature Publishing Group,Aug 6, 2015