



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MODELO PARA LA BATERÍA DE ION DE LITIO DE UN VEHICULO ELÉCTRICO

Autor: D. Ángel Iván Rodríguez Cea

Tutor: D. Francisco V. Tinaut Fluixá

Valladolid, Julio de 2017

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



MODELO PARA LA BATERÍA DE ION DE LITIO DE UN VEHICULO ELÉCTRICO

RESUMEN BREVE

La principal tecnología de almacenamiento en vehículos eléctricos son las baterías de iones de litio, que han permitido ampliar su autonomía y prestaciones. En este TFM se exponen las características de las baterías de iones de litio, principio de funcionamiento, mecanismos de envejecimiento y los principales modelos utilizados. Para poder evaluar las prestaciones de un vehículo eléctrico, es necesario disponer de modelos que permitan realizar simulaciones realistas. Por ello, se ha implementado un modelo para una batería Li-ion que considera una fuente de tensión, una resistencia en serie, y dos grupos RC, uno de ellos para representar el comportamiento en transitorios de corta duración y el otro para los de larga duración. Todos los elementos del circuito tienen valores que dependen del estado de carga de la batería (SOC). Este modelo se ha usado para simular el comportamiento del sistema de almacenamiento del Nissan Leaf en un ciclo NEDC.

Cinco palabras claves que describen el contenido del TFM:

1. Batería Li-ion
2. Modelo
3. Circuito equivalente
4. Vehículo eléctrico
5. Matlab/Simulink

MODEL FOR LITHIUM BATTERY OF AN ELECTRIC VEHICLE

SHORT ABSTRACT

Lithium-ion batteries are the main storage technology in electric vehicles, which have allowed them to expand their autonomy and performance. In this TFM the characteristics of lithium-ion batteries, operating principle, aging mechanisms and the main models used are presented. In order to evaluate the performance of an electric vehicle, it is necessary to have models that allow realistic simulations. Therefore, a model has been implemented for a Li-ion battery that considers a voltage source, a series resistance, and two RC groups, one of them to represent the behavior in transients of short duration and the other for long ones duration. All elements of the circuit have values that depend on the state of charge of the battery (SOC). This model has been used to simulate the behavior of the Nissan Leaf storage system in a NEDC cycle.

Key Words:

1. Lithium-ion batteries
2. Model
3. Equivalent circuit
4. Electric vehicle
5. Matlab/Simulink

MODELO PARA LA BATERÍA DE ION DE LITIO DE UN VEHICULO ELÉCTRICO

RESUMEN EJECUTIVO

Las baterías basadas en iones de litio presentan unas características de rendimiento y almacenamiento de energía superiores en comparación con otras tecnologías existentes. Gracias a sus buenas características ha logrado imponerse a sus competidoras en casi todas las aplicaciones, incluido el vehículo eléctrico.

Las baterías de iones de litio se pueden encontrar actualmente en el mercado y se subdividen en **tres grupos**, en función del material con el que estén fabricadas: baterías de litio metálico, baterías de iones de litio y baterías de litio-polímero. Las baterías de litio metálico son una tecnología obsoleta y peligrosa. Las baterías que contienen un electrolito sólido o de gel conforman el grupo de las baterías de litio-polímero.

Una celda de una **batería de iones de litio** está compuesta por un electrodo positivo, un electrodo negativo y un electrolito entre ambos. El electrodo positivo no contiene litio en forma metálica, sino formando parte de un compuesto más complejo con otros metales (Co, Ni, Al, Mn, Fe). El electrodo negativo en la mayor parte de los casos es una matriz de grafito. Los iones de litio (Li⁺) se mueven de un electrodo a otro a través del electrolito durante la carga y la descarga, compensando la corriente electrónica que circula por el circuito exterior.

La curva que representa el **proceso de descarga** de estas baterías frente a la corriente de descarga presenta tres zonas: zona de activación, donde la tensión disminuye inicialmente de forma exponencial, segunda zona o zona óhmica, en la que se produce una caída de tensión proporcional a la corriente, y tercera zona, en la cual la tensión desciende abruptamente debido a la reducción de la concentración de iones en el cátodo.

El **proceso de carga**, al igual que el de descarga, es característico para las baterías de iones de litio. El proceso típico de carga de estas baterías se suele realizar en tres fases: una primera etapa donde se aplica una corriente constante hasta que la celda alcanza su tensión nominal, una segunda zona donde se mantiene constante la tensión a la par que se disminuye progresivamente la intensidad de carga. Finalmente, la tercera zona se denomina de flotación, con periodos discontinuos de carga para compensar la autodescarga de la batería.

Para un cuidado adecuado de las baterías de iones de litio, es necesario incluir un **gestor electrónico de la carga y descarga (BMS)**, cuya misión principal es monitorizar los niveles de tensión a nivel de las celdas individuales de la batería, a fin de protegerlas de sobrecargas y sobredescargas. Sin esta protección de la batería, se puede acelerar su proceso de envejecimiento, el cual influye en los procesos químicos de la celda. Los sistemas BMS monitorizan la temperatura en todo momento por lo previniendo de este modo un envejecimiento prematuro.

Al igual que para muchos componentes, las baterías pueden ser modeladas para su posterior estudio. En el caso concreto de las baterías de litio, como se trata de un sistema electroquímico, complejo y no lineal, por lo que los modelos con sólo una aproximación al sistema real.

Los **modelos para las baterías de iones de litio** se clasifican en electroquímicos y de circuito eléctrico equivalente. A continuación se detalla cada uno de ellos.

- **Modelos electroquímicos:** Son modelos que se basan en las características constructivas y los fenómenos electroquímicos que se producen en el interior de la celda de la batería. Son capaces de reproducir de forma muy exacta el comportamiento de la celda estudiada. Sin embargo, estos modelos son complejos y difíciles de implementar. Su uso se restringe a actividades muy concretas.

- **Modelos de circuito equivalente:** Son modelos que utilizan elementos eléctricos para simular el comportamiento de la batería. Debido a que los modelos basados en circuitos eléctricos pueden simular los comportamientos fundamentales de un sistema de almacenamiento, estos modelos aportan un buen compromiso entre exactitud y usabilidad. Esto los hace ser muy utilizados en multitud de aplicaciones de diseño, cálculo y simulación de sistemas de almacenamiento.

El trabajo de este TFM se centra en los **modelos de circuito equivalente**, haciendo una revisión desde los modelos más sencillos hasta aquellos que contienen diferentes ramas en paralelo que modelan con mayor exactitud la batería estudiada. De estos modelos, los más conocidos son el modelo de la resistencia interna, el equivalente Thevenin o el de polarización dual.

Sin embargo, existen otros modelos propuestos por diversos autores que poseen características aplicables a ciertas aplicaciones o fenómenos de interés de la batería. Entre estos se encuentran los modelos propuestos por [Dubarry, 2007] o [Chen, 2006].

Los **criterios de elección de un modelo** juegan un papel fundamental a la hora de trabajar con él. La carga computacional está íntimamente ligada con la complejidad del modelo junto con la exactitud de este. Los modelos complejos proporcionan mejores resultados, pero resultan más difíciles a la hora de trabajar con ellos.

La **obtención de los parámetros característicos** de la batería se realiza mediante pruebas controladas en el laboratorio. Estas pruebas se clasifican en: técnicas en el dominio del tiempo y técnicas en el dominio de la frecuencia. En el primer grupo se encuentran las descargas de batería a corriente constante y a corriente variable entre otras. En el segundo grupo destaca la EIS (espectroscopía de impedancia electroquímica).

La última parte del TFM se centra en el **modelo propuesto por [Chen, 2006]**. Este modelo considera una fuente de tensión, una resistencia en serie, y dos grupos RC, uno de ellos para representar el comportamiento en transitorios de corta duración y el otro para los de larga duración. Todos los elementos del circuito tienen valores que dependen del estado de carga de la batería (SOC), el cual se calcula a partir del historial de la corriente de carga o de descarga. Este modelo se ha implementado en Matlab/Simulink y se ha aplicado a la batería TCL PL-383562 de 850mAh de capacidad partiendo de los datos de ensayo proporcionados por el mismo autor. Tras su implementación se ha verificado el funcionamiento del modelo realizando las mismas pruebas.

Además, partiendo de los datos proporcionados por el fabricante Nissan y por los informes [INL, 2012] y [INL, 2014] se ha adaptado el modelo para el **vehículo Nissan Leaf** y se ha calculado la potencia demandada por el vehículo para el ciclo NEDC. Introduciendo todos estos datos en el modelo, se simula una prueba de autonomía del vehículo.

Los resultados obtenidos en la simulación proporcionan una autonomía de 160km para el Nissan Leaf, que en comparación de los datos publicados por el fabricante para la misma versión son correctos. Se han realizado varias simulaciones más teniendo en cuenta los hipotéticos **efectos del envejecimiento**, obteniéndose interesantes resultados que ponen de manifiesto la importancia de controlar estos efectos en las baterías utilizadas en automoción.

MODEL FOR LITHIUM BATTERY OF AN ELECTRIC VEHICLE

EXECUTIVE ABSTRACT

Lithium-ion batteries have superior performance and energy storage characteristics compared to other existing technologies. Thanks its good features it has managed to impose itself on its competitors in almost all applications, including the electric vehicle.

Lithium-ion batteries can be found on the market and are subdivided into **three groups**, depending on the material they are made of: lithium metal batteries, lithium-ion batteries and lithium-polymer batteries. Metal lithium batteries are an obsolete and dangerous technology. Batteries containing a solid or gel electrolyte form the group of lithium-polymer batteries.

A cell of a **lithium-ion battery** is composed of a positive electrode, a negative electrode, and an electrolyte between them. The positive electrode does not contain lithium in metallic form, but forms part of a more complex compound with other metals (Co, Ni, Al, Mn, Fe). The negative electrode in most cases is a graphite matrix. Lithium ions (Li^+) move from one electrode to another through the electrolyte during charging and discharge, compensating for the electronic current flowing through the outer circuit.

The curve that represents the **process of discharge** of these batteries front discharge current has three zones: activation zone, where the voltage initially decreases exponentially, second zone or ohmic zone, in which a proportional voltage drop occurs to the current, and third zone, in which the voltage drops abruptly due to the reduction of the concentration of ions in the cathode.

The **charging process**, as well as the discharge process, is characteristic for lithium-ion batteries. The typical charging process of these batteries is usually performed in three phases: a first stage where a constant current is applied until the cell reaches its nominal voltage, a second zone where the voltage is constant while the load current is lower. Finally, the third zone is flotation, with discontinuous periods of loading to compensate for self-discharge of the battery.

The care of lithium-ion batteries is important, so it is necessary to include an **electronic load-and-discharge (BMS) manager** whose main task is to monitor the voltage levels at the individual battery cells in order to protect them for overload and overload. Without this battery protection, it can accelerate its aging process, which influences the chemical processes of the cell. BMS systems monitor the temperature at all times by preventing them from premature aging.

As for many components, the batteries are modeled for further study. In the specific case of lithium batteries, as it is an electrochemical system, complex and non-linear, making the models with only an approximation to the real system.

The **models for lithium-ion batteries** are classified into electrochemical and equivalent electric circuit. Each of them is detailed below.

- **Electrochemical models:** These models are based on the construction characteristics and the electrochemical phenomena that occur inside the cell of the battery. They are able to reproduce very accurately the behavior of the cell studied. However, these models are complex and difficult to implement. Its use is restricted to very specific activities.
- **Equivalent circuit models:** These models use electrical elements to simulate battery behavior. Because electric circuit-based models can simulate the fundamental behaviors of a storage system, these models provide a good compromise between accuracy and usability. This makes them widely used in many applications of design, calculation and simulation of storage systems.

The work of this TFM focuses on the **equivalent circuit models**, making a review from the simplest models to those that contain different branches in parallel that model with more accuracy the battery

studied. Of these models, the best known are the internal resistance model, the Thevenin equivalent or the dual polarization model.

However, there are other models proposed by different authors that have characteristics applicable to certain applications or phenomena of interest of the battery. Among these are the models proposed by [Dubarry, 2007] or [Chen, 2006].

The **criteria for choosing a model** are a fundamental role. The computational load is closely linked to the complexity of the model along with the accuracy of the model. Complex models provide better results, but they are more difficult to work with.

The characteristic **parameters of the battery** are obtained by controlled tests in the laboratory. These tests are classified in: time domain techniques and frequency domain techniques. In the first group are the discharges of battery to constant current and variable current among others. In the second group, the EIS is the most important technique (Electrochemical Impedance Spectroscopy).

The last part of the TFM focuses on the **model proposed by [Chen, 2006]**. This model considers a source of voltage, a series resistance, and two RC groups, one of them to represent the behavior in transients of short duration and the other for the long duration. All elements of the circuit have values that depend on the state of charge of the battery (SOC), which is calculated from the history of the charge or discharge current. This model has been implemented in Matlab / Simulink and has been applied to the TCL PL-383562 850mAh capacity battery based on the test data provided by the same author. After its implementation has been verified the operation of the model with the author's tests.

In addition, based on the data provided by the Nissan manufacturer and the [INL, 2012] and [INL, 2014] reports, the model for the **Nissan Leaf** vehicle has been adapted and the power demanded by the vehicle in NEDC cycle. Introducing this data into the model, a vehicle autonomy test has been simulated.

The results obtained in the simulation provide a range of 160km for the Nissan Leaf, which compared to the published data by the manufacturer for the same car version are correct. Several simulations have been carried out taking into account the **hypothetical effects of aging**, obtaining interesting results that show the importance of controlling these effects in the batteries used in automotive.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi tutor Francisco Tinaut Fluixá toda la dedicación y confianza depositada en mí, dándome la oportunidad de realizar el presente TFM.

Del mismo modo, quiero agradecer a Javier Alonso Ripoll su ayuda y buenos consejos durante la realización del TFM.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer a mis padres toda su ayuda y apoyo en todo este tiempo, porque sin ellos no habría podido llegar hasta aquí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Los vehículos eléctricos	1
1.2	Objetivos del trabajo	2
1.3	Estructura del trabajo	2
2.	BATERÍAS DE LITIO-ION	5
2.1	Historia	5
2.2	Características generales	6
2.3	Clasificación de las baterías de litio	7
2.3.1	Baterías LCO (LiCoO_2)	8
2.3.2	Baterías LMO (LiMn_2O_4)	9
2.3.3	Baterías LFP (LiFePO_4)	9
2.3.4	Baterías LPO (Li-Polímero)	10
2.4	Principio de funcionamiento de una celda de una batería de litio	10
2.4.1	Proceso químico en baterías LCO	11
2.4.2	Proceso químico en baterías LMO	11
2.5	Procesos de carga y descarga	12
2.6	Protección y módulos de gestión	15
2.7	Envejecimiento de las baterías de Litio-ion	17
2.7.1	Envejecimiento electroquímico	19
2.7.2	Influencia de la temperatura en el envejecimiento	20
2.7.3	Influencia de los procesos de carga y descarga en el envejecimiento	21
2.8	Aplicaciones de las baterías de Litio-ion	22
3.	MODELOS PARA BATERÍAS DE LITIO-ION	25
3.1	Definición y clasificación de modelos	25
3.2	Modelos electroquímicos	26
3.3	Modelos de circuito equivalente	27
3.3.1	Modelo con una resistencia interna	27
3.3.2	Modelo con un grupo RC en paralelo	28
3.3.3	Modelo equivalente de Thevenin	29
3.3.4	Modelo PNGV	30
3.3.5	Modelo de polarización dual	30
3.4	Modelos alternativos propuestos por otros autores	31
3.4.1	Modelo propuesto por Dubarry	31
3.4.2	Modelo propuesto por Chen	33

4.3.3	Modelo propuesto por Tremblay	35
3.5	Criterios de elección de los modelos.....	37
4.	OBTENCIÓN DE PARAMETROS PARA UN MODELO.....	39
4.1	Técnicas en dominio del tiempo.....	39
4.1.1	Descargas a corriente constante.....	39
4.1.2	Pruebas con corrientes variables	40
4.1.3	Voltamperometría cíclica.....	41
4.2	Técnicas en dominio de la frecuencia	42
4.2.1	Análisis de frecuencia estacionario	42
4.2.2	Espectroscopía de impedancia electroquímica	43
5.	IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION	47
5.1	Entradas del modelo	47
5.2	Planteamiento del modelo para Simulink	48
5.3	Asociación de celdas en serie y en paralelo	49
5.4	Componentes del modelo de Chen en Simulink	50
5.4.1	Subsistema de cálculo de SOC.....	50
5.4.2	Subsistemas de cálculo V_{oc} , R_s , R_1 , R_2 , C_1 y C_2	50
5.4.3	Subsistemas de cálculo V_{RS} , V_1 y V_2	51
5.4.4	Subsistema de celda de batería.....	52
5.4.5	Subsistema de batería	53
5.5	Configuración del modelo de Chen en Simulink.....	54
5.6	Verificación y validación del modelo de Chen en Simulink.....	54
5.6.1	Verificación del modelo mediante descarga a corriente constante	55
5.6.2	Verificación del modelo mediante descarga a corriente pulsante	56
6.	APLICACIÓN DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION PARA NISSAN LEAF.....	59
6.1	Parámetros característicos del vehículo eléctrico Nissan Leaf	59
6.2	Cálculo del consumo del Nissan Leaf en el ciclo NEDC	62
6.3	Adaptación del modelo Simulink para Nissan Leaf	64
6.3.1	Factores de corrección de los parámetros del modelo.....	64
6.3.2	Introducción de factores de corrección y verificación del modelo	65
6.3.3	Configuración del modelo para simular ciclo NEDC.....	67
7.	RESULTADOS DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION PARA NISSAN LEAF	71
7.1	Simulación de prueba de autonomía en ciclo de homologación NEDC	71
7.1.1	Resultados de la simulación de prueba de autonomía.....	72
7.2	Influencia de la regeneración en el frenado en la autonomía.....	74
7.3	Influencia del envejecimiento de la batería en la autonomía.....	75
7.3.1	Aumento de la resistencia interna de la batería	75

7.3.2	Pérdida de capacidad del pack de baterías	76
8.	CONCLUSIONES.....	77
8.1	Conclusiones	77
8.1.1	Conclusiones generales.....	77
8.1.2	Conclusiones específicas.....	77
8.2	Principales aportaciones del autor del TFM	78
8.3	Sugerencias para trabajos futuros	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXO 1: DATOS CARACTERÍSTICOS NISSAN LEAF	83

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los vehículos eléctricos

La historia del automóvil comienza en 1825, fecha en la que se presenta en Reino Unido el primer vehículo propulsado a vapor. Poco después, en 1839 se presenta en Escocia el primer vehículo eléctrico de baterías no recargables. En 1886, Karl Friedrich Benz presenta en la ciudad alemana de Mannheim el primer vehículo de combustión interna. En apenas 60 años se desarrollaron tres tecnologías diferentes que convivieron unos pocos años juntas.

Los vehículos propulsados a vapor se dejan de utilizar rápidamente al considerarse poco eficientes y poseer un arranque costoso, abriendo paso a los vehículos eléctricos y de combustión interna. Estas dos tecnologías convivieron durante una etapa más amplia.

El vehículo eléctrico se perfila como ganador de la batalla de la automoción, al presentarse en Londres en 1897 un vehículo eléctrico con baterías de plomo-ácido recargables y una autonomía de 80km, y establecer en 1899 el record de velocidad en su época al superar la barrera de los 100km/h.

Con la llegada del siglo XX, las condiciones comenzaron a ser más favorables al vehículo de combustión interna debido al bajo precio del petróleo y al poseer un repostaje más rápido que los procesos de carga de los vehículos eléctricos.

La invención del motor de arranque en 1911 y la progresiva reducción de los costes de fabricación de los vehículos de combustión interna, propician la decadencia del vehículo eléctrico. Además, desde 1908, Ford comercializaba en masa sus vehículos que superan en prestaciones al vehículo eléctrico. Con estos y otros avances, el vehículo eléctrico pierde mercado y se reduce su utilización a ámbitos muy concretos.

En la década de 1970, se impulsa nuevamente al vehículo eléctrico debido a la crisis del precio del petróleo y gracias a las primeras preocupaciones medioambientales. Algunos fabricantes realizaron prototipos no comerciales de utilidad comercial más que real.

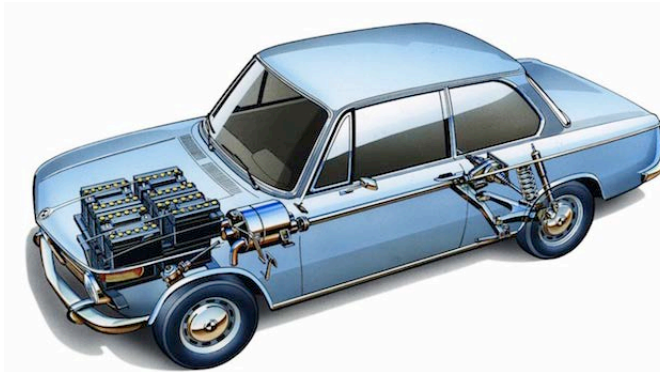


Fig. 1 BMW1602e, prototipo de vehículo eléctrico presentado por BMW en 1969 [BMW, 2017]

La llegada del tercer milenio, el descubrimiento de nuevos materiales y los efectos medioambientales de los contaminantes emitidos por los vehículos de propulsión interna impulsaron la investigación de los grandes fabricantes del sector de la automoción. A principios de 2010, Nissan comenzó a comercializar la primera generación del Nissan Leaf, al que siguieron otros fabricantes como BMW o Renault.

Los primeros modelos comerciales disponían en torno a 100km de autonomía, suficiente para el entorno urbano pero escaso para viajes entre dos ciudades. Las investigaciones actuales se orientan en ampliar la autonomía de los vehículos, lo que ha permitido que estos primeros modelos hayan podido aumentar su autonomía hasta los 400km.

Sin embargo, todavía le queda mucho recorrido al vehículo eléctrico para igualar las prestaciones de los actuales vehículos de combustión interna, debiendo mejorar los tiempos de recarga o desarrollar

sistemas de intercambio de baterías en “electrolíneas” al mismo tiempo que aumentan la autonomía mediante la investigación en baterías.

1.2 Objetivos del trabajo

El **objetivo general** del presente Trabajo Fin de Master es **conocer y plantear modelos realistas** que reproduzcan el comportamiento y funcionamiento de una batería de iones de litio de y que puedan ser implementados de tal forma que resulten de utilidad en ingeniería de automoción.

Para alcanzar el objetivo general del TFM, se plantean los objetivos específicos siguientes:

- Conocer la **historia y el principio de funcionamiento** de las baterías de iones, así como sus características y diferentes tipologías existentes en función del material empleado en su fabricación.
- Revisar el funcionamiento de los **módulos de gestión comerciales** que incorporan este tipo de baterías y su implicación en los procesos de carga y descarga.
- Exponer los principales **procesos de envejecimiento** que afectan a las baterías de iones de litio y sus efectos a corto, medio y largo plazo.
- Definir el concepto de modelo y **clasificar los modelos existentes** en función de del ámbito de aplicación.
- Conocer los diferentes modelos tradicionales de baterías de tipo **circuito eléctrico equivalente** y clasificarlos de menor a mayor complejidad, así como modelos propuestos por diversos autores utilizados en investigación.
- Exponer los **procedimientos de caracterización de las baterías de iones de litio** utilizados en laboratorio para su implementación en un modelo.
- **Implementar un modelo de circuito eléctrico equivalente** en un entorno de programación y simulación para una determinada batería.
- Proponer ejemplos de **aplicación del modelo de batería de iones de litio** en ingeniería de automoción a un vehículo comercial y justificar los resultados obtenidos.

1.3 Estructura del trabajo

Para alcanzar estos objetivos se ha estructurado el trabajo en:

- **Baterías de Litio-ion:** Este capítulo se ha dedicado a presentar de forma global a las baterías de iones de litio. En él se expone brevemente la historia y el principio general de funcionamiento de este tipo de baterías, al mismo tiempo que se realiza su clasificación y se detallan los sistemas de gestión de carga y descarga. Por último, se dan a conocer los procesos de envejecimiento y los ámbitos de aplicación de las baterías Li-ion.
- **Modelos para baterías de Litio-ion:** Se trata de un amplio capítulo dedicado a los modelos electroquímicos y de circuito equivalente para las baterías de iones de litio. Además se presentan modelos propuestos por diversos investigadores de otras universidades.
- **Obtención de parámetros para un modelo:** En este capítulo se realiza una breve exposición de las técnicas utilizadas en laboratorio para la obtención de los parámetros de un modelo de batería de iones de litio.
- **Implementación en Simulink del modelo de batería Li-ion:** Se recoge todo el proceso seguido para la implementación y configuración de un modelo de circuito equivalente de la batería TCL PL-383562 en Simulink. También se recoge el proceso de verificación de resultados seguido.

- **Aplicación del modelo de batería Li-ion para Nissan Leaf:** Partiendo del modelo implementado en Simulink para una batería se toma como referencia los datos de la batería del Nissan Leaf para introducirlos en el modelo y simular la autonomía del vehículo en un ciclo de homologación NEDC.
- **Resultados del modelo de batería Li-ion para Nissan Leaf:** En este capítulo donde se presentan los resultados de las simulaciones del modelo de batería y se estudian los efectos del frenado regenerativo y el envejecimiento de la batería sobre la autonomía del vehículo.
- El trabajo termina con las **conclusiones y las referencias** utilizadas.

2. BATERÍAS DE LITIO-ION

2.1 Historia

El desarrollo de las baterías de litio comienza a finales de la década de 1950 debido a que las actividades militares y espaciales necesitaban unas baterías que ocupasen un menor espacio y con mejor densidad de energía que las existentes por aquel entonces. La reducción de peso que se podía conseguir con las baterías de litio también motivo su desarrollo.

En la década de 1960 se desarrollaron diferentes tipos de cátodos sólidos de litio, entre los que destacan los basados en óxido de cobre, sulfuro de cobre, disulfuro de hierro, cromato de plata, pentóxido de vanadio, dióxido de manganeso y monofluoruro de carbono. Estos dos últimos se utilizan actualmente en multitud de aplicaciones comerciales e industriales.

Durante la década de 1970, una de las primeras baterías que se lanzó al mercado fue la batería de litio-dióxido sulfúrico (LiSO_2). Durante toda la década se produjeron avances que culminaron con la aparición de las baterías de litio-cloruro de tionilo (LiSOCl_2), que proporcionan una mayor densidad de energía y mejora del comportamiento a altas temperaturas que las de LiSO_2 . Algunos de estos tipos de baterías todavía se pueden encontrar en el mercado.

Con el desarrollo de la electrónica en la década de 1980 se impulsó la investigación de las baterías de litio ya que habían obtenido buenos resultados en los mercados tras su introducción en la década pasada. Debido a lo anterior, fue posible el desarrollo de las baterías de litio para su uso en dispositivos portátiles.

Aunque los primeros prototipos de baterías portátiles y recargables presentaron multitud de problemas, fue posible lanzar al mercado una batería recargable de litio que satisficiera las necesidades que había en aquel momento. El lanzamiento vino de la mano de Sony en 1985, con una batería de litio de ánodo metálico, y en 1991 comercializó las primeras baterías de iones de litio.

Sin embargo, pronto se determinó que las baterías de litio con ánodo metálico se calentaban en exceso durante los ciclos de carga produciendo dilataciones internas que podían derivar en explosiones violentas. Por este motivo, la investigación se orientó hacia baterías de litio con ánodo no metálico (Li-ion), como grafito o carbono no estructurado (conocido en inglés como coke), las cuales presentaban un riesgo menor.

En 1997 la mayoría de las baterías ya utilizaban un ánodo de grafito, ya que presenta una curva de tensión en la descarga más plana que las baterías de coke y una menor reducción de la tensión en la descarga, como puede verse en la Figura 2 [Buchmann, 2001]. Desde entonces, multitud de avances se han precedido que han permitido mejorar la capacidad de almacenamiento, la eficiencia, la potencia y la durabilidad de las baterías de litio.

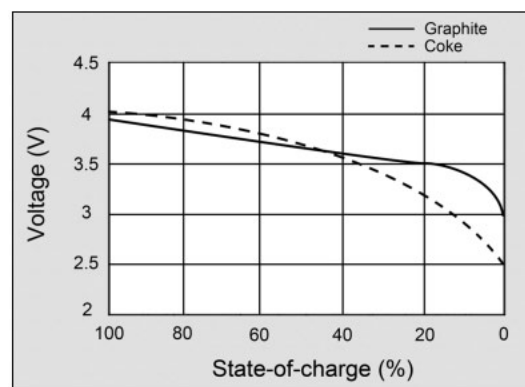


Fig. 2 Características de descarga de Li-Ion con coke y electrodo de grafito [Buchmann, 2013]

2.2 Características generales

Las baterías basadas en iones de litio presentan unas características de rendimiento y almacenamiento de energía superiores en comparación con otras tecnologías existentes, como Pb-Ácido, Ni-Cd o Ni-MH. Gracias a sus buenas características ha logrado imponerse a sus competidoras en casi todas las aplicaciones.

Una celda de una batería de iones de litio está compuesta, al igual que en el resto de baterías, por un electrodo positivo, un electrodo negativo y un electrolito entre ambos. El electrodo positivo no contiene litio en forma metálica, sino formando parte de un compuesto más complejo con otros metales (Co, Ni, Al, Mn, Fe). El electrodo negativo en la mayor parte de los casos es una matriz de grafito. Los iones de litio (Li^+) se mueven de un electrodo a otro a través del electrolito (normalmente LiPF_6) durante la carga y la descarga, compensando la corriente electrónica que circula por el circuito exterior, tal y como se muestra en la figura 3.

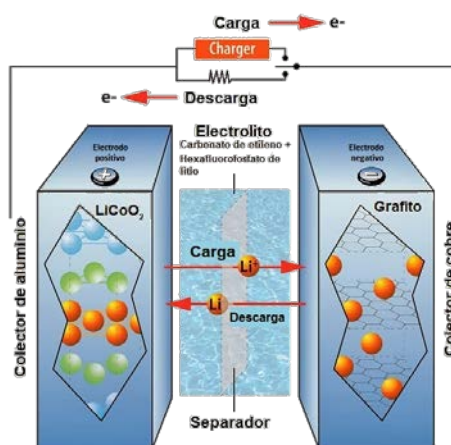


Fig. 3. Esquema de una batería de Li-ion LCO [Argonne National Laboratory, 2014]

Los parámetros característicos que definen a cualquier tipo de batería son su **energía específica**, su **potencia específica** y la **tensión por celda**. En el caso de las baterías de Li-ion, valores típicos de la energía específica son 100Wh/kg , de potencia específica 300W/kg y de la tensión por celda $3,7\text{V}$. Además, las baterías de litio se caracterizan por tener un mantenimiento reducido, carecer de efecto memoria y una pequeña tasa de autodescarga [Castaño, 2014]. Sin embargo, estos valores pueden oscilar en función del tipo de batería de litio que se considere.

En función del proceso que esté ocurriendo en la batería (carga o descarga), el electrodo positivo puede comportarse como cátodo o ánodo y, del mismo modo, el electrodo negativo. En este trabajo se sigue el convenio de descarga, es decir, el electrodo positivo se denominará cátodo y el negativo ánodo.

Tabla 1. Comparación de las tecnologías más populares en baterías de Li-ion [Julien, 2016]

Acrónimo	Cátodo	Ánodo	Tensión de celda (V)	Energía específica (Wh/kg)
LCO	LiCoO_2	Grafito	3,7 – 3,9	140
LNO	LiNiO_2	Grafito	3,6	150
NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$	Grafito	3,65	130
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$	Grafito	3,8 – 4,0	170
LMO	LiMn_2O_4	Grafito	4,0	120
LNM	$\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$	Grafito	4,8	140
LFP	LiFePO_4	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	2,3 – 2,5	100

Además de presentar unas características de rendimiento y almacenamiento de energía superiores en comparación con otras tecnologías existentes, las baterías de litio poseen una serie de ventajas que les han permitido colocarse en primera línea comercial. Entre todas las ventajas destacan las siguientes [Wu, 2015]:

- **Buena densidad de energía y de potencia** en relación con su masa, las cuales están en un proceso de mejora en investigaciones actuales
- **Tensión elevada por celda**, lo que permite diseñar baterías de una sola celda en dispositivos portátiles como teléfonos móviles o cámaras.
- **Baja tasa de autodescarga**. En muchos casos es menor de un 3% al mes.
- **Carecen de efecto memoria**, al contrario que sus competidores de Ni-Cd o Ni-MH.
- **Tiempo de carga reducido**. Pueden ser cargadas hasta un 80% de su capacidad con una corriente de carga de 1C.
- **Amplio rango de temperaturas de trabajo** (-25°C a $+45^{\circ}\text{C}$), lo que permite que puedan ser utilizadas en multitud de aplicaciones.
- **Bajo mantenimiento** en comparación con sus competidores.

Sin embargo, es necesario admitir que también presentan **algunos inconvenientes**, como son el alto coste de algunos de sus componentes, la necesidad de controlar las condiciones de carga e incorporar circuitos de protección contra sobrecargas y la poca compatibilidad en los replazos tecnológicos en dispositivos que utilizasen otras tecnologías de almacenamiento.

Realizando un balance de todas las características mencionadas, ventajas y desventajas, estas últimas no suponen un problema importante a su integración en las aplicaciones donde son necesarias, especialmente en aquellas correspondientes a productos de alto nivel tecnológico. Por tanto, se puede afirmar que las baterías de ion de litio continuaran durante un largo periodo a la cabeza de los sistemas de almacenamiento al mismo tiempo que mejoran sus características.

2.3 Clasificación de las baterías de litio

Como se ha mencionado en el apartado anterior, existen diferentes tipos de baterías recargables de litio. Aunque la variedad es muy amplia, se pueden agrupar en **tres grandes grupos**: baterías de **litio metálico**, baterías de **iones de litio** y baterías de **litio-polímero**.

El primer grupo, baterías de **litio metálico**, se agrupan todas aquellas baterías recargables de litio que tienen ánodo de litio metálico. En el apartado [2.1](#) se habló de ellas, como etapa en el desarrollo de esta clase de baterías, pero no se profundizará más en ellas ya que se trata de una tecnología peligrosa y obsoleta.

El segundo gran grupo está formado por todos los tipos de baterías de **iones de litio** que existen en el mercado, las cuales el ánodo no tiene como tal litio metálico sino otro material con inserción de átomos de litio. Dentro de este grupo, se pueden clasificar según el compuesto que utilicen tanto en el cátodo como en el ánodo, como se muestra en la Tabla 2, o en función de su aplicación, como se indica en la Tabla 3.

Por último, el tercer grupo lo conforman las llamadas baterías de **litio-polímero**. Este tipo de baterías son realmente una evolución en cuanto a lo que electrolito se refiere. Los dos primeros grupos poseen un electrolito líquido de sal de litio, mientras que estas contienen un electrolito de tipo sólido o gel mezclado con componentes poliméricos.

A continuación se proporcionan otros detalles para el segundo y tercer grupo de la clasificación anterior.

Tabla 2. Materiales típicos que forman el cátodo o el ánodo de las baterías de iones de litio [EUROBAT, 2015]

LITHIUM-ION CATHODE MATERIALS			LITHIUM-ION ANODE MATERIALS		
MATERIAL		ABBREVIATION	MATERIAL		ABBREVIATION
Lithium Cobalt Oxide	LiCoO ₂ (60% Co)	LCO	Graphite	Carbon (natural or synthetic graphite)	C
Lithium Manganese Oxide	LiMn ₂ O ₄	LMO	Lithium Titanate	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO
Lithium Iron Phosphate	LiFePO ₄	LFP			
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.33} O ₂	NMC			

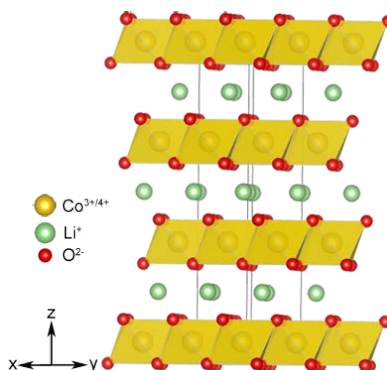
Tabla 3. Comparación de componentes en función de las necesidades requeridas [Julien, 2014]

Aplicación	Cátodo	Ánodo
Alta energía	LiCoO ₂ LiMn ₂ O ₄ LiNi _{0,33} Mn _{0,33} CoO ₂	Grafito
Alta potencia	LiFePO ₄ LiNi _{0,33} Mn _{0,33} CoO ₂	Grafito Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
Larga vida	LiFePO ₄	Grafito Li ₄ Ti ₅ O ₁₂

2.3.1 Baterías LCO (LiCoO₂)

Las baterías con cátodo del tipo LCO normalmente se combinan con un ánodo de grafito. Son las baterías que tradicionalmente se han utilizado para teléfonos móviles, ordenadores portátiles y las cámaras digitales.

El LiCoO₂ presenta una estructura bidimensional en capas de óxido de cobalto, entre las cuales se encuentran los iones de litio, como se muestra en la figura 4. Los iones de litio se mueven durante la descarga del ánodo al cátodo.


 Fig. 4. Estructura química del LiCoO₂ [Brant, 2014]

El principal inconveniente de este tipo del LiCoO_2 es su corta vida y la baja estabilidad térmica que presenta. Sin embargo, sus inconvenientes se pueden compensar con la alta capacidad de almacenar energía que presenta.

Actualmente, la tecnología basada en LCO está madurando y se está investigando la combinación con otros elementos como manganeso o aluminio para mejorar la capacidad de carga, la longevidad e intentar disminuir el coste de este tipo de baterías.

2.3.2 Baterías LMO (LiMn_2O_4)

Las baterías con cátodo de tipo LMO se comercializaron por primera vez en 1996, y al igual que las LCO, el ánodo suele ser de grafito. Este tipo de baterías presenta una mayor estabilidad térmica y seguridad que las LCO, lo que las hace adecuadas para uso en aplicaciones médicas y, más recientemente, en vehículos híbridos y eléctricos.

La estructura química que presenta el óxido de manganeso y litio es una espinela, como se puede observar en la figura 5. Este tipo de estructura mejora el flujo de iones en el electrodo, lo que se traduce en una menor resistencia eléctrica interna. Además, al presentar una menor resistencia, se pueden realizar cargas y descargas más rápidas, es decir, permite un mayor trasiego de corriente [Julien, 2014].

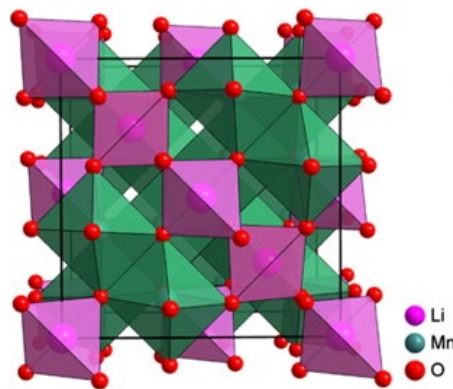


Fig. 5. Estructura química del LiMn_2O_4 [Brant,2014]

2.3.3 Baterías LFP (LiFePO_4)

En 1996, investigadores de la Universidad de Texas descubrieron que el LiFePO_4 podía ser utilizado como cátodo en las baterías de ion de litio. En comparación con otros materiales utilizados el LFP posee una baja resistencia electroquímica, lo que le permite manejar altas corrientes de carga y descarga sin penalizar el número de ciclos. Además, presenta una alta estabilidad térmica, lo que se traduce en una mayor seguridad.

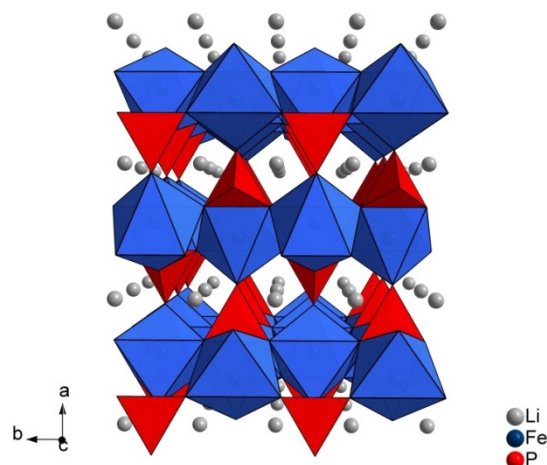


Fig. 6. Estructura química del LiFePO_4 [Molenda, 2011]

En general, el cátodo de LFP se suele combinar con un ánodo de $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, el cual resiste mayores corrientes y tiene mayor vida que el grafito. En contrapartida, la tensión de celda que se obtiene es menor, en torno a 2,5V por celda, y la tasa de autodescarga es ligeramente mayor.

Sin embargo, el coste de fabricación de este tipo de celdas es aún elevado y, salvo las características de seguridad y larga vida, no ofrece mejoras sustanciales que puedan desplazar a las baterías de tipo LCO o LMO del mercado.

2.3.4 Baterías LPO (Li-Polímero)

Las baterías LPO comienzan a investigarse en la década de 1980 entre ELF-Aquitaine (Francia) y Hydro-Quebec (Canadá) y en 1995 comienzan a comercializarse. Están orientadas a dispositivos portátiles, como teléfonos móviles y cámaras digitales.

Los primeros prototipos de las baterías LPO tenían conductividades en torno a 10^{-5}S/cm a temperatura ambiente, la cual era insuficiente para cualquier aplicación [Julien, 2016]. Sin embargo, las investigaciones han permitido aumentar su conductividad hasta hacerlas competitivas con el resto de baterías que se pueden encontrar en el mercado.

Las primeras celdas LPO estaban encapsuladas en plástico rígido, las cuales no permiten posibles dilataciones durante los procesos de carga y descarga. Actualmente, se utiliza una bolsa flexible de aluminio que supone un ahorro de un 20% de peso y tamaño [Peña, 2011].

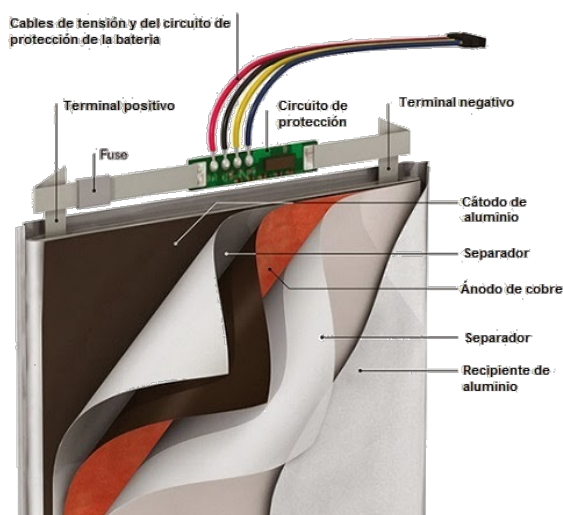


Fig. 7. Componentes de una celda LPO [MIT, 2012]

2.4 Principio de funcionamiento de una celda de una batería de litio

Como se ha visto en el apartado [2.3](#) existen diferentes materiales para el cátodo y para el ánodo, y en función de cómo se combinen, se obtienen unas determinadas características. En el caso del electrolito, se debe utilizar un material que limite la autodescarga de los iones de litio y permita el movimiento rápido de los iones entre ambos electrodos, utilizándose normalmente una mezcla de LiPF_6 y solventes orgánicos tales como el carbonato de dietilo (DEC) o carbonato de etileno (EC) [Castaño, 2014].

El almacenamiento de energía en una batería de Li-ion se basa en el proceso químico denominado **intercalación** [Root, 2011]. La intercalación consiste en la inserción de los iones de litio (Li^+) en las estructuras moleculares de los electrodos. En concreto, se dopa tanto el electrodo positivo como el negativo con iones de litio.

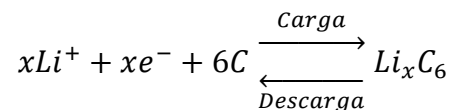
Debido a la gran diversidad de baterías de iones de litio, se va a utilizar primeramente una batería compuesta por un cátodo de tipo LCO y un ánodo de grafito para explicar el proceso de almacenamiento, carga y descarga en una celda de Li-ion. Posteriormente, se explicará el proceso en las baterías de tipo LMO ya que es habitual su uso en automoción.

2.4.1 Proceso químico en baterías LCO

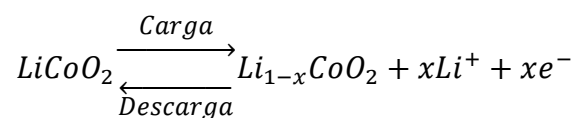
En las siguientes líneas se pretende explicar de forma resumida y simple las reacciones y los procesos químicos que se dan en las celdas tipo LCO, que son las más fáciles de encontrar en el mercado.

Durante la **carga**, el electrodo negativo de la celda es electroquímicamente reducido, es decir, los Li⁺ se insertan en la estructura química (viajan del electrodo positivo al negativo) del grafito. Por el contrario, durante la **descarga**, los iones Li⁺ dejan la estructura de grafito para volver al electrodo positivo, en este caso LiCoO₂. Las reacciones de estos procesos son [Julien, 2016]:

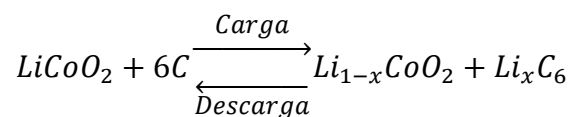
- Para el electrodo negativo:



- Para el electrodo positivo:



Las dos reacciones anteriores detallan el proceso para el cátodo y el ánodo, pero si se quiere tener una visión **global** del proceso, la reacción de la batería de litio LiCoO₂-grafito es:



De forma gráfica, en la figura 8 se ilustra el proceso de carga (a) y descarga (b) para una batería tipo LCO de iones de litio.

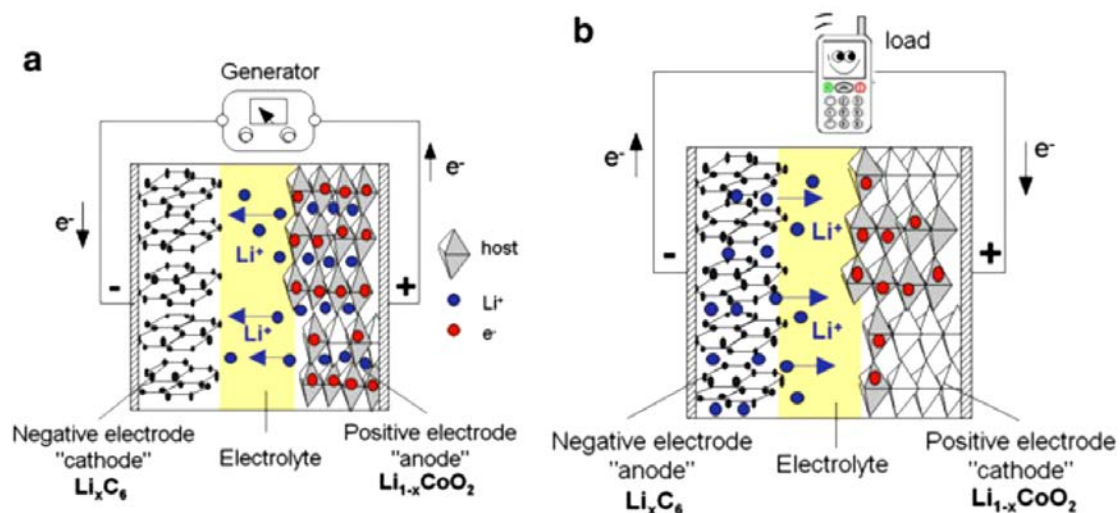


Fig. 8. Proceso de carga (a) y de descarga (b) de una batería LCO-grafito [Julien, 2016]

2.4.2 Proceso químico en baterías LMO

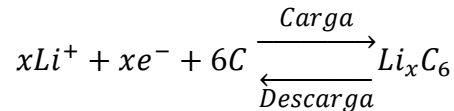
En las siguientes líneas se pretende explicar de forma resumida y simple las reacciones y los procesos químicos que se dan en las celdas tipo LMO, que son una de los tipos más utilizados en automoción, en concreto los vehículos eléctricos puros.

Durante la carga de la celda, el ion Li⁺ abandona el compuesto LiMn₂O₄ y a través del electrolito pasa al ánodo de grafito. Durante este proceso, el ánodo se ve reducido químicamente, y los iones de litio se intercalan entre la estructura del grafito.

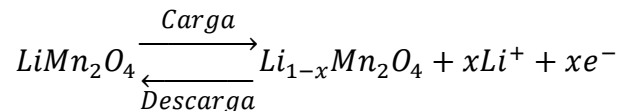
Durante la descarga, el grafito pierde iones de litio que tras pasar por el electrolito se combinan de nuevo en el electrodo positivo con LiMn_2O_4 . En realidad, se produce el proceso contrario a la carga.

Para expresarlo de forma química, a continuación se recogen las reacciones para el ánodo y el cátodo. También se muestra la reacción global de la celda [Jiang, 2015].

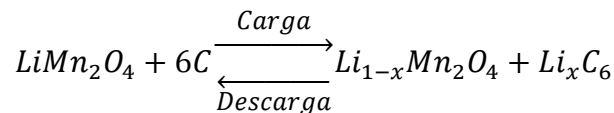
- Para el electrodo negativo (ánodo):



- Para el electrodo positivo (cátodo):



A partir de las dos reacciones anteriores, se obtiene la reacción global de la batería de litio LiMn_2O_4 -grafito:



2.5 Procesos de carga y descarga

Los procesos de carga y descarga de una batería de litio constituyen uno de los condicionantes más importantes para determinar su capacidad efectiva y otros aspectos que varían ligeramente en función de cómo se produzcan las cargas y las descargas.

En estos procesos se utilizan algunos términos prácticos muy utilizados en la industria del almacenamiento. Uno de ellos es la intensidad de corriente C o tasa C . La **tasa C** representa la **intensidad de corriente** nominal de descarga una batería en el **tiempo de una hora** calculada a partir de su capacidad nominal [Root, 2011].

La tasa C se suele utilizar en forma de múltiplos o fracciones, dependiendo de la corriente de carga o descarga de que se trate. Por ejemplo, para una batería de 2,6Ah de capacidad, la tasa de descarga C es equivalente a descargar la batería en una hora con una corriente de 2,6A. Una tasa de descarga 0,5C equivale a descargar la batería con 1,3A. En definitiva, la tasa C indica la rapidez con la que se está cargando o descargando una batería relativamente a su capacidad nominal, independientemente del valor de ésta.

En los procesos de carga y de descarga la tasa C determina la rapidez de dichos procesos. Para los procesos de descarga, una tasa C alta significa una descarga rápida de la batería, que debido a las pérdidas por la resistencia interna se traduce en una cantidad menor de energía que si se hubiese descargado la misma batería a una tasa C menor.

En la figura 99 se muestra la descarga de una batería de tipo LMO a diferentes tasas C y la correspondencia con la energía obtenida. Como se puede observar, la energía obtenida es mayor cuanto más lenta sea la descarga, es decir, con C bajas. Por contrapartida, cuanto más rápida es la descarga (C alta) menor energía puede proporcionar la batería [Nazri, 2009].

En la **curva de descarga** de una batería se pueden diferenciar **tres zonas**. Estas son, una primera llamada de **activación**, una segunda denominada **óhmica**, y finalmente, una tercera de **caída libre de tensión** [Root, 2011].

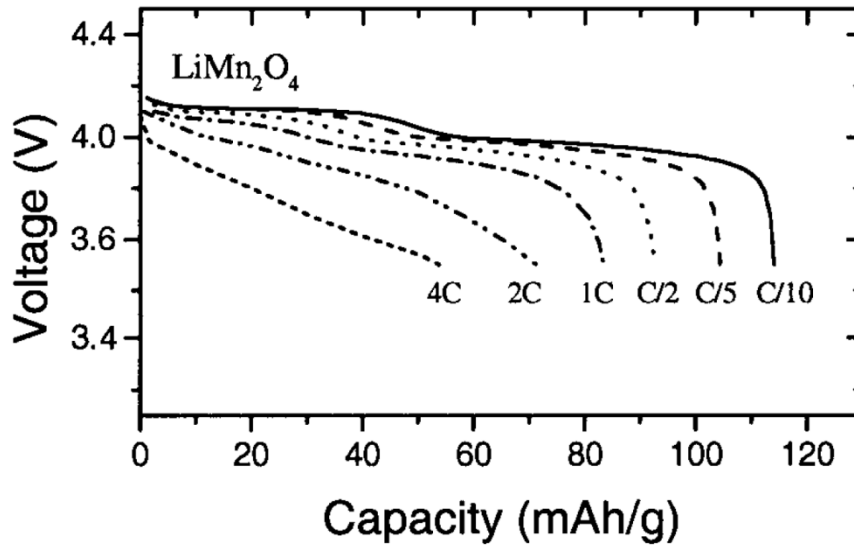


Fig. 9. Diferentes curvas de descarga para una batería LMO [Nazri, 2009]

La **primera región** también se denomina como activación por la polarización. En esta zona se produce una caída de tensión en bornes de la celda o batería con una pendiente exponencial. Suele ocupar una zona muy pequeña de la curva de descarga y tiene su origen en los procesos químicos de activación de la propia batería.

La **segunda zona de la curva** se denomina zona óhmica o lineal. En este tramo, que suele ocupar la mayor parte de la curva se produce una caída de tensión en la celda proporcional al consumo de corriente que se realice. En esta zona se cumple la ley de Ohm, de ahí el nombre, siendo la resistencia la presentada por la batería y por la carga.

Por último, existe una **tercera zona** denominada de caída libre de tensión, donde la tensión desciende abruptamente, debido a la reducción de la concentración de iones en el cátodo. Este proceso ocurre cuando la batería está próxima a descargarse completamente y la polarización no es capaz de mantener la tensión entre los bornes de la celda.

En la figura 10 [Root, 2011] se puede observar una curva de descarga de una batería tipo con las tres zonas indicadas.

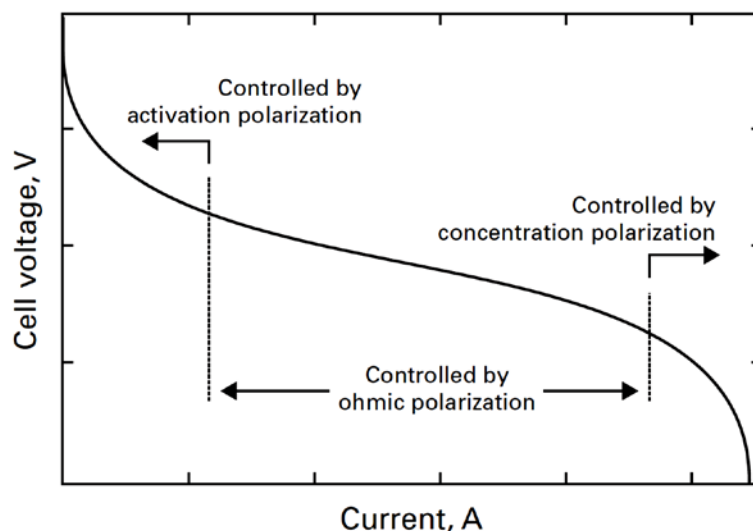


Fig. 10. Curva de descarga con las tres zonas diferenciadas [Root, 2011]

Al igual que al resto de baterías, no conviene hacer descargas muy profundas a las baterías de iones de litio. Normalmente, las baterías de litio traen incorporados circuitos de protección contra sobre-

descargas y sobrecargas como se explica en el apartado 2.6. Estos dispositivos suelen desconectar la batería cuando la tensión de la misma alcanza unos determinados valores indicados por el fabricante (aproximadamente 2,70 V/celda) [Buchmann, 2013].

Durante el **proceso de carga de una batería** de iones de litio también es necesario tener en cuenta el término C durante todo el proceso. Al contrario que muchos tipos de baterías, en las baterías de litio es necesario realizar una carga controlada con unos determinados parámetros. Para ello, será necesario un cargador específico que proporcione las características de carga necesarias.

Los **cargadores** de este tipo siguen la curva de la figura 11, donde se puede observar el proceso de carga completo y también de flotación de la batería una vez cargada. La tensión de carga que ofrecen los cargadores de las baterías de litio suele ser aproximadamente 4,20V/celda (depende de la tecnología) y la corriente de carga suele estar impuesta por el fabricante, siendo diferente en función del tipo de batería considerada, aunque lo más normal suele ser 0,5C en carga normal y 1C en carga rápida [Buchmann, 2013].

Durante el **proceso de carga** se distinguen hasta **tres etapas diferentes**. En la **primera etapa** se aplica una corriente de carga constante hasta que la celda alcanza su tensión nominal de carga. Los valores de corriente de carga, así como la tensión de carga, pueden variar de unas a otras baterías por lo que no se pueden especificar unos valores determinados en términos absolutos. La corriente de carga en esta primera etapa suele ser el valor C (es decir, se produciría la carga nominal de la batería en una hora, de mantenerse el tiempo suficiente).

La **segunda etapa** se denomina de saturación de carga, ya que consiste en reducir la corriente de carga con el objetivo de que la tensión en bornes de la celda se mantenga constante. En realidad, en esta etapa se termina de cargar la batería en forma de carga lenta, por lo que es la etapa más larga en el proceso de carga. Normalmente, se considera que la batería está cargada, o que se ha terminado el proceso de carga, cuando la corriente es inferior al 3-5% de la tasa C [Buchmann, 2013].

A partir de esta etapa, la batería de iones de litio está cargada. Sin embargo, si se pretende mantener la **batería en flotación**, algunos cargadores ofrecen la posibilidad de recargar de forma intermitente con corrientes muy pequeñas para reponer las posibles variaciones de carga que se producen por la autodescarga de la batería.

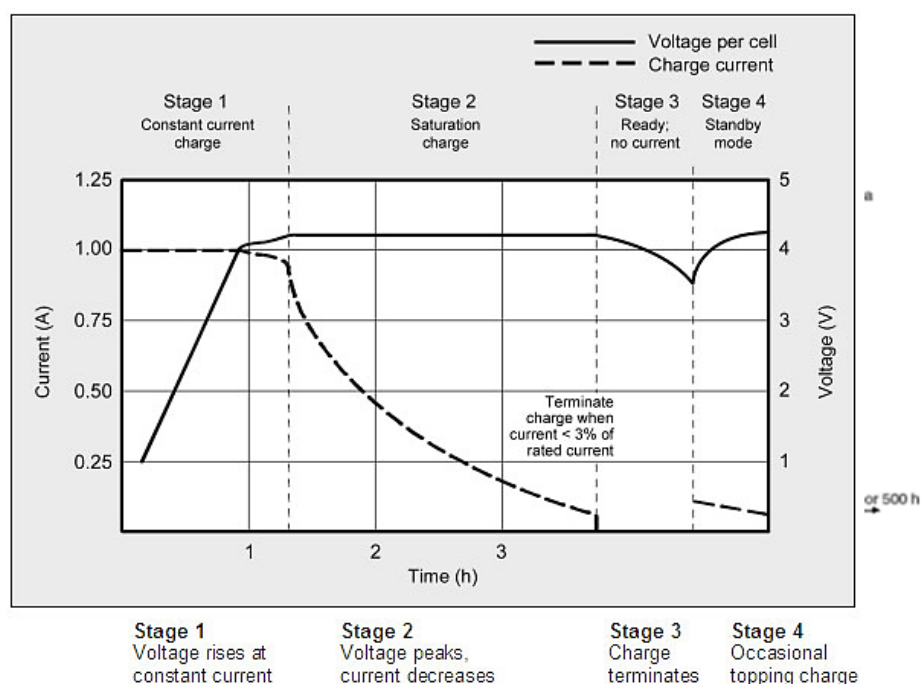


Fig. 11. Proceso y etapas en la carga de una batería de Li-ion [Buchmann, 2013]

Una ventaja que presentan las baterías de iones de litio es la carga rápida sin afectar a su capacidad de almacenamiento de energía a largo plazo. Para realizar este tipo de cargas se suele aplicar una corriente más alta de la habitual en la primera etapa, alcanzando antes el nivel de tensión máxima. En consecuencia, la segunda etapa tomará más tiempo para llegar al 100% de carga, si bien en conjunto se acorta el tiempo total de carga.

Si se prescinde de la segunda etapa de carga, es decir, desconectando a la batería según finaliza la etapa 1, la carga de la batería rondará el 70% aproximadamente y en función de la batería considerada. Esto supone una gran ventaja respecto del resto de baterías [Buchmann, 2013].

A modo de ejemplo, se puede observar en la tabla 4 los datos proporcionados por el fabricante SAMSUNG para la celda de Li-ion modelo ICR18650-26F. La tabla recoge los diferentes programas de carga que acepta la celda, así como el resto de condiciones y la capacidad relativa a la global de la celda obtenida. Como se puede ver, una carga lenta (0,2C) proporciona una capacidad relativa del 100% mientras que otra más rápida a 2C proporciona solamente el 80%. Los tiempos de carga también se indican, siendo unas 7 horas para la más lenta y 2,5 horas para la más rápida.

Tabla 4. Condiciones de carga para SAMSUNG ICR18650-26F

	Charge Condition			
Current	0.2C (520mA)	0.5C (1300mA)	1.0C (2600mA)	2.0C (5200mA)
Cut-off	7h or 0.05C	2.5h or 0.05C	2.5h or 0.05C	2.5h or 0.05C
Relative Capacity	100%	95%	90%	80%

2.6 Protección y módulos de gestión

Como se ha mencionado en apartados anteriores, las baterías de iones de litio tienen una alta densidad de energía y son ideales para aplicaciones cíclicas. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentra la necesidad de incorporar circuitería electrónica para la gestión de carga y descarga, así como protección de la propia celda.

El sistema de protección y control de las celdas de litio que permiten garantizar el funcionamiento de estas de forma segura se denomina **Battery Management System** (BMS). El módulo BMS de las baterías controla la tensión y corriente máxima y mínima de cada una de las celdas, para evitar que éstas puedan sufrir daños irreversibles debido a sobrecargas y sobredescargas. Además, algunos de estos módulos tienen incorporada una función de medición de temperatura para prevenir el envejecimiento prematuro de las celdas cuando trabajan fuera del intervalo idóneo de temperaturas [Julien, 2016].

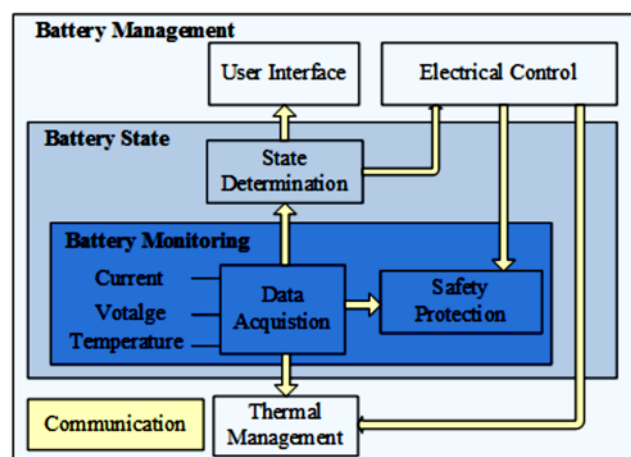


Fig. 12. Esquema general de un sistema BMS [Xing, 2011]

Las **características** deseables en un **equipo BMS** deben ser al menos las siguientes que se citan a continuación por orden de importancia [Andrea, 2010]:

- Prevenir que la tensión de cualquiera de las celdas que conforman el pack exceda los límites de seguridad fijados por el fabricante.
- Prevenir que la temperatura de cualquiera de las celdas que conforman el pack exceda los límites fijados para su rango de operación disminuyendo o deteniendo la corriente que circula por la batería. También puede accionar el sistema de refrigeración si dispone de ello.
- Prevenir la descarga en exceso de las celdas que conforman el pack de baterías alertando del bajo nivel de SOC o deteniendo, incluso, la descarga de las mismas.

Los sistemas BMS se pueden clasificar desde el punto de vista de organización de los elementos hardware en tres tipos: centralizados, distribuidos y modulares. Sin embargo, las funciones de los BMS en cada caso son similares, afectando cada forma organizativa al precio y número de equipos [Xing, 2011].

Aunque las funciones entre módulos BMS son similares, dependiendo del precio se pueden encontrar equipos sencillos y otros con características ampliadas. En la tabla 5 adaptada de [Xing, 2011] se comparan tres modelos diferentes.

Tabla 5. Comparación entre diferentes productos comerciales BMS [Xiang, 2011]

	Maxim DS2726	TI BQ78PL114	OZ890
Parámetros controlados (celda)	Tensión, corriente	Tensión, corriente, temperatura, impedancia	Tensión, corriente
Parámetros controlados (pack)	N/A	N/A	Temperatura
Protecciones	Sobretensiones Sobrecorriente Cortocircuito	Sobrepotencia Cortocircuito	Sobretensiones Sobrecorriente Cortocircuito Temperatura
Registro de datos	N/A	PC conectado	EEPROM
Comunicación	N/A	LAN o SMB	CAN
Estimación SOC	No	Sí	Sí

La utilidad más importante de los módulos BMS, como se ha mencionado antes, es la carga y la descarga controlada en packs de baterías con muchas celdas, como en el caso de los vehículos eléctricos.

Durante el proceso de carga de un pack (a) puede ocurrir por diversas circunstancias propias a la celda que una de ellas alcance la tensión máxima de trabajo (b). Entonces, el sistema BMS detiene la carga del pack y las tensiones de las celdas tienden a estabilizarse, en el momento que la tensión disminuye, el sistema continuo la carga (c). El proceso se repetirá hasta que todas las celdas se carguen completamente (d, e, f), como se muestra en la figura 13.

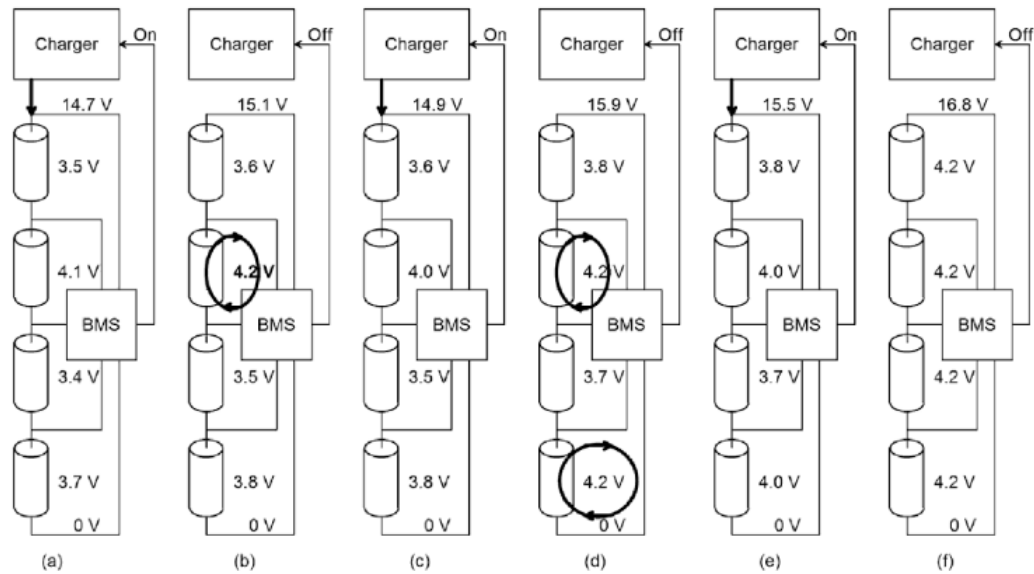


Fig. 13. Proceso de carga balanceada con un sistema BMS [Andrea, 2010]

Del mismo modo, cuando se realiza una descarga balanceada (a), si una de las celdas alcanza su tensión mínima (c), el sistema detiene la descarga hasta que se compense con el resto de celdas o se cargue el pack. El proceso se puede observar en la figura 14.

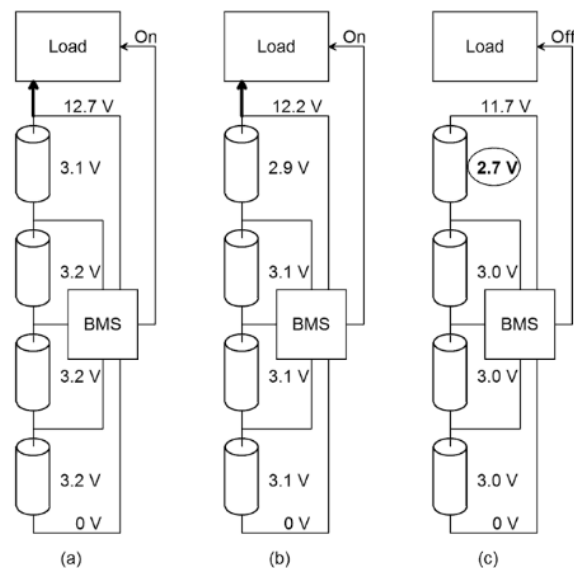


Fig. 14 Proceso de descarga balanceada con un sistema BMS [Andrea, 2010]

Los sistemas de protección y gestión de la carga (BMS) proporcionan una alta seguridad en sistemas que utilizan baterías para aplicaciones de potencia (vehículos eléctricos, SAEs, etc.) y aunque, actualmente demuestran útiles características, su desarrollo continúa para poder aprovechar todo el potencial que poseen.

2.7 Envejecimiento de las baterías de Litio-ion

Todas las tecnologías de almacenamiento electroquímico existentes están afectadas por la pérdida progresiva de capacidad de almacenamiento durante su vida útil. Aunque este deterioro es más lento que en otras tecnologías de baterías, las baterías de iones de litio también están afectadas por el envejecimiento.

El envejecimiento de una batería se traduce en una pérdida de eficiencia originada principalmente por el aumento de las pérdidas en los procesos de carga y descarga, la reducción de la capacidad de almacenamiento y la reducción de la potencia que puede suministrar.

La degradación de la batería de iones de litio se puede describir en términos de pérdida de energía o potencia disponible en la batería. En el caso de la energía, la causa de la capacidad de almacenamiento viene determinada por la cantidad de material que reacciona químicamente y que se ha transformado en un compuesto inactivo desde un punto de vista químico. Por el contrario, la pérdida de potencia es consecuencia de un aumento de la resistencia interna de la batería [Danzer, 2015].

Para poder determinar en qué fase de vida se encuentra una determinada batería existe un parámetro llamado *State Of Health (SOH)*, que traducido al español se denomina estado de salud. El SOH cuantifica la capacidad de la batería para almacenar energía y proporcionar potencia en relación con sus parámetros de fábrica, es decir, al principio de su vida. Para calcular el SOH es necesario determinar experimentalmente la resistencia interna de la batería o la capacidad actual de la misma. A partir de esos datos se puede calcular como [Danzer, 2015]:

$$SOH = 1 - \frac{R_i - R_0}{R_0} \cdot \frac{1}{50\%}$$

$$SOH = 1 - \frac{C_0 - C_i}{C_0} \cdot \frac{1}{20\%}$$

Donde la resistencia inicial y la capacidad son R_0 y C_0 respectivamente. Los valores de resistencia y capacidad calculados experimentalmente son R_i y C_i .

Al no existir una cifra concreta del SOH que defina el fin de vida de una batería, se suele considerar que la batería ha llegado al final de su vida útil cuando no es capaz de cubrir los requerimientos de la aplicación a la que se destina. En el caso de las aplicaciones de tracción eléctrica en automóviles, es muy común expresar la vida de las baterías en función de la capacidad, por lo que se suele considerar que una batería ha llegado al final de su vida útil cuando la capacidad es un 50% de la capacidad inicial.

Aunque parece relativamente sencillo cuantificar el estado de salud de una batería, en realidad, existen multitud de factores que hacen que modelar el envejecimiento sea especialmente complejo. En el proceso de envejecimiento de una batería influyen los ciclos de carga y descarga, la temperatura y la exposición a sobretensiones entre otros. A continuación se detallan algunos de ellos.

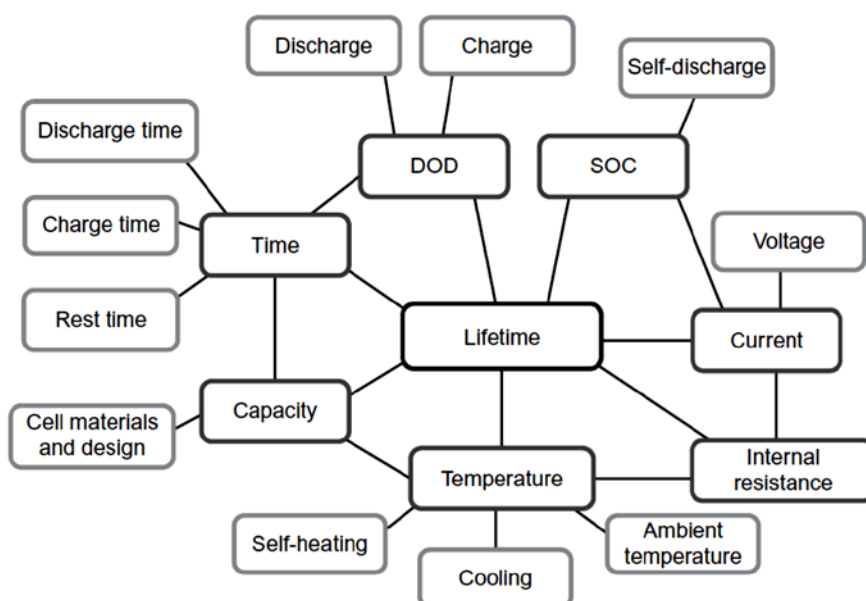


Fig. 15. Parámetros más importantes que influyen en la vida de una batería de Li-ion [Danzer, 2015]

2.7.1 Envejecimiento electroquímico

Los principales procesos que intervienen en el envejecimiento de una celda de iones de litio son aquellos relacionados con la reacción química que ocurre en la celda. Las transformaciones fisicoquímicas que se producen en el electrodo, el electrolito y las interfaces entre ellos, son objeto de innumerables investigaciones y, debido a que proporcionar una descripción detallada de los procesos que se producen se queda fuera del alcance del presente trabajo, solo se detallarán aquellos aspectos más importantes y sus consideraciones para el campo de la automoción.

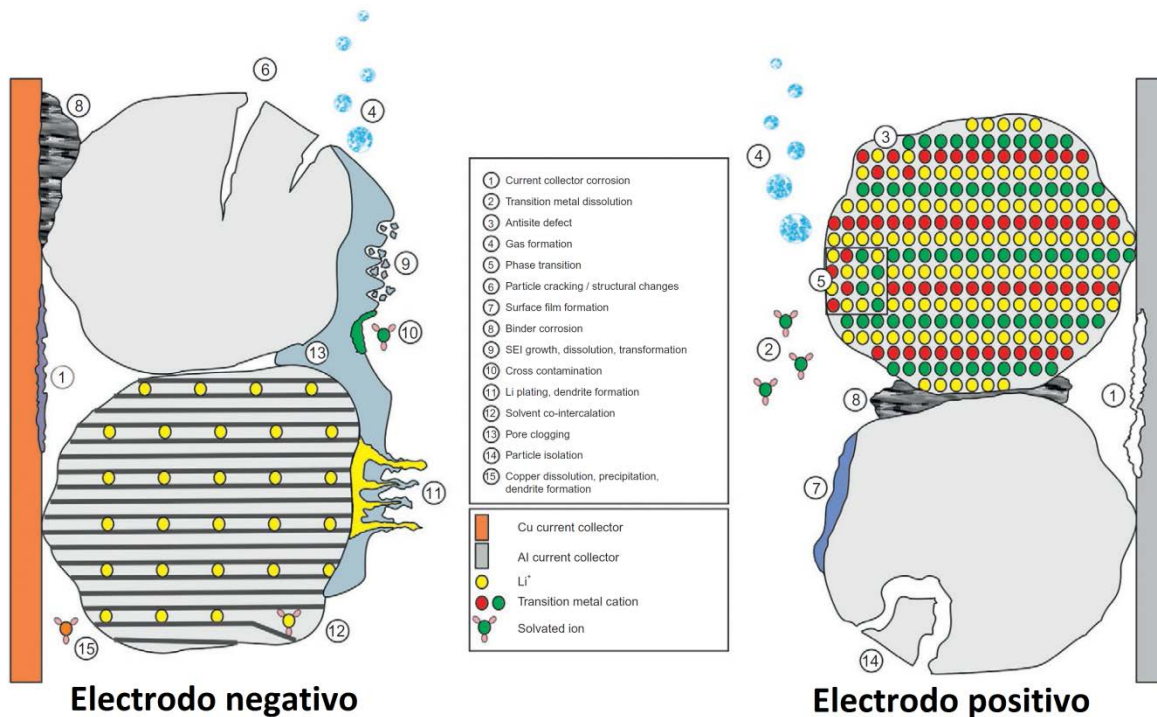


Fig. 16. Principales fenómenos de envejecimiento electroquímico en una batería de Li-ion [Danzer, 2015]

Los principales **mecanismos de envejecimiento** asociados al proceso químico se encuentran ejemplificados en la figura 16. Estos se pueden agrupar en **cuatro categorías**:

1. **Formación de película superficial**, donde se incluye la interfase electrolítica sólida anódica y catódica (SEI) y el recubrimiento de litio residual.
2. **Cambios estructurales**, donde están incluidos los trastornos catiónicos, las transiciones de fase, y otros similares.
3. **Cambios mecánicos**, como el agrietamiento de partículas, el rectificado electromecánico o la formación de gases
4. **Reacciones parasitarias**, tales como la corrosión del colector de corriente así como la degradación del aglutinante.

La pérdida de litio utilizable debido a la formación de SEI anódica, las transformaciones de fase dentro de la mayor parte de los materiales catódicos, la disolución de los metales de transición y la pérdida de contacto entre partículas pueden considerarse como los principales procesos que contribuyen a la pérdida de capacidad de la batería. Por otra parte, el aumento de la resistencia interna de la batería es consecuencia en su mayoría a la formación de películas superficiales en los electrodos [Danzer, 2015].

A la hora de modelar estos procesos de envejecimiento es necesario conocer el tipo concreto de material que se utiliza en la celda a modelar ya que el resultado obtenido depende en su totalidad del comportamiento del material empleado. A modo de ejemplo, hasta hace relativamente poco tiempo era habitual que un tipo concreto de batería de litio utilizase los mismos materiales aunque fuesen de distinto fabricante generando en todas ellas una degradación de similares características. Sin embargo,

en los últimos años, cada fabricante opta por una composición distinta para los materiales de una celda de litio, aunque sean del mismo tipo. Esto dificulta la labor de modelado en este aspecto, ya que cada batería envejecerá químicamente de un modo diferente aunque similar.

2.7.2 Influencia de la temperatura en el envejecimiento

Según diferentes estudios del Departamento de Energía de EE.UU citados por [Danzer, 2015] el rango de temperaturas de operación para una batería de Li-ion se encuentra entre los -30 y 52 °C, mientras que el rango de temperaturas para el almacenamiento es entre -46 y 66 °C. Este amplio rango de temperaturas representa claramente un factor que contribuye al acortamiento de la vida de la batería.

En la figura 17 se puede comprobar la influencia de la temperatura sobre el SOH de una batería de automoción. Como se puede observar, cuanto más alta es la temperatura de operación (p.e. Singapur) más drásticamente disminuye la "salud" de la batería. Por el contrario, en climas fríos (p.e. Moscú) este descenso es más lento.

Sin embargo, las temperaturas bajas influyen de forma más acusada en los procesos de carga y de descarga que las temperaturas altas, como se puede observar en la tabla 6 para la batería SAMSUNG ICR18650-26F. Por tanto, la temperatura es una influencia negativa sobre la batería.

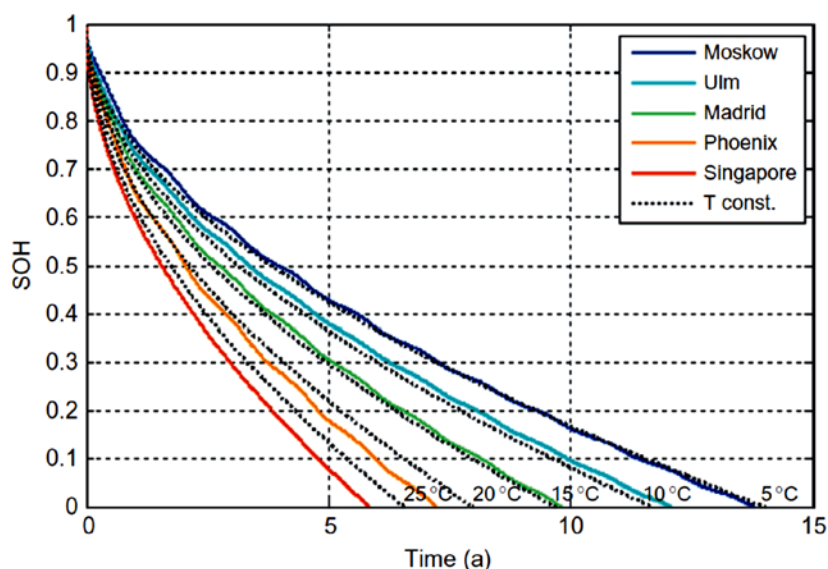


Fig. 17. SOH de una batería Li-ion en función de la temperatura media de diferentes ciudades [Danzer, 2015]

Tabla 6. Capacidad relativa en función de la temperatura para SAMSUNG ICR18650-26F

Charge Temperature	Discharge temperature			
25 °C	-10 °C	0 °C	25 °C	40 °C
Relative Capacity	50%	80%	100%	80%

El envejecimiento es similar para todas las combinaciones de electrodos posibles ya que todos los procesos de envejecimiento, tanto en condiciones de ciclo como de almacenamiento, están influidos por la temperatura. Algunos de los procesos que se aceleran con altas temperaturas son la autodescarga del compartimento anódico durante las condiciones de almacenamiento, la pérdida de litio utilizable, la formación de película superficial en los electrodos y la oxidación electrolítica entre otros.

Sin embargo, cuando se somete a la batería a bajas temperaturas, la elasticidad de las estructuras de electrodo se ve reducida, pudiendo producir una pérdida de integridad del material si se realizan ciclos de carga y descarga prolongados. Además, cuando se realizan cargas rápidas por debajo de los 20°C se produce un fenómeno que recubre con litio los electrodos pudiendo generar problemas de seguridad [Danzer, 2015].

Por tanto, la evaluación del efecto de la temperatura sobre el envejecimiento es una tarea compleja, ya que tanto las fuentes de calor externas como la generación interna de calor influyen de manera activa en los comportamientos internos de la batería, activando diversos procesos que son diferentes en función del tipo de batería y el rango de temperatura considerado.

2.7.3 Influencia de los procesos de carga y descarga en el envejecimiento

Aunque se ha explicado que la influencia de la química y de la temperatura son los principales factores de cara al envejecimiento de una batería, existe otro factor determinado por el uso que se le da. En este sentido, son claves los procesos de carga y de descarga. Entre todos los factores que afectan al envejecimiento de una batería, estos procesos son los más simples de cuantificar y evaluar para poder determinar su influencia en una determinada batería.

Según [Danzer, 2015], mantener a una batería de iones de litio en valores extremos de SOC, es decir, cercanos a la descarga o la carga completa, durante periodos elevados es perjudicial para los componentes internos de la celda. En concreto, mantener altos valores de SOC reduce la estabilidad de ambos electrodos y el electrolito, mientras que con bajos valores de SOC se produce corrosión en los colectores de corriente.

Además, otro efecto perjudicial de cargar una batería de litio hasta el 100% de su capacidad es la acumulación de litio sólido en la superficie del electrodo. La consecuencia directa de esta acumulación es un aumento de la resistencia interna de la celda así como una pérdida progresiva de la capacidad al disminuir la cantidad de litio útil.

En cuanto a la velocidad de los procesos de carga o descarga, se ha observado que el uso de altas velocidades de carga y descarga produce tanto un aumento de la resistencia interna como una disminución de la capacidad de la célula. Las altas corrientes producen una temperatura localizada que puede conducir a la modificación y a la interrupción de las capas superficiales del electrodo.

A mayores, a medida que aumenta la velocidad de carga o descarga, la transformación química requerida en los electrodos (en el cátodo en particular) no puede mantenerse al ritmo de la corriente extraída. Esto provoca gradientes de concentración abruptos, reacciones químicas no deseadas, así como cambios en la morfología de los electrodos que podrían comprometer su integridad, afectando tanto la impedancia interna como la capacidad de la célula.

Finalmente, las sucesivas cargas y descargas también van en detrimento de las propiedades de la batería, notándose más acusadamente en la capacidad de la misma. En el gráfico de la figura 26 se puede observar la pérdida de propiedades conforme avanza el número de ciclos de carga y descarga de la batería.

Este descenso de propiedades es más acusado durante los primeros ciclos, donde la tensión y la capacidad disminuyen de forma más rápida. Conforme el número de ciclos, el descenso de la capacidad y de la tensión en bornes disminuye más lentamente. Se puede estimar entre un 5% y un 3% la pérdida de capacidad entre los primeros 5 ciclos.

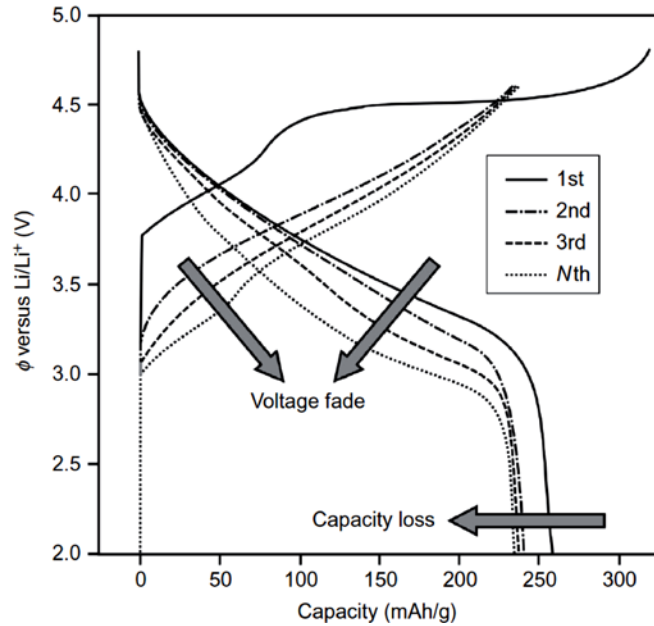


Fig. 18. Pérdida de tensión y capacidad de una batería en función del número de ciclos [Danzer, 2015]

2.8 Aplicaciones de las baterías de Litio-ion

Actualmente, las baterías están presentes en la mayoría de las actividades. En función del tipo de aplicación donde se destine una batería se puede clasificar en uno de estos grandes grupos:

- Aplicación en dispositivos móviles.
- Aplicación industrial.
- Aplicación en automoción.

Desde la aparición comercial de las baterías de litio, el resto de baterías se han visto desplazadas de las funciones que tradicionalmente habían ocupado, en especial entre los dispositivos portátiles (teléfonos móviles, cámaras, portátiles, etc.). Este es el caso de las baterías de los teléfonos móviles, que desde 2004 son en su totalidad de Li-ion. Este es un hito importante ya que las baterías para teléfonos móviles suponen el 81,1% del mercado global [Wu, 2015].

En las aplicaciones industriales se ha producido un gran aumento en el uso de baterías gracias, en parte, a la tecnología Li-ion. Dentro de este apartado se pueden clasificar las herramientas portátiles, dispositivos productivos (autómatas, robots, etc.), almacenamiento de energías renovables no constantes, dispositivos electrónicos de seguridad (alamos, sensores, etc.) entre otros [EUROBAT, 2005].



Fig. 19. Sección y detalle de las baterías del Nissan Leaf

Un ejemplo de aplicación a energías renovables es el llevado a cabo por Endesa y SAFT en las Palmas de Gran Canaria, donde han implantado con éxito en marzo de 2013 un sistema de almacenamiento basado en Li-ion con una capacidad total de 3MWh. Gracias a este sistema, se puede regular de forma más eficaz la generación y el consumo en la isla [Sánchez, 2015].

En cambio, el sector que más se ha favorecido de la llegada y de la mejora continua de la tecnología de Li-ion es el sector de la automoción. Hasta hace relativamente poco tiempo no era fácil encontrar un vehículo 100% eléctrico que pudiese satisfacer los requerimientos de autonomía y prestaciones exigidos por el consumidor. Se habían intentado diversas soluciones con baterías de Plomo-acido sin éxito y con baterías de Ni-MH con un éxito parcial.

Las baterías de litio han permitido el desarrollo de los vehículos eléctricos e híbridos. Esto ha sido posible gracias a las características que presentan las baterías de iones de litio y a sus diversas orientaciones: alta potencia, máxima capacidad y larga vida.

En la figura 20 se pueden observar los diferentes rangos de las tecnologías de aplicación en automoción tanto en energía específica como en potencia específica. Para los vehículos híbridos la tecnología actual de Li-ion cubre las necesidades en cuanto a potencia, mientras que para los vehículos eléctricos puros el objetivo de relación entre potencia y energía específica aún no se ha alcanzado, aunque los valores actuales están cerca.

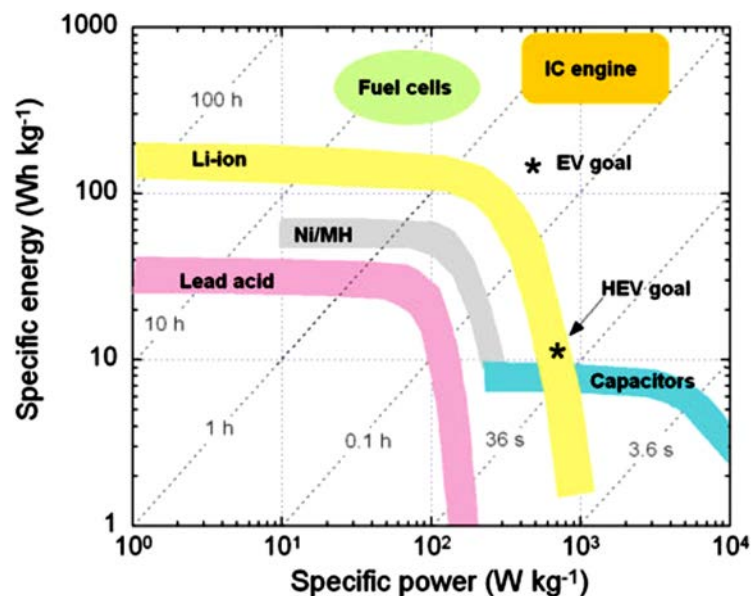


Fig. 20. Gráfico comparativo entre diferentes tecnologías [Julien, 2016]

3. MODELOS PARA BATERÍAS DE LITIO-ION

La llegada del vehículo híbrido y el renacimiento del vehículo eléctrico han traído consigo un aumento de la investigación en el campo del almacenamiento de energía para este tipo de vehículos. Con ellos, es necesario poseer una estrategia eficaz para el control de la energía así como un mecanismo adecuado de estimación de la carga existente en la batería. Además, es deseable conocer el estado de salud de la batería (SOH) que permita mejorar el proceso de carga de la misma [He, 2011].

Para lograr un buen control de la energía y del estado de carga entre otros se han estudiado y se estudian actualmente una serie de modelos matemáticos que permitan simular el comportamiento de las baterías y predecir sus características futuras a partir de datos actuales.

En este capítulo dedicado al modelado de las baterías de iones de litio se expondrán los diferentes modelos existentes que se pueden encontrar en la literatura científica.

3.1 Definición y clasificación de modelos

Un modelo de una batería es un modelo matemático que describe de forma analítica el comportamiento de un sistema real, en este caso la batería de iones de litio, a partir de unos datos de entrada.

Todos los modelos llevan asociados un cierto grado de exactitud que determinará su éxito o fracaso al intentar reproducir el sistema real definido matemática en el modelo. Además, la exactitud de su aplicación a un sistema real en unas determinadas condiciones depende de la fidelidad con la que se construye el modelo y de los valores de las variables utilizadas en el mismo.

Dependiendo del sistema real a modelar, se puede obtener modelos sencillos o complejos. La complejidad depende de la cantidad de parámetros que se incorporen al modelo y de las características propias del sistema real.

En el caso concreto de las baterías de litio, se va a modelar un sistema complejo no lineal, lo que supone que, en función del modelo utilizado, se obtendrá un resultado de aproximación al sistema real. Además, la inclusión de un elevado número de parámetros eleva la exactitud del modelo, si bien al mismo tiempo que dificulta su aplicación e incluso la estimación de los valores adecuados.

La literatura científica actual contiene multitud de procesos y modelos diferentes para las celdas de Li-ion. Dentro de esta variedad, los modelos se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo al tipo de modelo base:

- **Modelos electroquímicos:** Son modelos que se basan en las características constructivas y los fenómenos electroquímicos que se producen en el interior de la celda de la batería. Son capaces de reproducir de forma muy exacta el comportamiento de la celda estudiada. Sin embargo, estos modelos son muy complejos ya que necesitan ecuaciones diferenciales no lineales para reproducir el comportamiento de la celda [Jiang, 2015]. Esto hace que sean difíciles de implementar y requieran una alta carga computacional, lo que se traduce en largos periodos de cálculo en la simulación. Por todo lo anterior, su uso se restringe a actividades muy concretas.
- **Modelos de circuito equivalente:** Son modelos que utilizan elementos eléctricos tales como resistencias, bobinas, condensadores y fuentes de tensión entre otros para simular el comportamiento de la batería. Debido a que los modelos basados en circuitos eléctricos pueden simular los comportamientos fundamentales de un sistema de almacenamiento, estos modelos aportan un buen compromiso entre exactitud y usabilidad [He, 2011]. Además, presentan un diseño más simple que requiere menos carga computacional para los cálculos. Esto los hace muy utilizados en multitud de aplicaciones de diseño, cálculo y simulación de sistemas de almacenamiento.

En el presente trabajo, se detallan en los próximos apartados los modelos existentes en cada grupo poniendo mayor atención en los modelos de circuitos equivalentes debido a su extendido uso y buenos resultados en comparación con la carga computacional requerida.

3.2 Modelos electroquímicos

Los modelos electroquímicos de una celda de iones de litio utilizan el método matemático para describir el proceso de reacciones químicas que ocurren en el interior de la batería basándose en la teoría electroquímica.

En estas líneas se han presentado los modelos electroquímicos existentes más simples en cuanto a implementación de cálculo en ordenador. Los **modelos electroquímicos** que atienden a considerar variables puramente químicas y a modelar los procesos de difusión de electrones en función de los materiales usados presentan un nivel de complejidad mucho mayor, por lo que no se van a describir.

Existen otros **modelos intermedios** tal como los describe [Jiang, 2015] entre los puramente electroquímicos y los de circuito equivalente, que se indican a continuación

El **modelo intermedio más simple** es el de *Peukert*, que expresa que la carga disponible en una batería disminuye con el incremento de la corriente de descarga según la siguiente ecuación [Jiang, 2015]:

$$I^n T_i = cte$$

Donde I es la corriente de descarga, n la constante de la batería y T_i es el tiempo de descarga bajo la corriente I .

El modelo de *Shepherd* fue propuesto en 1965 para describir los procesos químicos que ocurren en una celda a partir de la tensión y corriente existentes. Este modelo electroquímico es muy utilizado para analizar baterías en vehículos híbridos y calcular la tensión y el SOC de la batería en combinación con el modelo de *Peukert*. El modelo se expresa según la siguiente ecuación [Jiang, 2015]:

$$E_t = E_0 - R_i I - K_i \left(\frac{1}{1 - DOD} \right)$$

Donde E_t es la tensión en bornes de la celda, E_0 es la tensión de circuito abierto de la celda totalmente cargada, R_i es la resistencia interna, K_i es la resistencia de polarización e I la corriente de descarga.

El modelo de *Shepherd* se puede aplicar a corrientes pequeñas de descarga constantes y es capaz de encontrar el punto donde la tensión en bornes comienza a descender rápidamente, es decir, el comienzo de la tercera región de la curva de descarga de una batería vista en la figura 9 del apartado 2.5. Conocer este punto de caída de la tensión es importante para mantener la región de trabajo lejos de este punto.

Sin embargo, el modelo de *Shepherd* supone en algunos casos cálculos complejos. Por ello, *Unnewehr y Nasar* [Jiang, 2015] han simplificado el **modelo en tres ecuaciones**: una para la tensión de trabajo, otra para la tensión de circuito abierto y otra para la resistencia equivalente de la celda:

$$E_t = E_0 - R_i I - K_i DOD$$

$$E_{oc} = E_0 - K_i DOD$$

$$R = R_0 - K_R DOD$$

En este caso, E_{oc} es la tensión en circuito abierto, R_0 es la resistencia interna medida a carga plena de la celda, K_R es una constante hallada de forma experimental y R es la resistencia equivalente de la batería para un nivel de carga determinado. El resto de elementos de las ecuaciones mantienen la misma denotación que en el resto de ecuaciones presentadas.

A partir de esta simplificación, *Nerst* desarrolló un modelo de dos ecuaciones que proporciona mayor exactitud en los resultados. Sin embargo, una mayor exactitud en los resultados viene asociada con la

introducción de un número mayor de parámetros base al modelo. Las ecuaciones de *Nerst* son [Jiang, 2015]:

$$E_t = E_i - R_i I + K_i \ln(DOD)$$

$$E_t = E_o - R_i I + K_i \ln(DOD) + K_j \ln(1 - DOD)$$

El último modelo presentado en este trabajo es el propuesto por *Plett* de la Universidad de Colorado. Este modelo, se puede considerar una síntesis de todos los modelos electroquímicos anteriores. Sin embargo, la complejidad de los cálculos se multiplica puesto que utiliza cinco coeficientes que hay que determinar experimentalmente y es necesario conocer previamente el estado de carga (SOC) de la celda a estudiar. La ecuación principal del modelo es [Jiang, 2015]:

$$U_L = K_0 - R I_L - \frac{K_1}{SOC} - K_2 SOC - K_3 \ln(SOC) + K_4 \ln(1 - SOC)$$

Donde U_L es la tensión bajo carga en la celda, I_L es la corriente bajo carga, R es la resistencia equivalente de la batería y, finalmente, K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 son los coeficientes del modelo.

Tabla 7. Resumen de los modelos electroquímicos intermedios [He, 2012]

Modelos electroquímicos intermedios para baterías de Litio-ion	
Sheperd	$E_t = E_o - R_i I - K_i \left(\frac{1}{1 - DOD} \right)$
Unnewerh y Nasar	$E_t = E_o - R_i I - K_i DOD$
Nerst	$E_t = E_o - R_i I + K_i \ln(DOD) + K_j \ln(1 - DOD)$
Plett	$U_L = K_0 - R I_L - \frac{K_1}{SOC} - K_2 SOC - K_3 \ln(SOC) + K_4 \ln(1 - SOC)$

3.3 Modelos de circuito equivalente

Dentro de los modelos de circuito equivalente existe una gran variedad. En estas líneas se exponen los **modelos eléctricos** más conocidos para una batería de iones de litio **ordenados de menor a mayor complejidad**. Los tres primeros modelos se corresponden con los modelos clásicos de la literatura científica, posteriormente se tratan dos modelos más complejos en cuanto a cálculos y componentes se refiere, pero que aportan mayor exactitud.

Los componentes utilizados en estos modelos son resistencias para simular la resistencia al paso de la corriente tanto por los bornes, placas y del resto de elementos internos de la batería, condensadores para representar la capacidad de la batería, fuentes de tensión (simples o dependientes) para proporcionar la tensión en bornes, y en algunos casos, fuentes de corriente o inductancias como se expone más adelante.

Es importante señalar en el caso de los circuitos equivalentes el significado físico que adquieren los componentes eléctricos que se utilizan ya que están asociados a un fenómeno en particular.

3.3.1 Modelo con una resistencia interna

El modelo más sencillo para representar una batería de cualquier tipo es el modelo con una resistencia interna. En este modelo se parte de una fuente de tensión ideal (U_{oc}) que simula la batería y una resistencia (R_o) en serie que simula la caída de tensión interna de la batería al aplicar carga. El esquema y ecuación de este modelo se muestra en la figura 21.

$$U_L = U_{oc} - R_o I_L$$

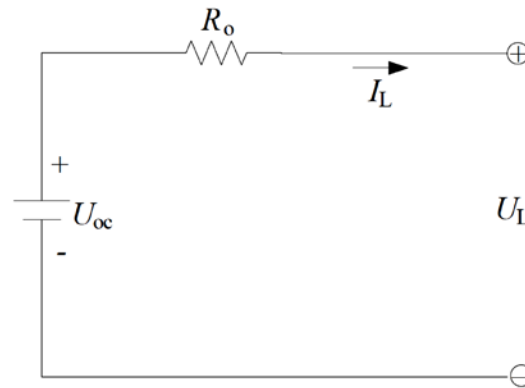


Fig. 21. Ecuaciones y esquema del modelo de resistencia interna [He, 2011]

Este modelo presenta la ventaja de **ser muy simple** y ofrecer unos resultados bastante acertados para descargas constantes en la zona intermedia de la curva de descarga de una batería (zona óhmica).

La tensión resultante en carga es U_L y la corriente que circula por la batería es I_L . El signo de la corriente marca el sentido, de tal forma que, cuando ésta es positiva la batería está descargándose y cuando es negativa la batería estará en proceso de carga.

El valor de R_o depende de la batería y del estado en que se encuentre, por lo que el valor es diferente para cada batería, temperatura y estado de carga, aunque este último solo produce variaciones significativas con bajos niveles de carga [Jiang, 2015]. En la figura 22 se muestran los resultados de caracterización de la resistencia interna en función del SOC.

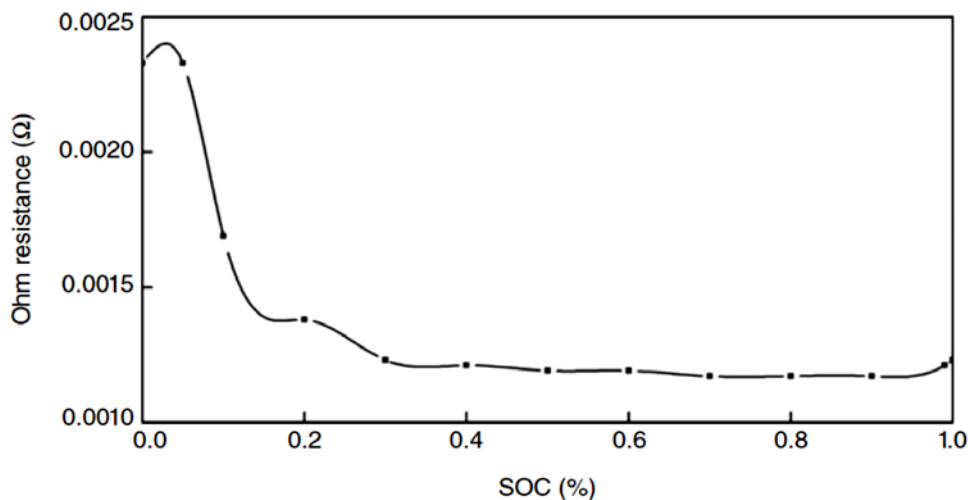


Fig. 22 Variación de la resistencia interna R_o de una batería en función del SOC [Jiang, 2015]

3.3.2 Modelo con un grupo RC en paralelo

El modelo con un grupo RC en paralelo fue propuesto por el fabricante de baterías SAFT y ha logrado obtener unos buenos resultados a través del *software* propio ADVISOR. El modelo contiene, como se muestra en la figura 23, dos condensadores (C_c y C_b) y tres resistencias (R_t , R_e , R_c) para intentar simular el comportamiento de la batería [He, 2011].

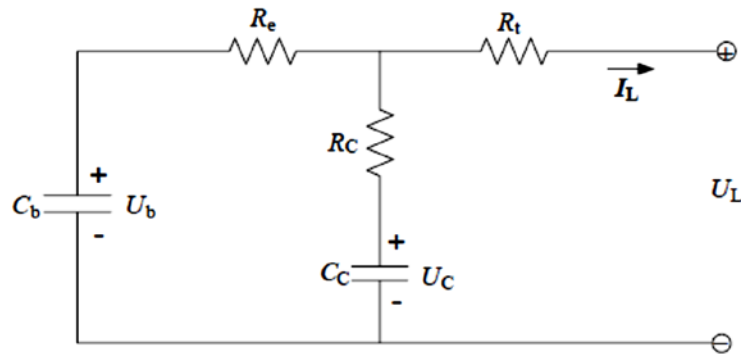


Fig. 23. Esquema del modelo RC desarrollado por SAFT [He,2011]

El condensador C_b tiene un valor muy elevado de la capacidad, a fin de representar el almacenamiento químico de energía de la batería. Por el contrario, el condensador C_c tiene una pequeña capacidad que tiene como función representar los efectos transitorios de la batería. Además, en el circuito se encuentran la resistencia interna (R_e), la resistencia de los terminales de conexión (R_i) y la resistencia asociada al condensador C_c (R_c).

Las ecuaciones para el modelo RC son [He, 2011]:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L]$$

$$[U_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_t & -\frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L]$$

3.3.3 Modelo equivalente de Thevenin

El modelo de *Thevenin* parte del modelo de resistencia interna y añade una red RC en el circuito con el objetivo de reproducir también los comportamientos dinámicos de la batería estudiada. En la figura 24 se muestra el circuito del modelo.

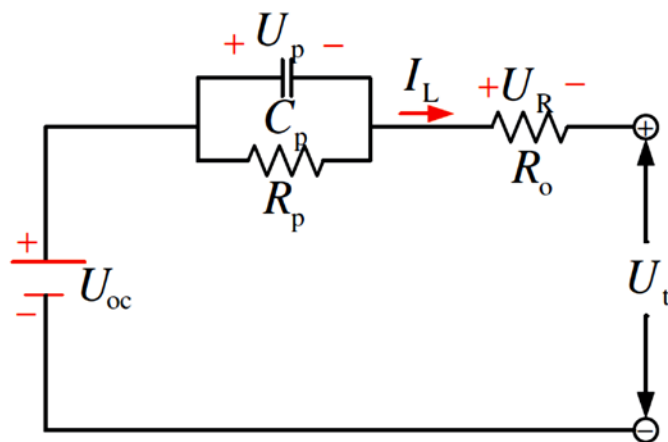


Fig. 24. Esquema del modelo Thevenin [He, 2012]

El circuito del modelo se compone de tres partes diferenciadas. Se pueden distinguir una **fente de tensión** (U_{oc}) que proporciona la tensión en circuito abierto, una **red RC** que tiene una resistencia y un condensador en paralelo y, finalmente una **resistencia en serie** (R_o) que completa el valor de la resistencia interna de la batería.

En la rama RC, la resistencia R_p pretende representar los fenómenos asociados a la **polarización** de la batería, mientras que el condensador C_p se utiliza para describir las respuestas transitorias durante los procesos de carga y descarga [Jiang, 2015].

Las ecuaciones asociadas al modelo son [He, 2011]:

$$\begin{cases} \dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p C_p} + \frac{I_L}{C_p} \\ U_L = U_{oc} - U_p - I_L R_o \end{cases}$$

3.3.4 Modelo PNGV

Se denomina modelo PNGV al modelo propuesto por el programa de cooperación y desarrollo *Partnership for a New Generation of Vehicles*, en el que participan los fabricantes de automóviles Ford, Daimler y General Motors.

El modelo PNGV parte del modelo equivalente de Thevenin y lo modifica añadiendo en serie un condensador con el objetivo de reproducir las variaciones de tensión producidas durante el proceso de carga de la batería [Jin, 2013].

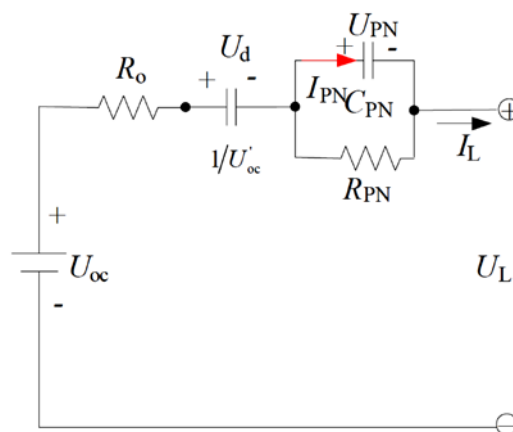


Fig. 25 Esquema del modelo PNGV [He, 2011]

Según [Jin, 2013], el modelo presenta una definición física clara y concisa que, sumado a su buena aplicabilidad, permite simular multitud de ciclos de trabajo para una batería dada obteniendo buenos resultados. Por estos motivos, el modelo PNGV es uno de los más utilizados en el diseño automotriz en la industria norteamericana. Las ecuaciones que definen el modelo PNGV son [He, 2011]:

$$\begin{cases} \dot{U}_d = U'_{oc} I_L \\ \dot{U}_{PN} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \\ U_L = U_{oc} - U_d - U_{PN} - I_L R_o \end{cases}$$

3.3.5 Modelo de polarización dual

El modelo de polarización dual tiene su origen en la investigación de las curvas características de las baterías de iones de litio, en concreto en aquellas que observan los fenómenos de polarización. Es posible realizar una buena aproximación a través del modelo de *Thevenin*, sin embargo, si se quiere dotar al modelo de mayor exactitud es necesario **duplicar la red RC** con el fin de distinguir entre la **polarización electroquímica** de carga y descarga de la referente a la de **concentración química**. Debido a esto, este modelo se denomina de doble polarización, o como se denomina en inglés *Dual Polarization (DP)*.

El modelo se muestra en la figura 26. El modelo DP consta de tres partes: la tensión de circuito abierto U_{oc} ; la resistencia interna R_o y las resistencias de polarización, que incluyen R_{pa} para representar la la polarización electroquímica y R_{pc} para representar la polarización de la concentración; las capacidades C_{pa} y C_{pc} se utilizan para caracterizar la respuesta transitoria durante la transferencia de energía hacia o desde la batería y describir la polarización electroquímica y la polarización de la concentración por separado [He,2011].

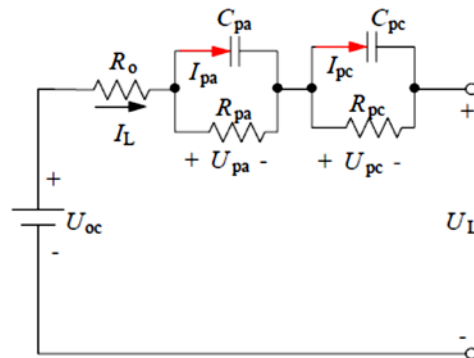


Fig. 26 Esquema del modelo de doble polarización (DP) [He, 2011]

El comportamiento eléctrico del circuito se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones [He, 2011]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa}C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \dot{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc}C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{oc} - U_{pa} - U_{pc} - I_L R_o \end{cases}$$

3.4 Modelos alternativos propuestos por otros autores

El modelado de las baterías de litio es un campo de investigación que actualmente tiene una amplia actividad en las universidades y centros de desarrollo más importantes del mundo. A continuación se pretende recoger alguno de los modelos propuestos por los autores más importantes en este campo.

Lo más habitual suele ser presentar el resultado de simulaciones o experimentos del modelo que exponen y defienden, por lo que dedicaremos las próximas líneas a exponer los resultados obtenidos con los modelos propuestos por cada autor.

3.4.1 Modelo propuesto por Dubarry

[Dubarry, 2007] presenta un modelo universal para baterías, para ello se basa en el modelo de doble impedancia, el cual presenta, calcula parámetros y simula en su artículo. La simplicidad que presenta este modelo a la hora de obtener parámetros mediante Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (ver 4.4.2) es la principal ventaja.

El circuito propuesto se muestra en el figura 27, donde V_o se define como la tensión en circuito abierto de la batería en función del SOC, R_1 es la resistencia interna de la batería (resistencia de borne incluida), R_2 y R_3 se definen como el resto de componentes asociados al comportamiento de la batería.

Para calcular los parámetros del modelo utiliza diversos métodos. En el caso de V_o , el método de calcular los valores de la fuente de tensión consiste en descargar la batería a un ratio de $C/25$, mientras que utiliza un ensayo de espectroscopía para calcular R_1 , R_2 y R_3 , al mismo tiempo que necesita definir R_{exp} que calcula como la diferencia de la tensión de carga menos la tensión de descarga dividida por la

corriente de prueba. Para ello, utiliza los datos de una carga completa contra descarga completa realizados a C/5 y C/3.

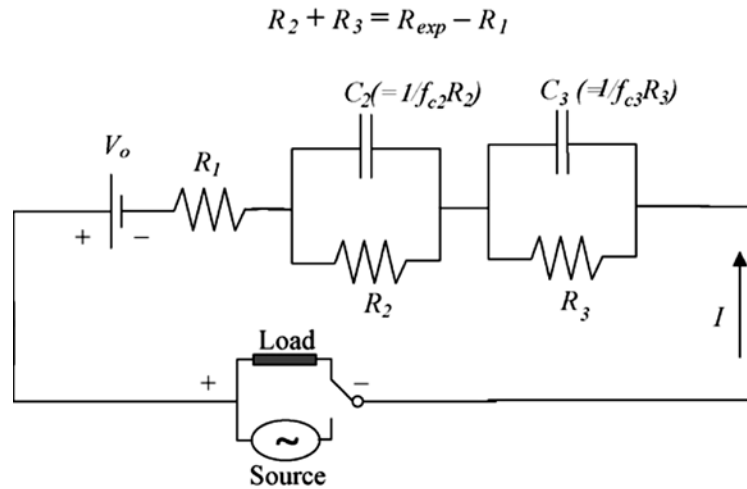


Fig. 27. Modelo propuesto por Dubarry [Dubarry, 2007]

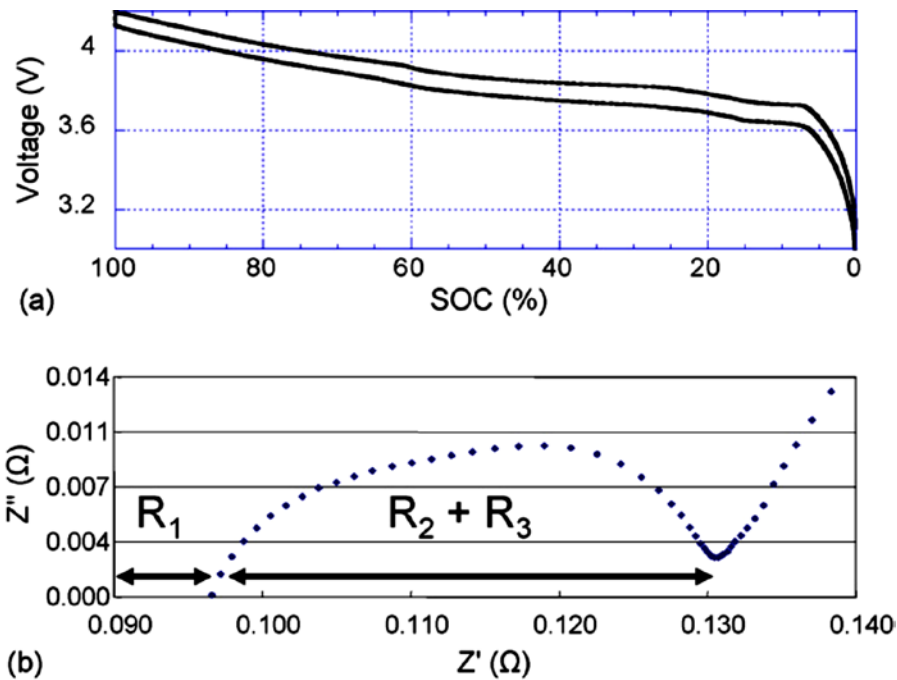


Fig. 28 Ensayos de caracterización del modelo [Dubarry, 2007]

A la hora de calcular los valores de las resistencias del modelo ha utilizado las descargas de las baterías a dos tasas diferentes, C/3 y C/5. Con estos dos mismos modelos, pero con diferentes parámetros pretende demostrar la variación de resultados que se obtienen de la simulación para varios métodos de calcular parámetros.

[Dubarry, 2007] realiza la validación del modelo descargando completamente la batería ensayada a C/2 y 1C, tal como se muestra en la figura 29. En la figura mencionada, las curvas (a) y (d) representan la evolución de la tensión obtenida de la descarga experimental para C/2 y 1C respectivamente. Las curvas (b) y (e) son los resultados obtenidos de las simulaciones a partir de los parámetros obtenidos a una corriente de descarga de C/3. Finalmente, las curvas (c) y (f) corresponden a los resultados de la simulación con los parámetros de la descarga de la batería a C/5.

Los resultados obtenidos muestran que para valores de estados de carga (SOC) superiores al 60% el modelo propuesto no reproduce adecuadamente el comportamiento obtenido experimentalmente para corrientes de descarga grandes. En el caso de descargas lentas, el modelo parece ajustarse mejor, aunque no garantiza precisión en las últimas etapas de la descarga.

Por una parte, el autor asocia estas diferencias a cambios en el potencial electroquímico de la celda, pero por otra, una parte importante de estas variaciones de resultados pueden ser debidas a que la estimación de la relación entre la tensión circuito abierto y el SOC, y las resistencias se realizan sin medir la tensión de circuito abierto después de un tiempo de reposo.

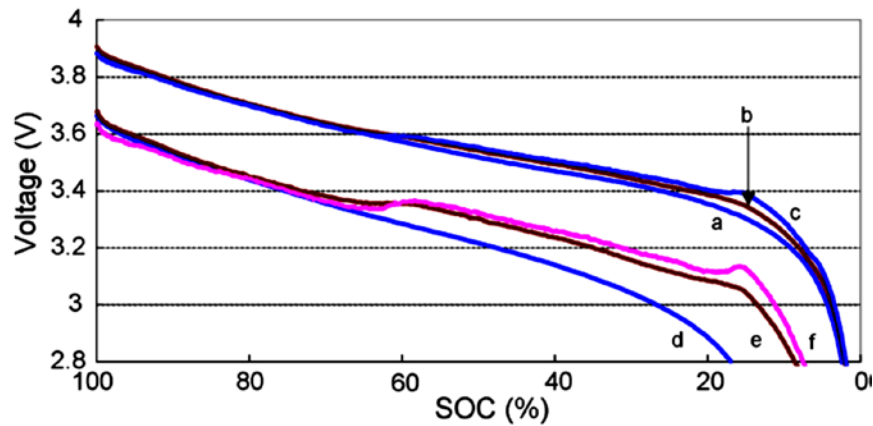


Fig. 29. Resultados obtenidos en la simulación del modelo de Dubarry [Dubarry, 2007]

En otras validaciones del modelo, utiliza los datos obtenidos en C/3 para simular una descarga y carga constante a C/5, y también a la inversa, utiliza datos de los ensayos a C/5 para simular una descarga y carga a C/3. En estas validaciones obtiene unos buenos resultados, por lo que se podría decir que el método experimental utilizado junto con el modelo DP ofrecen buenos resultados en descargas lentas.

3.4.2 Modelo propuesto por Chen

Bajo el objetivo de encontrar un modelo de simulación de baterías que permita a los diseñadores predecir y optimizar el funcionamiento en ciclo de las baterías, [Chen, 2006] propone un modelo que introduce componentes no lineales para reproducir el comportamiento no lineal y la respuesta transitoria de la batería.

El modelo, que se observa en la figura 30, consiste en dos circuitos separados, relacionados entre sí por una fuente de tensión controlada por tensión y una fuente de corriente controlada por corriente. Este segundo circuito sirve para modelar la capacidad de almacenamiento de energía de la batería y la carga almacenada durante los procesos de carga o descarga. El circuito con la fuente de tensión reproduce la resistencia interna de la batería y el comportamiento transitorio ante distintas cargas [Iglesias, 2013].

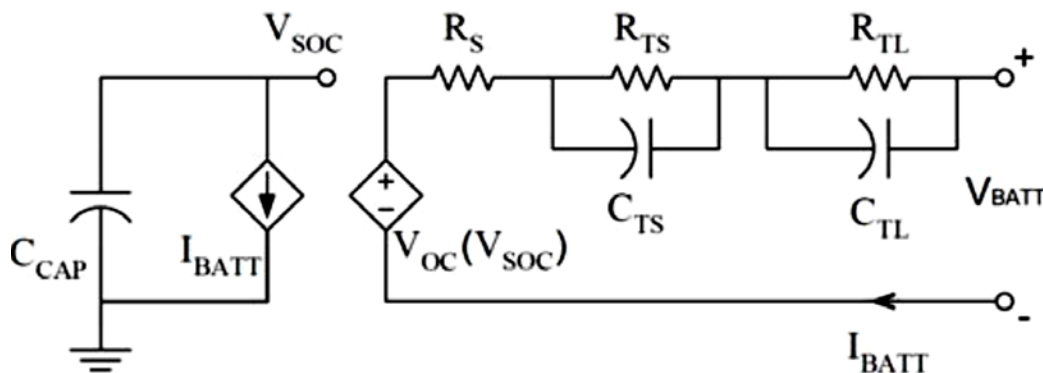


Fig. 30. Modelo propuesto por [Chen, 2006]

Para obtener una aproximación de la relación no lineal $V_{OC}(SOC)$ se realizan una serie de ciclos de descarga mientras se monitoriza el voltaje e intensidad. La descarga se realiza a intensidad constante de forma que el cálculo del SOC es trivial. Para la medida de la tensión se deja reposar la batería en

cada uno de los puntos de toma de datos. Para el cálculo de R_s se aprovecha la descarga constante tomando medidas en los mismos puntos.

Para los datos de las redes RC se supone que el periodo de descarga previo al periodo de reposo es lo suficientemente largo como para que los términos exponenciales de la red RC sean despreciables, y dado que durante el periodo de reposo la intensidad proporcionada por la batería es nula, la tensión en bornes de la batería. En el caso de la capacidad C_{CAP} , el valor se asigna en función de la capacidad de la batería en faradios, siempre teniendo en cuenta que el valor varía junto con el SOC.

Las validaciones del modelo que realiza Chen se realizan utilizando diferentes perfiles de corrientes de descarga. En la figura 31 y en la tabla 8, se pueden observar los resultados obtenidos por Chen, donde según el autor, el error obtenido por el modelo es como máximo 20mV. Además, el autor ha realizado las pruebas para baterías de NiMH y de iones de litio, obteniéndose en ambos casos resultados muy parecidos.

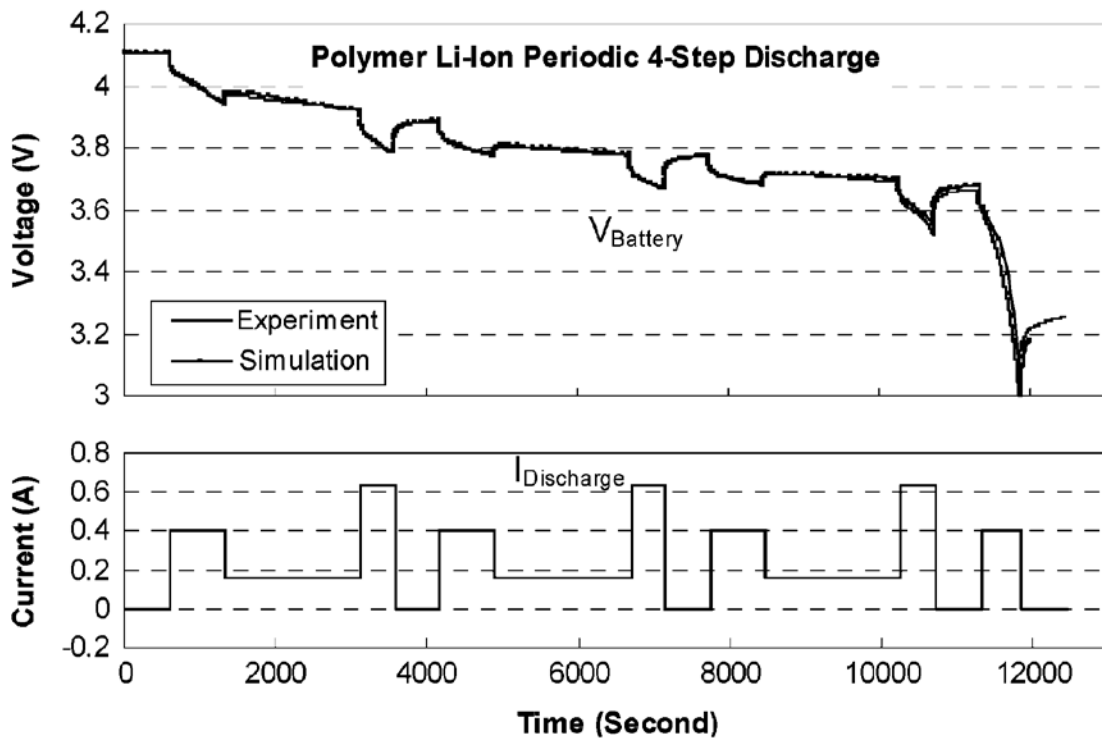


Fig. 31 Perfil de descarga con valores experimentales y simulados para una batería Li-ion [Chen, 2006]

Tabla 8. Resultados obtenidos de la validación del modelo para una batería Li-ion [Chen, 2006]

Load Profiles	Max Error Voltage (mV)	Runtime Error (%)
Continuous Discharge	15	0.395%
Pulse Charge	30	0.133%
4-Step Discharge	20	0.338%

Por otra parte, [Iglesias, 2013] ha realizado diversas pruebas con el modelo propuesto por [Chen, 2006] y los resultados obtenidos (tabla 9) poseen mayor error absoluto que los publicados por el propio Chen. Es necesario comentar, que Chen realizó una mejor caracterización de la relación entre la tensión V_{oc} que Iglesias, por lo que esta puede ser la razón principal de la diferencia de valores.

En cualquier caso, el modelo propuesto por Chen parece funcionar correctamente en un amplio rango de valores y para diferentes tipos de baterías, así como fabricantes. Esto hace pensar que es un modelo robusto que ofrece buenos resultados, sin embargo, su implementación computacional así como la obtención de los parámetros puede resultar costosa para determinadas aplicaciones donde no es necesaria tanta precisión.

Tabla 9. Resultados de la validación del modelo [Iglesias, 2013]

TABLA III. PRECISIÓN DEL MODELO		
I descarga pulsante (A)	Error de tensión máximo (mV)	Error* (%)
5	105	0.25
2	810	1.75

 (*) Error = $|\text{simulación} - \text{experimental}| / \text{experimental}$

4.3.3 Modelo propuesto por Tremblay

[Tremblay, 2009] propone un modelo generalista que permita simular una batería de cualquier tipo. Para ello parte del modelo de la resistencia eléctrica y que complementa con las ecuaciones del modelo electroquímico simple de *Shepherd* para poder incluir en el modelo los fenómenos de polarización. Este modelo puede resultar interesante puesto que está específicamente diseñado para facilitar la simulación mediante MATLAB/Simulink.

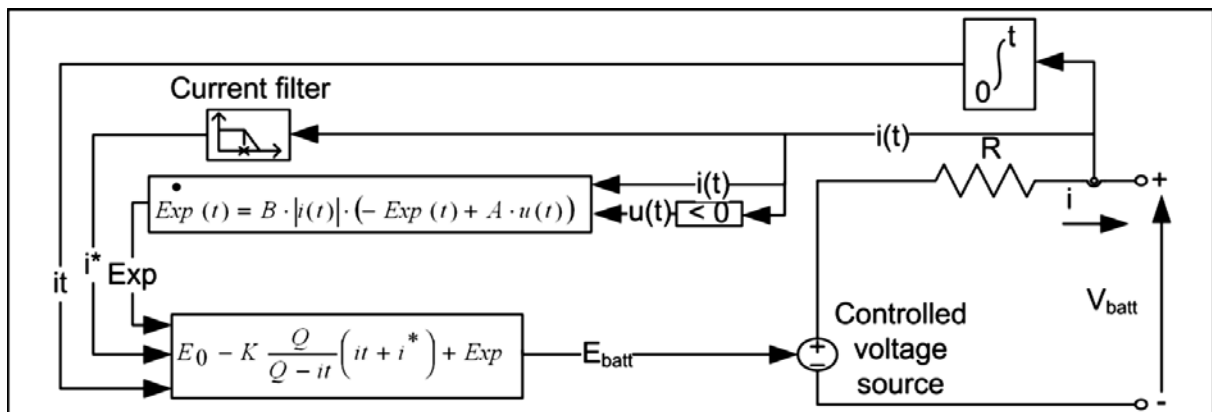


Fig. 32. Modelo propuesto por Tremblay implementado en Simulink [Tremblay, 2009]

En su artículo, el autor explica el modelo siguiendo las ecuaciones de una batería de Ni-MH, pero la demostración es válida y aplicable a las baterías Li-ion. En el artículo, el autor hace mención a los efectos de histéresis que sufren las baterías Pb-Ácido, Ni-MH y Ni-Cd, pero en el caso de las baterías de iones de litio no aparece este efecto, por lo que no se considera.

Las baterías de Pb-Ácido y de Li-ion permiten modelar de la misma forma el fin de carga, en inglés *end of charge* (EOC), ya que el voltaje aumenta rápidamente cuando la batería alcanza la carga completa. Esto se puede modelar mediante la resistencia de polarización porque **cuando la batería está en el proceso de carga, la resistencia de polarización es prácticamente nula hasta que la batería se aproxima a valores de carga completa**, en ese instante la resistencia de polarización aumenta abruptamente. De forma teórica, la resistencia de polarización con un SOC del 100% es infinita aunque en el modelo se disminuye un 10% para salvar las indeterminaciones a la hora de realizar los cálculos.

De la misma forma, ambas baterías también comparten la caída abrupta de la tensión para estados de baja carga. En este caso, el proceso se modela con una ecuación exponencial de la corriente y constantes temporales dadas a partir de la experimentación previa con la batería y prescindiendo de la reducción del 10% en el término de la resistencia de polarización.

De esta forma, [Tremblay, 2009] propone las siguientes ecuaciones para las baterías de iones de litio:

➤ Carga:

$$V_{batt}(t) = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A^{-B \cdot it}$$

➤ Descarga:

$$V_{batt}(t) = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A^{-B \cdot it}$$

Donde V_{batt} es la tensión en bornes, E_0 la tensión nominal de la batería, K la constante de polarización, Q la capacidad de la batería, it la carga de la batería en un momento dado, A constante exponencial de amplitud, B constante de tiempo inversa, R resistencia interna, i corriente de la batería e i^* es la corriente filtrada (por necesidades de implementación en Matlab).

El modelo presentado asume que la resistencia interna es constante, que la batería no se ve afectada por una autodescarga, que la batería no envejece y por ende, no tiene una pérdida de capacidad con cada ciclo, no se ve afectada por los cambios de temperatura y que la batería no tiene efecto memoria.

En cuanto a limitaciones propias del modelo destaca las sobrecargas, ya que no es posible simular con este modelo un proceso de sobrecarga en la batería en cuanto a términos de carga almacenada se refiere, puesto que se pueden simular tensiones de hasta el doble de la nominal definida.

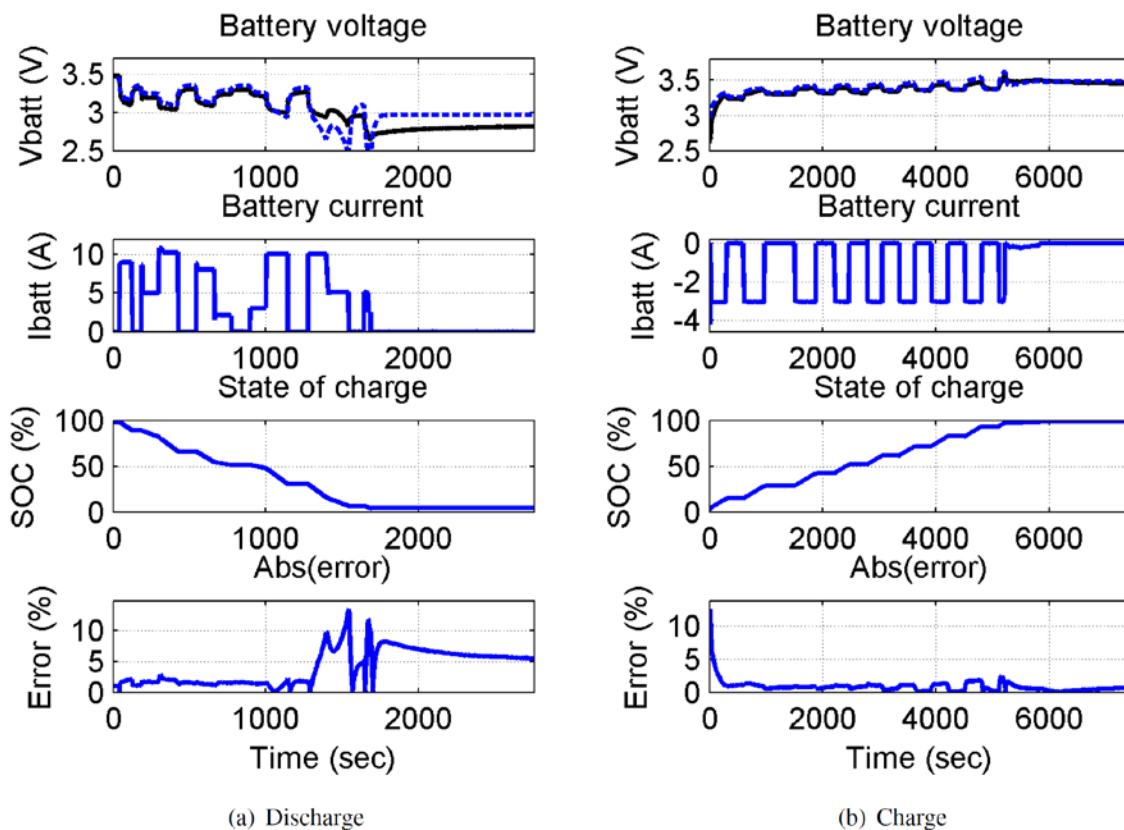


Fig. 33 Descarga (a) y carga (b) para una batería Li-ion de 2.3Ah y 3.3 V [Tremblay, 2009]

La validación dinámica del modelo realizada por el autor demuestra que funciona correctamente pese a que la determinación de algunos parámetros se realiza a partir de una curva de descarga constante. El error obtenido es del 5% y las zonas con menor tasa de error se encuentra entre el 100% y el 20% para la batería de Li-ion.

Este modelo se puede encontrar como elemento propio en la librería *Sources* de MATLAB/Simulink en versiones posteriores a 2008a.

3.5 Criterios de elección de los modelos

A lo largo de este capítulo se han presentado diversos modelos para las baterías de iones de litio. En estas líneas se ha realizado un resumen de sus características y se han listado únicamente aquellos que tienen especial relevancia por algún aspecto.

Como se puede intuir, existe una gran variedad de modelos y variantes de cada uno de ellos. Algunos autores, como [He, 2011] han recogido muchos de ellos y los ha comparado bajo una misma batería y condiciones. Los resultados en muchos casos son similares pero con peculiaridades en función del modelo.

Independientemente del proyecto del que se trate es necesario seguir una serie de criterios a la hora de elegir el modelo a utilizar en la simulación. Los **criterios a considerar** son los siguientes:

6. **Campo de aplicación:** es necesario que el modelo elegido se adapte correctamente al campo de utilización al que va a ser sometido. En este trabajo se han presentado modelos electroquímicos simples y de circuito eléctrico equivalente, que permiten utilizarse en el campo de la automoción. Sin embargo, habrá investigaciones concretas para las que sea más acertado elegir un tipo u otro de modelo. Del mismo modo, esto es aplicable a otros campos de estudio.
7. **Grado de exactitud:** en este caso este criterio va ligado inseparablemente al criterio de la complejidad. Es necesario definir y concretar el grado de exactitud que se necesita en el estudio antes de elegir un modelo u otro, ya que normalmente, a mayor exactitud es necesaria una mayor complejidad en el modelo. Modelos muy exactos necesitan más tiempo y capacidad de cálculo que modelos más modestos que ofrecen resultados no tan exactos pero suficientes para una determinada aplicación.

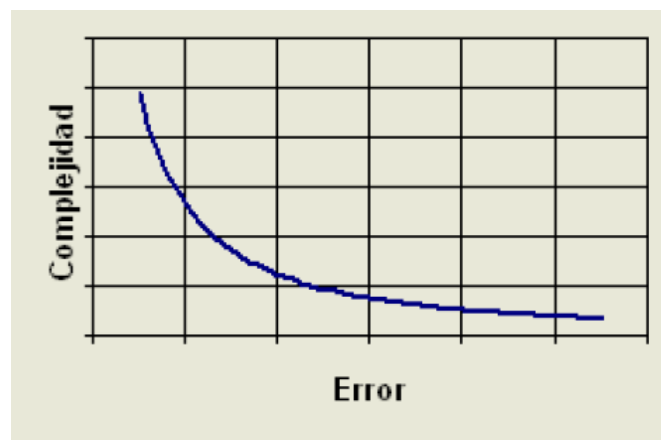


Fig. 34 Relación exponencial entre la complejidad y la tasa de error en un modelo

8. **Grado de complejidad:** parámetro a tener en cuenta a la hora de elegir entre varios modelos. La complejidad de un modelo puede venir dada bien sea, a la hora de su implementación en computación, a la hora de la obtención de parámetros, o simplemente, por la propia construcción del modelo en cuanto a número o grado de dificultad en las ecuaciones propias. Normalmente un modelo complejo aporta resultados más exactos que uno simple, pero en muchas ocasiones la rentabilidad del sobreesfuerzo que lleva asociación un modelo complejo es pequeña.
9. **Obtención de parámetros propios:** a la hora de elegir un modelo este es otro aspecto relevante. En algunos casos la obtención de los parámetros del modelo (R_{int} , K , etc.) es relativamente sencilla sometiendo a ensayo la batería a simular. En otros casos, la deducción de estos no es tan evidente y es necesario realizar costosos ensayos o cálculos matemáticos complejos para la obtención de los parámetros.

10. **Tiempo de cálculo:** aunque actualmente el tiempo de cálculo ha pasado a segundo plano debido a la potencia de los procesadores actuales, es necesario cuantificar la carga de cálculo del modelo para poder estimar el tiempo necesario para realizar los cálculos. Simulaciones complejas llevarán más tiempo y carga en el cálculo.

4. OBTENCIÓN DE PARAMETROS PARA UN MODELO

En el capítulo 3 se han presentado diversos modelos para simular el comportamiento de una batería de iones de litio, sin embargo, en todos ellos también se han definido unos parámetros propios del modelo que no son evidentes a simple vista.

Para determinar estos parámetros es necesario aplicar una serie de técnicas experimentales que permiten obtenerlos. Estas técnicas se pueden clasificar en dos grupos, en función de si se tratan en el **dominio del tiempo** o en el **dominio de la frecuencia**.

En las siguientes líneas se explican alguna de las técnicas más utilizadas para determinar parámetros en modelos de circuitos equivalentes para el modelado de baterías de iones de litio.

4.1 Técnicas en dominio del tiempo

Las técnicas más utilizadas dentro del dominio del tiempo para determinar los parámetros necesarios del circuito equivalente de un sistema de almacenamiento de energía, como son las baterías de litio, son las pruebas a **corriente constante**, a **corrientes variables** y la **voltamperometría cíclica**. A continuación se detalla cada una de ellas.

4.1.1 Descargas a corriente constante

Las pruebas a corriente consisten en descargar completamente la batería en estudio con una determinada corriente constante sucesivas veces. Normalmente se realizan varias descargas, cada una con una determinada tasa C.

La descarga de la batería a corriente constante sirve para calcular la potencia y la energía absoluta o específica que se puede extraer de una batería en función de la corriente de descarga (rapidez). Durante las pruebas se mide la tensión, la corriente y el tiempo, permitiendo obtener, entre otros, la potencia y la energía que puede almacenar

En la figura 35 se muestran las curvas de descarga de una misma batería (SAFT MP176065) para una descarga constante de 20A (a) y de 40A (b) respectivamente. En este caso, la batería ensayada disponía de módulo BMS que ha detenido la descarga cuando la batería había llegado al límite seguro de descarga.

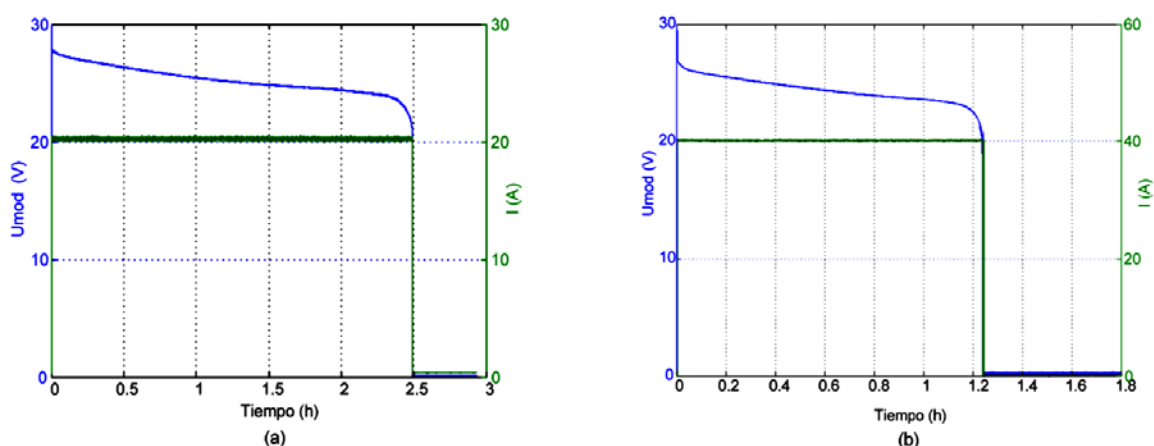


Fig. 35. Proceso de descarga continua de una batería Li-ion a 20A (a) y a 40A (b) [Castaño, 2014]

4.1.2 Pruebas con corrientes variables

La técnica con corrientes variables es el procedimiento más utilizado para determinar los elementos pasivos que forman el circuito equivalente de una batería. La prueba puede realizarse para procesos de carga o descarga, a diferentes niveles de corriente y con un solo escalón o una sucesión de ciclos de corriente constante.

Durante las fases en las que se interrumpe la corriente, se produce un incremento (proceso de descarga) o una disminución (proceso de carga) de la tensión, que tras un tiempo de reposo se estabiliza en lo que se denomina como tensión en circuito abierto.

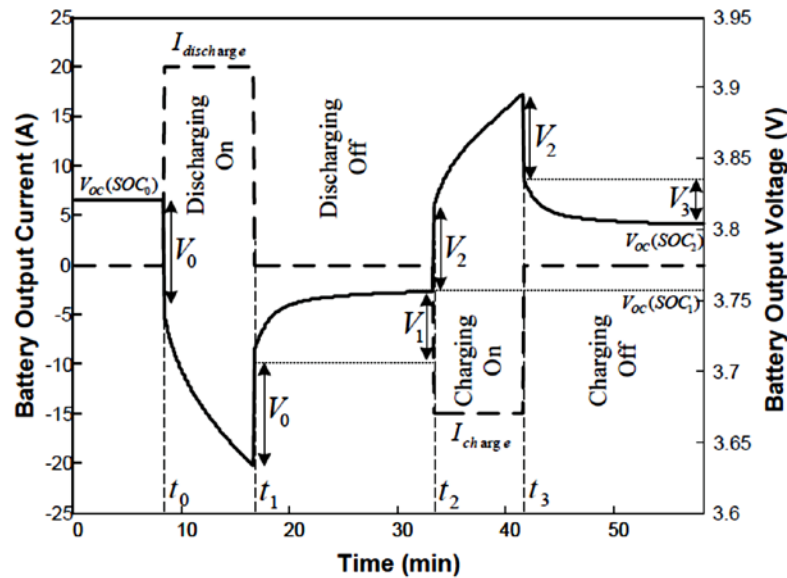


Fig. 36. Curva característica para procesos de carga y descarga interrumpidos [Raahmoun, 2012]

En la figura 36 se muestra un esquema que contiene un caso de carga y de descarga con ambos fenómenos. Partiendo de una tensión V_{oc} se produce una descarga que provoca una caída de tensión inicial V_0 más la correspondiente a la carga. Tras cesar la descarga, inmediatamente se recupera la caída de tensión V_0 y pasado un tiempo la tensión se estabiliza. Para el caso del proceso de carga, ocurre lo contrario, según comienza la carga se alcanza una tensión V_2 que coincide con la caída de tensión asociada al cese del proceso de carga.

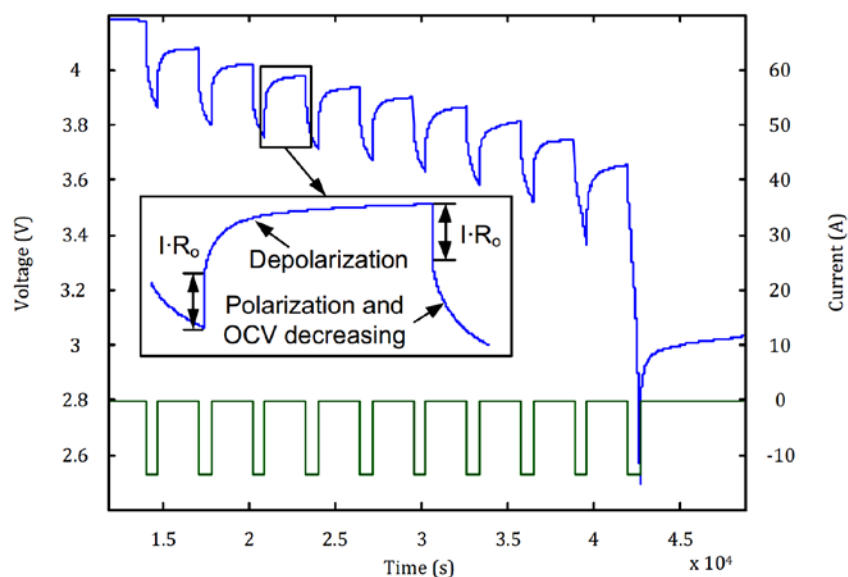


Fig. 37. Proceso de descarga discontinua y análisis de la curva de tensión [Gong, 2016]

Las pruebas a corriente variable, como son las descargas interrumpidas, son muy útiles para valorar los fenómenos de polarización de la batería en estudio. Realizada la prueba y a partir de los datos obtenidos en estos procesos se puede calcular la resistencia en serie y los valores de la capacitancia que modela los transitorios que dependen de la polarización para aquellos modelos que la contemplan.

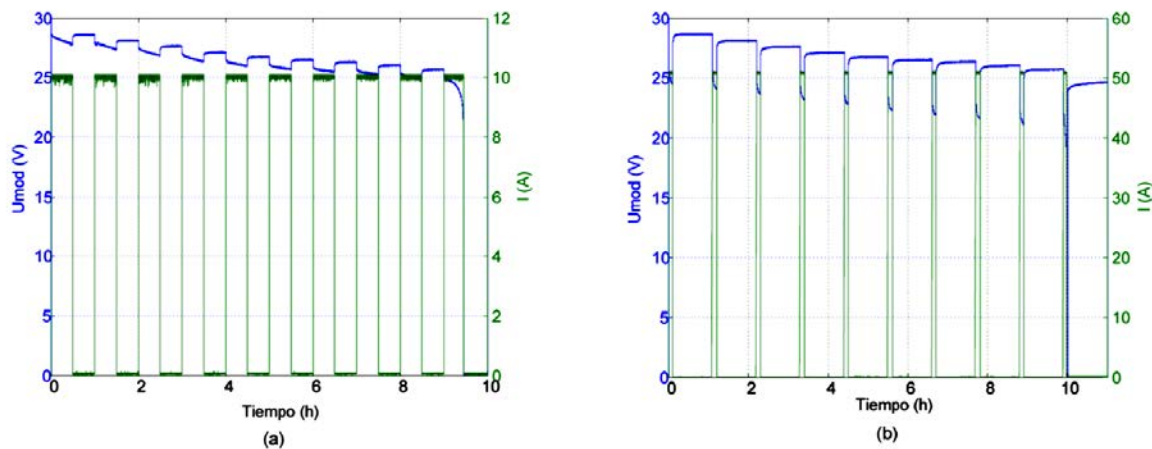


Fig. 38. Proceso de descarga interrumpida de una batería Li-ion a 10A (a) y a 50A (b) [Castaño, 2014]

En la figura 38 se puede observar las curvas de descarga interrumpida de una misma batería (SAFT MP176065) para una descarga de 10A (a) y 50A (b) respectivamente. En el caso de la descarga de 10A se ha dejado un tiempo de estabilización de la tensión en circuito abierto de 30 minutos y, en la descarga de 50A, de 45 minutos [Castaño, 2014].

4.1.3 Voltamperometría cíclica

Una de las técnicas que más utilizada para estudiar los mecanismos en una reacción es la voltamperometría cíclica, ya que aporta información rápida acerca del comportamiento redox de las especies, de las reacciones químicas en que participan (mecanismos de reacción, reacciones químicas acopladas) y en la determinación de parámetros termodinámicos [Baeza, 2011].

La prueba de **voltamperometría cíclica** permite conocer, en el caso de la parametrización de una batería, la simetría entre el proceso de carga y de descarga y determinar los límites de tensión de la celda estudiada.

La prueba consiste en aplicar un barrido lineal de tensión en forma de señal triangular. La tensión varía linealmente desde E_0 hasta E_f , y cuando se ha alcanzado este valor el sentido de barrido se invierte, volviendo la tensión a su valor original E_0 . El ciclo de excitación puede ser repetido cuantas veces se requiera para el experimento. Los intervalos de tensión se escogen teniendo en cuenta los valores en los que se produce la reacción a estudiar [Ortiz, 2006].

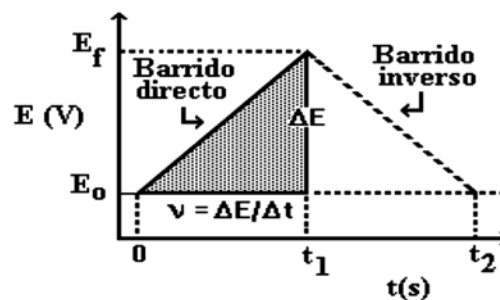


Fig. 39. Señal de excitación en una voltamperometría cíclica [Ortiz, 2006]

La respuesta a la señal de excitación se llama **voltamperograma cíclico** y se obtiene al graficar la corriente medida al tensión asociada en una curva $E=(i)$. En la figura 40 se muestra un ejemplo de voltamperograma donde se señalan las magnitudes físicas que se pueden encontrar.

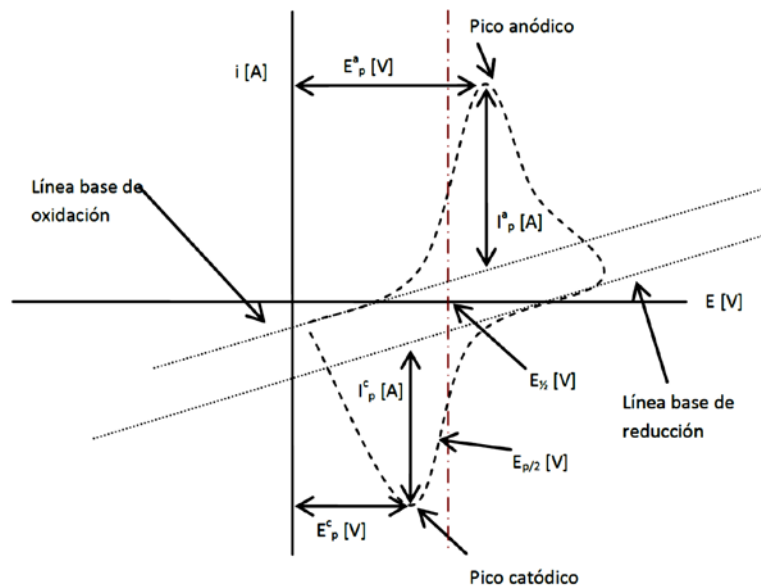


Fig. 40. Magnitudes de un voltamperograma cíclico de acuerdo al convenio propuesto por la IUPAC [Baeza, 2011]

La voltamperometría cíclica se utiliza para el estudio de las reacciones reversibles, como es el caso de las reacciones químicas que ocurren en el interior de una celda de iones de litio. Sin embargo, su campo de utilización se ve limitado a la **obtención de parámetros para modelos electroquímicos**, no teniendo utilidad a la hora de definir algún parámetro en circuitos eléctricos equivalentes.

4.2 Técnicas en dominio de la frecuencia

Las principales técnicas utilizadas en el dominio de la frecuencia para determinar los parámetros característicos de impedancia de la batería a estudiar son el análisis de frecuencia en estado estacionario y la espectroscopia de impedancia electroquímica. Sin embargo, el análisis de frecuencia en estado estacionario modela sistemas lineales, lo que hace que no sea efectivo completamente en el caso de las baterías, al tratarse estas de un sistema no lineal.

En estas líneas se presta especial atención a la espectroscopia por tratarse de un método relativamente sencillo gracias a los últimos dispositivos electrónicos existentes y por aportar suficiente información para la construcción de un modelo.

4.2.1 Análisis de frecuencia estacionario

Se trata de un método de análisis de la respuesta de un determinado sistema generada a partir de una entrada sinusoidal. Este método de análisis se utiliza para modelar sistemas lineales, sin embargo, en el caso de las baterías se puede utilizar para hallar el valor de las impedancias del modelo puesto que son los únicos componentes lineales existentes. El resto de componentes no lineales de la batería se deben hallar mediante otras técnicas.

La base del método de análisis es la respuesta obtenida ante una entrada frecuencia. En el caso de una señal arbitraria, la respuesta obtenida será la suma de las respuestas del sistema a cada una de las sinusoides que componen la señal de entrada. Para el caso de entrada sinusoidal, la respuesta será otra senoide pero de diferente magnitud y fase, pero de igual frecuencia.

El sistema se modela a través de una función de transferencia que relaciona la entrada con la salida. A partir de esa ecuación y utilizando como entrada la corriente y como salida la tensión, se puede calcular la impedancia del sistema.

Sin embargo, y pese a la relativa facilidad del análisis en frecuencia estacionario, no es posible obtener resultados que modelen la parte no lineal de la batería, por lo que este método queda relegado a simples simulaciones de aproximación de resultados.

4.2.2 Espectroscopía de impedancia electroquímica

La Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) es una técnica muy ampliamente utilizada en los procesos de electroanálisis. La técnica se comenzó a aplicar a finales de la década de 1970, cuando aparecieron circuitos electrónicos suficientemente rápidos y sensibles para generar y analizar una señal de frecuencia y fase variable. Su principal ventaja es que se trata de una técnica no destructiva y es particularmente sensible a pequeños cambios en el sistema de estudio, lo que permite la caracterización de las propiedades de materiales y sistemas electroquímicos [Vázquez, 2007].

La EIS consiste en aplicar una señal de excitación sinusoidal de pequeña amplitud que produce una señal de respuesta en el sistema. En concreto, se aplica una perturbación senoidal de potencial eléctrico de frecuencia variable y amplitud constante. La respuesta que emite el sistema es una corriente eléctrica con similares características pero con distinta fase y amplitud.

De este modo, y partiendo de la definición de impedancia eléctrica (Z), se puede calcular el módulo y el argumento de la impedancia que supone la batería a una determinada frecuencia según la siguiente ecuación [Vázquez, 2007]:

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{E_0 \text{sen}(\omega t)}{I_0 \text{sen}(\omega t + \varphi)} = Z_0 \frac{\text{sen}(\omega t)}{\text{sen}(\omega t + \varphi)}$$

Existen dos formas de representar gráficamente los resultados de impedancia obtenida de un ensayo de EIS:

- **Diagrama de Nyquist**, donde se representa la parte imaginaria multiplicada por -1 ($-Z''$), frente a la parte real (Z'). Es el sistema de representación más utilizado y la información que se obtiene de él se basa en la forma que adoptan los espectros.
- **Diagramas de Bode**, donde se representan el logaritmo del módulo de la impedancia ($\log|Z|$) y el desfase (φ) en función del logaritmo de la frecuencia ($\log \omega$). La información que se obtiene de este tipo de representación va encaminada al comportamiento en función de la frecuencia.

La interpretación del espectro de impedancias requiere la selección de un modelo eléctrico apropiado que se ajuste a los datos experimentales. A través del modelo, las medidas obtenidas utilizando esta técnica proporcionan información relacionada con la resistencia de la disolución y la resistencia de polarización, entre otros. La resistencia de la disolución se obtiene a altas frecuencias y los datos adquiridos a bajas frecuencias dan información de la cinética de la reacción.



Fig. 41. Medidor de Impedancias HIOKI BT4650E4-5ZE-IDM

Para realizar la espectroscopía es muy común utilizar analizadores de impedancia comerciales, los cuales incorporan todo el sistema de generación y recogida de señales y calculan en cada punto de prueba la impedancia. Además, suelen incorporar un programa propio de control del analizador mediante el cual es posible determinar la amplitud de rizado de la señal de excitación, el modo de prueba, la cantidad de ciclos, los puntos por década a los que debe probarse el dispositivo, etc.

En aquellos que el dispositivo utilizado para el análisis dispone de pantalla o de conexión con PC se puede visualizar los resultados obtenidos en un diagrama de Nyquist. La representación en el diagrama de los diferentes elementos se corresponde con un punto en el eje horizontal (Z') para una resistencia ideal, una línea vertical en el eje vertical ($-Z''$) para un condensador ideal y, finalmente, una línea vertical en el eje vertical ($+Z''$) para una inductancia ideal.

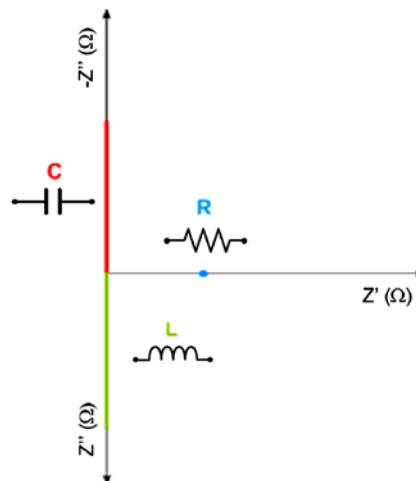


Fig. 42. Identificación de elementos ideales en el diagrama de Nyquist

Sin embargo, en la realidad no existen elementos ideales, si no que todos tienen un componente resistivo y otro capacitivo o inductivo, según el caso. Por este motivo, lo normal es obtener diagramas de Nyquist con curvas como las que se muestran en la figura 43, donde se muestran algunos ejemplos de diagramas de Nyquist de circuitos formados por combinaciones de resistencias, inductancias y condensadores [Barsoukov, 2005]

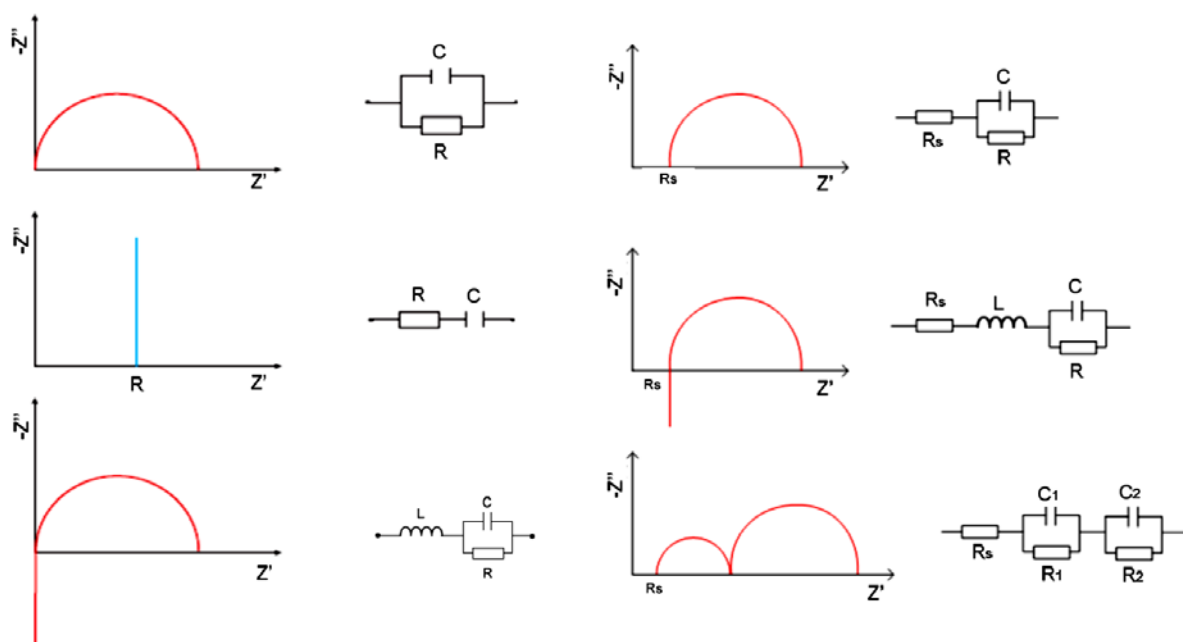


Fig. 43. Representación circuitos tipo para el diagrama de Nyquist [Barsoukov, 2005]

La representación en el diagrama de Nyquist se ve como la mostrada en la figura 44, donde se puede observar el barrido de frecuencias entre 10mHz y 10kHz, marcando como puntos destacados 1Hz y 1kHz. A partir de los valores obtenidos de este grafico es posible construir un modelo para simular el comportamiento de la batería en estudio.

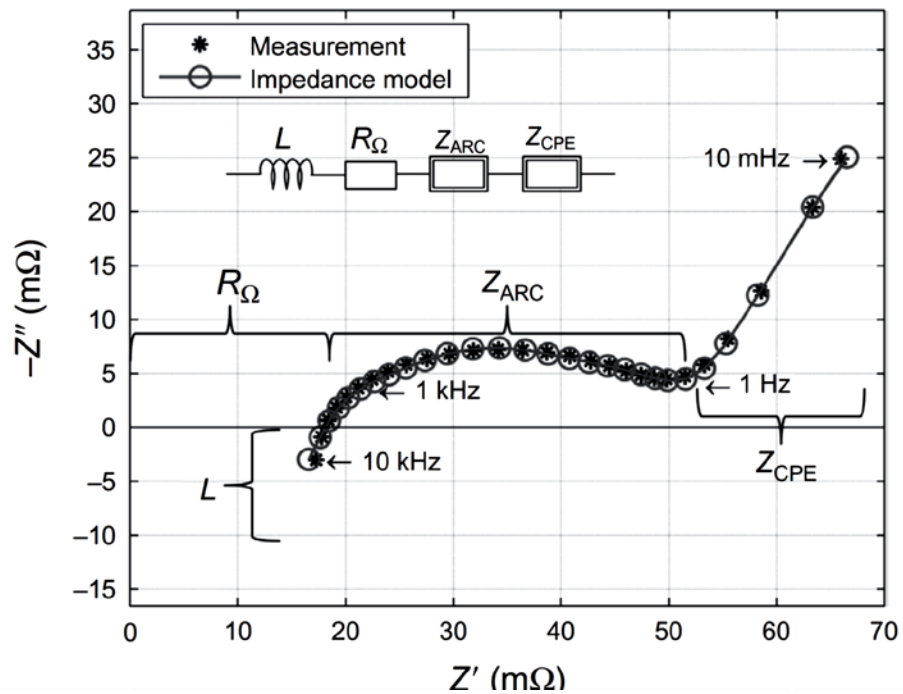


Fig. 44. Diagrama Nyquist para una EIS de una batería Li-ion [Danzer, 2015]

5. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION

En este capítulo se desarrolla el proceso seguido para implementar el modelo de batería Li-ion propuesto por [Chen, 2006] en Matlab/Simulink (versión 2010a). Los datos utilizados para modelar la batería son los obtenidos por [Chen, 2006] para una batería de tipo LPO (2.3.4) TCL PL-383562 de 850mAh de capacidad. Además, se han realizado una serie de pruebas para verificar el correcto funcionamiento del modelo en base a los resultados presentados por el autor.

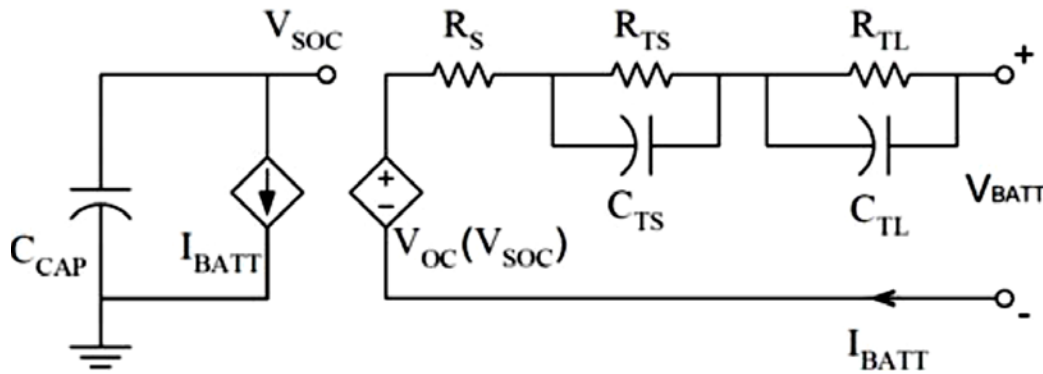


Fig. 45 Modelo propuesto por [Chen, 2006]

5.1 Entradas del modelo

En el modelo de [Chen, 2006] se han definido una serie de variables de entrada de la batería a modelar: C_{cap} , V_{SOC} , R_S , R_{TS} , C_{TS} , R_{TL} y C_{TL} . En algunas ocasiones es relativamente fácil conocerlos, como puede ser el caso de la C_{cap} o del V_{SOC} . En otros, es necesario realizar ensayos más profundos a la batería a modelar.

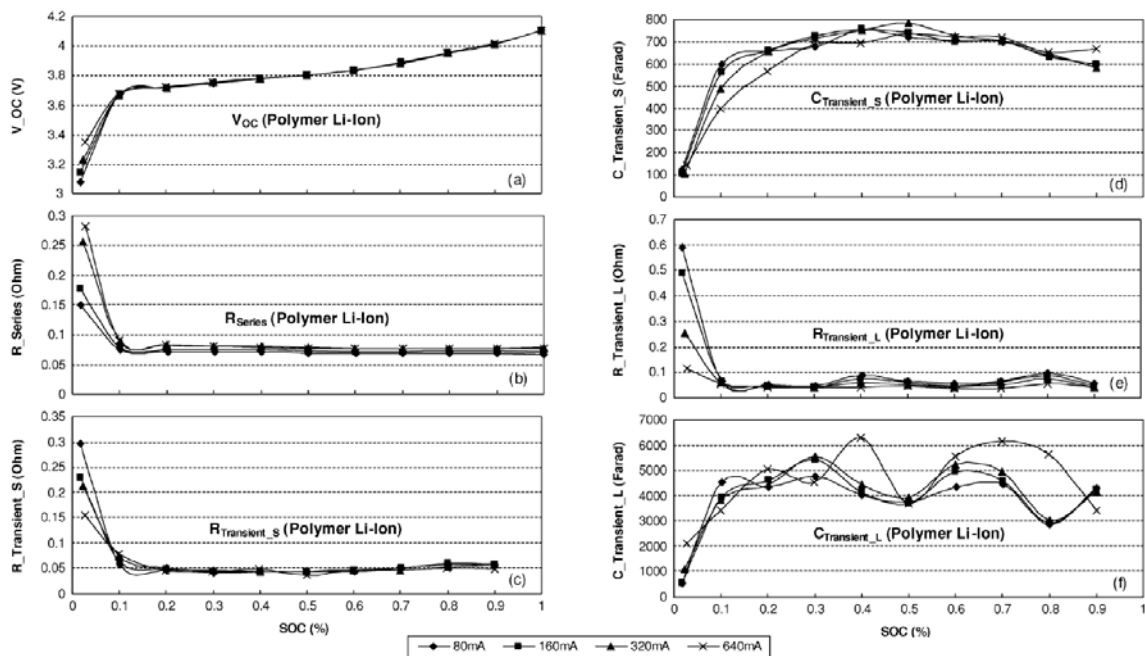


Fig. 46. Parámetros de TCL PL-383562 a temperatura ambiente [Chen, 2006]

Para este caso, se utilizan los datos proporcionados por [Chen, 2006] sobre la batería TCL PL-383562 de 850mAh de capacidad. Los ensayos se han realizado con corrientes pulsantes de 80, 160, 320 y 640 mA a temperatura ambiente sobre 10 baterías diferentes. Los resultados obtenidos para cada

componente del modelo se han parametrizado en función del estado de carga (SOC) según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 V_{OC}(SOC) &= -1.031 \cdot e^{-35 \cdot SOC} + 3.685 + 0.2156 \cdot SOC - 0.1178 \cdot SOC^2 + 0.3201 \cdot SOC^3 \\
 R_S(SOC) &= 0.1562 \cdot e^{-24.37 \cdot SOC} + 0.07446 \\
 R_{TS}(SOC) &= 0.3208 e^{-29.14 \cdot SOC} + 0.04669 \\
 C_{TS}(SOC) &= -752.9 e^{-13.51 \cdot SOC} + 703.600 \\
 R_{TL}(SOC) &= 6.603 \cdot e^{-155.2 \cdot SOC} + 0.04984 \\
 C_{TL}(SOC) &= -6056 \cdot e^{-27.12 \cdot SOC} + 4475.00
 \end{aligned}$$

Adicionalmente será necesario introducir como entradas al modelo el número de celdas en serie y ramas en paralelo para poder aplicar la simplificación propuesta por [Kim, 2012] y poder aplicar el modelo de una sola celda en aplicaciones de batería compuesta por diversas celdas asociadas en serie y paralelo.

5.2 Planteamiento del modelo para Simulink

Uno de los motivos por el que se ha elegido la herramienta Simulink es la capacidad para simular modelos dinámicos. Para el caso propuesto, el modelo viene definido por una serie de ecuaciones electrotécnicas que pueden ser implementadas con relativa simplicidad en Simulink.

El modelo construido se estructura en varios subsistemas, que permiten agrupar varios bloques haciendo más fácil la programación y su posterior estudio. La estructura del modelo construido es la siguiente:

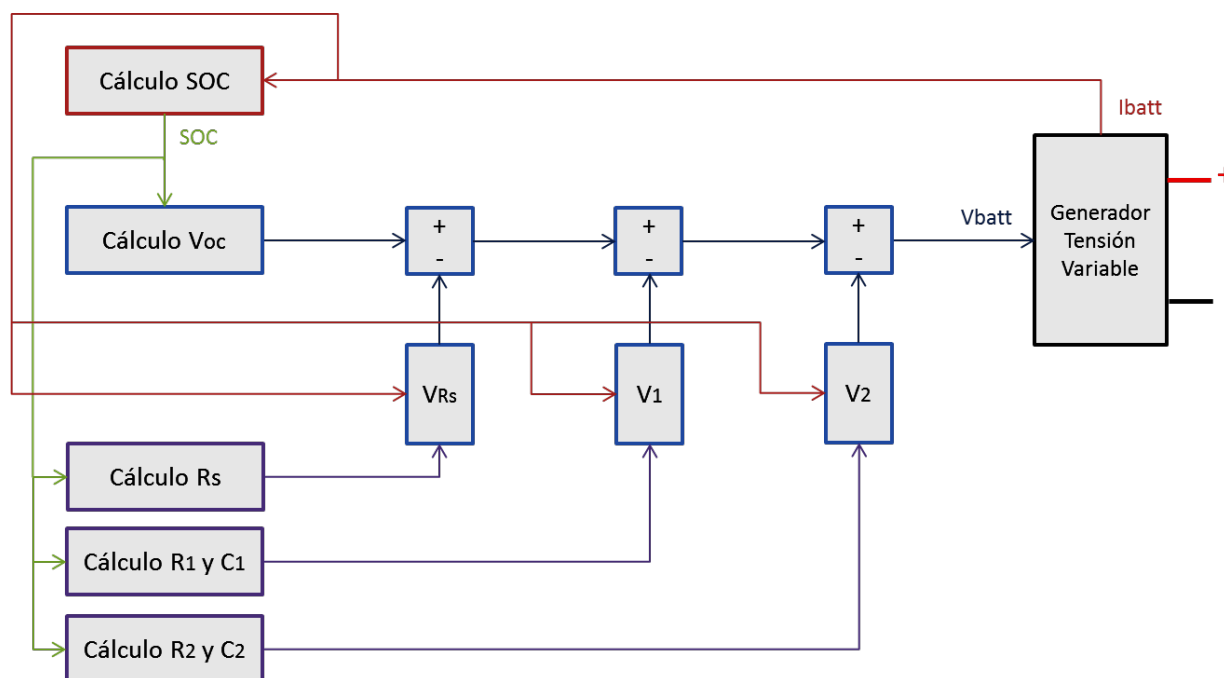


Fig. 47. Esquema de subsistemas del modelo de Chen para Simulink

Como se puede ver en la figura 47 el modelo se ha subdividido en nueve subsistemas de los cuales, cinco de ellos se corresponden con el cálculo directo de parámetros propios de la batería estudiada. Estos son: SOC en función de la corriente demandada, V_{OC} en función del SOC de la batería y el cálculo de los parámetros de la batería R_1 , R_2 , C_1 y C_2 también en función del SOC.

El resto de subsistemas calculan la caída de tensión en los parámetros del modelo y hacen la diferencia correspondiente para obtener la tensión de la batería bajo carga, denominada V_{batt} . Esta tensión servirá al mismo tiempo de consigna para una fuente tensión variable, que a su vez proporciona la corriente demandada por la carga, entrada a su vez del sistema.

Además, cada subsistema posee una serie de entradas con valores constantes: C_{cap} , elementos en serie, ramas en paralelo, etc. Esto no supone ningún problema para Simulink, ya que todos ellos se introducirán como un bloque constante.

5.3 Asociación de celdas en serie y en paralelo

Para convertir el modelo monocelda propuesto por [Chen, 2006] en un modelo multicelda que permita múltiples aplicaciones es necesario realizar una serie de hipótesis que justifiquen la asociación en serie y paralelo de las celdas.

Partiendo de los valores de dos celdas de composiciones distintas, se pueden extrapolar los valores de una celda a otra. Se dispone de la batería 1 de referencia que se extrapola a la batería 2.

De este modo la relación entre ellas para un determinado estado de carga (SOC) en función de los valores a plena carga $V_{OC,PC1ref}$ de la batería 1 de referencia y $V_{OC,PC2}$ de la batería 2 es el siguiente:

$$\frac{V_{OC1(SOC)}}{V_{OC,PC1ref}} = \frac{V_{OC2(SOC)}}{V_{OC,PC2}}$$

También se pueden relacionar los valores de las resistencias en serie R_s , R_{TL} y R_{TS} con el valor de la carga nominal Q_{bat} de las baterías, puesto que esta depende de la superficie de placa de la celda. En el caso de los componentes de resistencia del modelo de [Chen, 2006] las relaciones son inversamente proporcionales, de manera que puede escribirse:

$$\begin{aligned} R_{s1(SOC)} \cdot Q_{bat1} &= R_{s2(SOC)} \cdot Q_{bat2} \\ R_{TL1(SOC)} \cdot Q_{bat1} &= R_{TL2(SOC)} \cdot Q_{bat2} \\ R_{TS1(SOC)} \cdot Q_{bat1} &= R_{TS2(SOC)} \cdot Q_{bat2} \end{aligned}$$

Si se relacionan los componentes capacitivos C_{TL} y C_{TS} de la celda, al depender estos de la superficie de placa también, se obtiene una relación proporcional a la capacidad, que se considera válida para ambos componentes capacitivos:

$$\begin{aligned} \frac{C_{TL1(SOC)}}{Q_{bat1}} &= \frac{C_{TL2(SOC)}}{Q_{bat2}} \\ \frac{C_{TS1(SOC)}}{Q_{bat1}} &= \frac{C_{TS2(SOC)}}{Q_{bat2}} \end{aligned}$$

Estas relaciones se obtienen al suponer, como se ha mencionado antes, que la capacidad de la celda es proporcional a la superficie de las placas. De este modo se obtiene que las resistencias del modelo son inversas a la superficie mientras que las capacitancias son directamente proporcionales respecto de la superficie:

$$Q_{bat} \sim S_{placa} \quad R \sim \frac{1}{S_{placa}} \quad C \sim S_{placa}$$

En el caso de **asociaciones en serie**, la corriente que circula por todas las celdas asociadas es la misma y según las leyes de la electrotecnia obtenemos que la suma de tensiones de cada celda es la tensión de la asociación, así como la suma de todas las resistencias de las celdas será la resistencia total de la asociación. En el caso de las capacitancias se aplica la regla de la suma de las inversas de las capacitancias en serie.

$$\begin{aligned} V_{OCserie} &= \sum V_{OCi}(SOC_i) \\ R_{serie} &= \sum R_{Si}(SOC_i) + \sum R_{TLi}(SOC_i) + \sum R_{TSi}(SOC_i) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{C_{serie}} = \sum \frac{1}{C_{TLi}(SOC_i)} + \sum \frac{1}{C_{TSi}(SOC_i)}$$

En el caso de **asociaciones en paralelo** la tensión de todas las celdas asociadas es la misma y según las leyes de la electrotecnia la corriente que circula por cada celda será relativa a las características de sus componentes. En este caso las relaciones anteriores quedan de esta forma:

$$V_{OC1} = V_{OC2} = V_{OCi}$$

$$\frac{1}{R_{serie}} = \sum \frac{1}{R_{Si}(SOC_i)} \sum \frac{1}{R_{TLi}(SOC_i)} + \sum \frac{1}{R_{TSi}(SOC_i)}$$

$$C_{serie} = \sum C_{TLi}(SOC_i) + \sum C_{TSi}(SOC_i)$$

Para estas relaciones se ha tomado como referencia el circuito equivalente de batería de la figura 45.

5.4 Componentes del modelo de Chen en Simulink

A continuación se presenta cada uno de los componentes utilizados para la implementación del modelo de [Chen, 2006]. Como se ha planteado, el modelo consiste en una agrupación de subsistemas que se detallan a continuación:

5.4.1 Subsistema de cálculo de SOC

Para poder calcular el estado de carga de la batería se ha utilizado la siguiente ecuación, donde se define un estado de carga inicial (SOC_0) y se realiza la diferencia de la integral de la corriente de descarga dividida por la capacidad de la batería:

$$SOC = SOC_0 - \int_0^t \frac{I \cdot 100}{C_{Cap} \cdot 3600} dt$$

A partir de la aplicación de la ecuación se puede obtener el SOC en tanto por unidad que tiene la batería en el instante t de la simulación. La implementación de la ecuación es la siguiente:

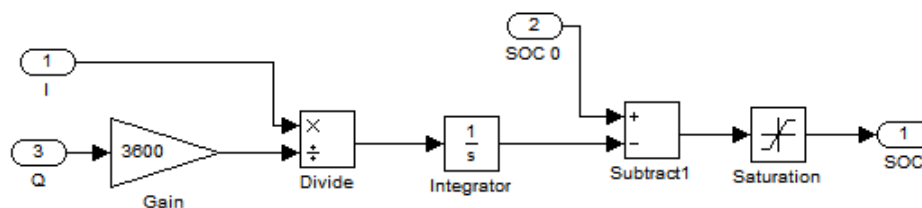


Fig. 48. Detalle del subsistema de cálculo SOC de Simulink

Donde se define como entrada al subsistema la intensidad de la batería (I), el estado de carga inicial (SOC_0) en tanto por uno y la capacidad de la batería (Q). La salida del sistema es el estado de carga en tanto por uno. Además, se ha definido un filtro de valores que acota el SOC entre 1 y 0.

5.4.2 Subsistemas de cálculo V_{oc} , R_s , R_1 , R_2 , C_1 y C_2

En este apartado se tratan los subsistemas de cálculo de los parámetros propios de la batería. Se ha decidido agruparlos en un solo apartado ya que el procedimiento para crear cada uno de ellos es similar.

Se parte de la ecuación de parametrización proporcionada por [Chen, 2006] y que se describe en el apartado 5.1 y de la introducción en Simulink del bloque "Function Block" que permite utilizar este tipo de expresiones.

Este tipo de bloque permite evaluar una función de una única variable, denominada $u(x)$, por lo que en todos los casos la entrada será el SOC que posea la batería en el instante simulado. La salida será el valor del parámetro deseado en ese instante.

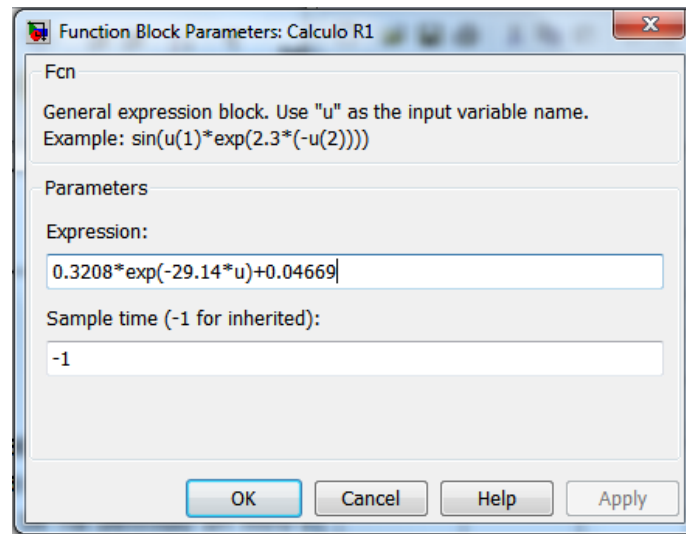


Fig. 49. Ventana de configuración del bloque "Function Block" para el cálculo de R1

En la figura 49 se puede observar el dialogo de introducción de los parámetros de la función a evaluar.

5.4.3 Subsistemas de cálculo V_{RS} , V_1 y V_2

Una vez se han calculado los valores de los parámetros R_s , R_1 , R_2 , C_1 y C_2 de la batería es necesario calcular la caída de tensión producida en la resistencia R_s y en cada una de las dos ramas que modelan los transitorios de la batería (R_1 , R_2 , C_1 y C_2).

Para ello se han creado tres subsistemas, dos de ellos son idénticos mientras que otro es una simple aplicación de la Ley de Ohm. La entrada de cada subsistema es la corriente que circula por la celda de la batería y el valor de los componentes en cada caso. La salida es la caída de tensión generada.

En la figura 50 se puede observar el subsistema para el cálculo de la caída de tensión en una rama RC, mientras que en la figura 51 se realiza el cálculo de la caída en la resistencia serie del modelo.

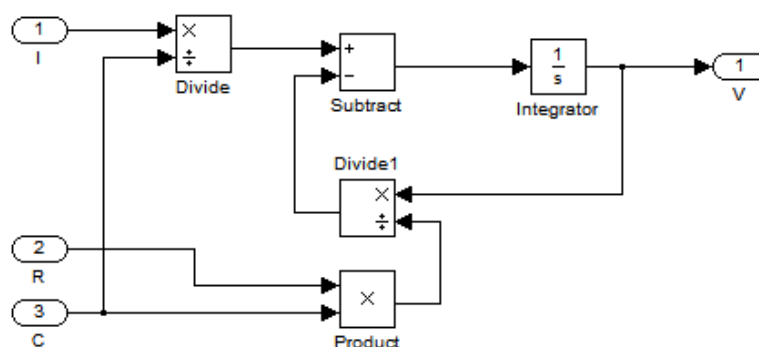


Fig. 50. Detalle del subsistema de cálculo de caída de tensión en cada rama RC del modelo

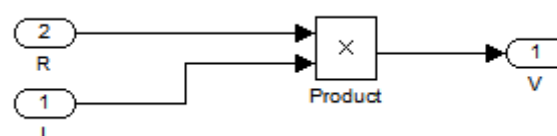


Fig. 51. Detalle del subsistema de cálculo caída de tensión en la resistencia serie del modelo

5.4.4 Subsistema de celda de batería

Una vez están definidos los subsistemas básicos para el cálculo del SOC, parámetros de los componentes del circuito y los convertidores de tensión, se crea un subsistema que englobe a los anteriores y a las operaciones matemáticas que los relacionan.

Para ello, se crea el subsistema de celda, que se puede observar en la figura 53. Las entradas a este sistema son el número de elementos que se disponen en serie, número de ramas en paralelo y la intensidad que circula por el borne de la batería.

Puesto que el modelo propuesto por [Chen, 2006] es un modelo de celda Li-ion, se ha utilizado la simplificación de [Kim, 2012] para convertir el modelo de celda única en modelo multicelda. Según [Kim, 2012], es posible esta conversión asociando mediante equivalentes eléctricos los componentes del circuito de celda única. De esta forma el equivalente en serie de varias celdas es una única celda donde se asocian en serie todos sus componentes, y, del mismo modo, varias ramas paralelas son equivalentes a una asociación de componentes en paralelo.

Las salidas definidas del subsistema de celda son el SOC y la tensión de la batería, la cual está definida como una señal para una fuente variable de tensión.

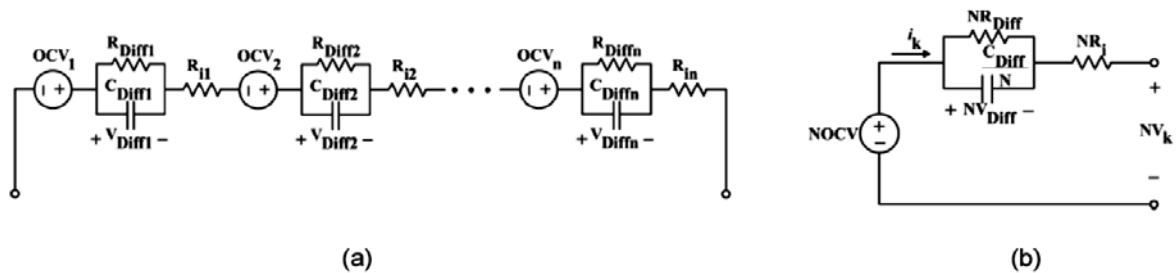


Fig. 52 Configuración serie (a) y circuito equivalente (b) propuesto por [Kim, 2012]

La aplicación de la simplificación de [Kim, 2012] en Simulink se realiza en el caso de los componentes en serie multiplicando el valor del componente por el número de celdas en serie y, para el caso de las ramas en paralelo, se divide la intensidad que circula por el borne de la batería entre tantas ramas paralelo haya en la batería.

De este modo, se está simulando una única celda pero con características globales correspondiente a una batería completa. La tensión de la batería será la de una celda en aislado multiplicada por los elementos en serie que se hayan definido.

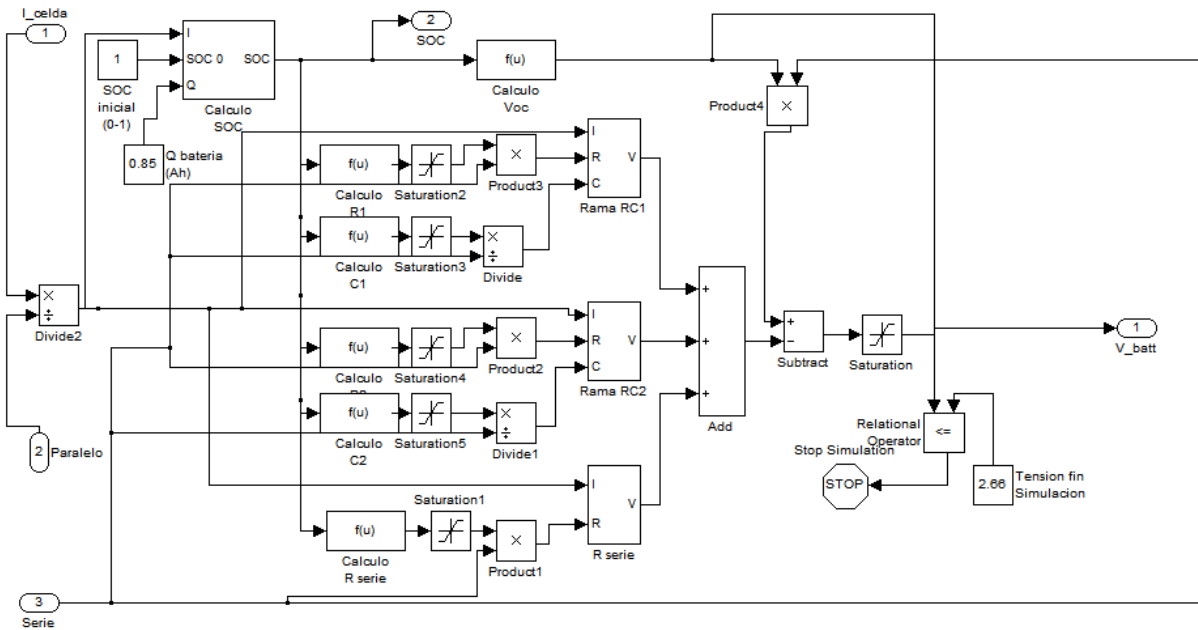


Fig. 53 Esquema del subsistema de celda en Simulink

Adicionalmente se han añadido componentes que dotan de estabilidad al modelo. Este es el caso del control de límites mediante el bloque "Saturation" que permite definir unos valores máximos y mínimos para el parámetro deseado. Estos límites se han definido para los componentes del circuito y para la función de la tensión.

Finalmente, se ha introducido una lógica al modelo para que se detengan los cálculos una vez la batería se ha agotado. La función lógica toma valores de la tensión de la celda en estudio y cuando esta alcanza la mínima tensión de trabajo ordena detener la simulación. El valor de corte de simulación también se puede definir.

5.4.5 Subsistema de batería

Se trata de un subsistema intermedio que combina los componentes de señal con los componentes físicos de tensión y corriente simulados. La función de este subsistema es convertir la señal de tensión originada en el subsistema celda en una tensión utilizable a partir de una fuente de tensión variable.

Además, se ha incorporado un bloque de medida de corriente, que proporciona la corriente que circula por el borne de la batería y lo introduce como dato al modelo.

Las entradas a este bloque son el número de elementos que se disponen en serie y el número de ramas en paralelo que componen la batería a simular, siendo ambas una pasarela al subsistema de celda. Las salidas en este caso son el SOC, que actúa igualmente de pasarela, y dos bornes de tensión (positivo y negativo) que son equivalentes al borne de la batería.

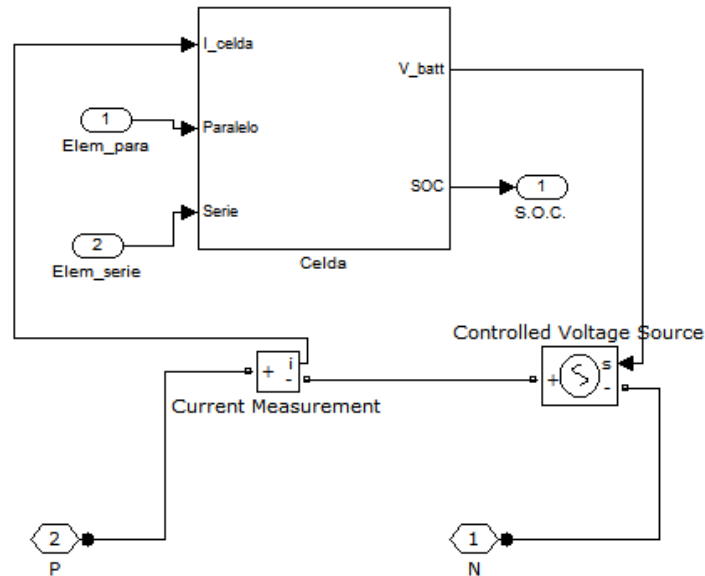


Fig. 54 Subsistema de batería en Simulink

5.5 Configuración del modelo de Chen en Simulink

El modelo de batería basado en [Chen, 2006] se ha construido, como se ha mencionado anteriormente, en Simulink. La totalidad del modelo está contenida en un archivo de extensión .mdl. Además, se le han aplicado capas de compatibilidad para que pueda ser ejecutado en máquinas con versiones de Matlab diferentes a 2010a.

El modelo se ha configurado para una batería de Li-ion polímero compuesta por celdas TCL PL-383562 de 850mAh y de tensión nominal 3,80V. El número de celdas se puede modificar fácilmente en el modelo introduciendo los componentes serie y paralelo.

Todo ello se ha compactado en un bloque que permite la entrada de los parámetros de configuración y la edición de otros valores más profundos, como son la capacidad o la tensión de trabajo de la celda tipo. El modelo proporciona el estado de carga de la batería y dos bornes de conexión, donde se puede acoplar una carga eléctrica.

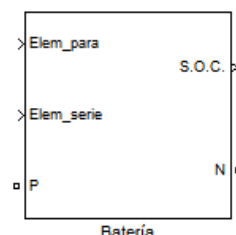


Fig. 55 Bloque del modelo Simulink del modelo [Chen, 2006]

5.6 Verificación y validación del modelo de Chen en Simulink

En el siguiente apartado se verifica el modelo construido anteriormente. Se trata, como se ha mencionado en los capítulos anteriores de una de las etapas más delicadas puesto que el objetivo es verificar el funcionamiento del mismo y ver si los resultados obtenidos se aproximan a la realidad dentro de unos márgenes de error aceptables.

Para comprobar si el modelo construido se comporta correctamente se va a reproducir el comportamiento bajo los mismos supuestos de los experimentos realizados por [Chen, 2006]. Entre estos se incluye una descarga completa a corriente constante y una descarga completa mediante la aplicación de pulsos de corriente. Todas estas pruebas se realizan sobre una única celda.

Además, se ha diseñado una prueba dinámica durante el ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*) de un pack de baterías de automoción compuesto por este tipo de celdas para un vehículo existente en el mercado pero que no está equipado con tracción eléctrica. Esta prueba pretende mostrar la utilidad de este tipo de modelos.

5.6.1 Verificación del modelo mediante descarga a corriente constante

La primera verificación y validación del modelo se realiza mediante una serie de descargas a corriente constante de la batería. Las pruebas se realizarán a 1C y 0.5C. Con esta prueba se pretende demostrar que el modelo ofrece resultados coherentes para diferentes corrientes de descarga.

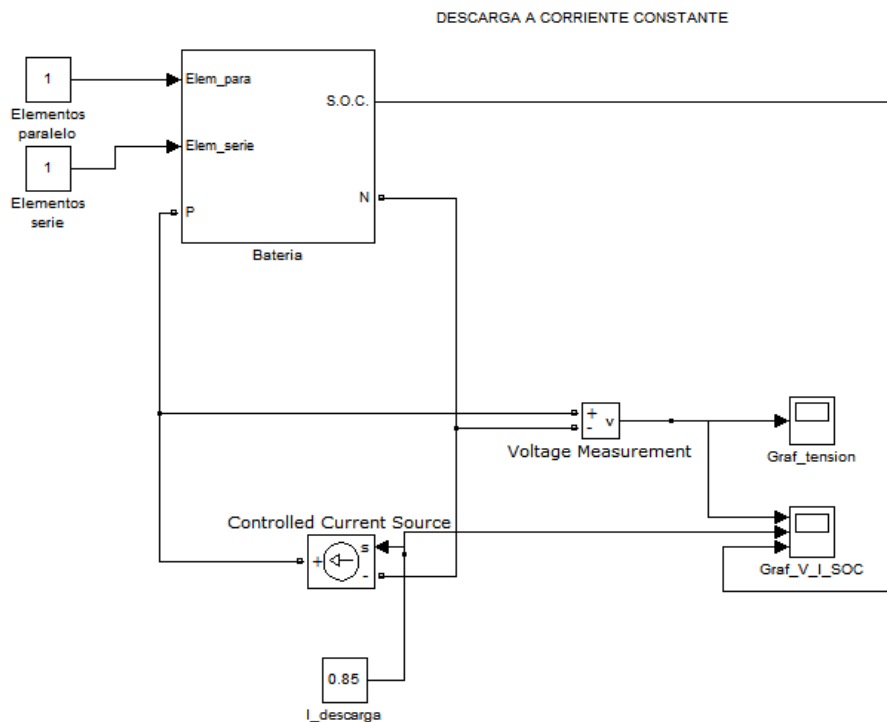


Fig. 56 Modelo en Simulink para descarga a corriente constante

El modelo se ha configurado para simular una batería de una única celda (1 elemento serie y 1 una rama en paralelo) y entre los bornes de la batería se ha dispuesto una fuente de corriente a la que mediante un bloque de señal constante se le define la consigna. En este caso la consigna variará para las cantidades antes mencionadas.

Además, se han colocado unos bloques "Scope" para visualizar el SOC, la tensión en bornes y la corriente aplicada a la batería. Esta configuración se puede observar en la figura 57.

Para el mismo modelo se han simulado descargas para corrientes de 0.85A para 1C y 0.42A para 0.5C ya que se trata una batería de 850 mAh de capacidad. Para variar el valor se ha actuado sobre el valor constante del bloque I_descarga obteniéndose los siguientes resultados.

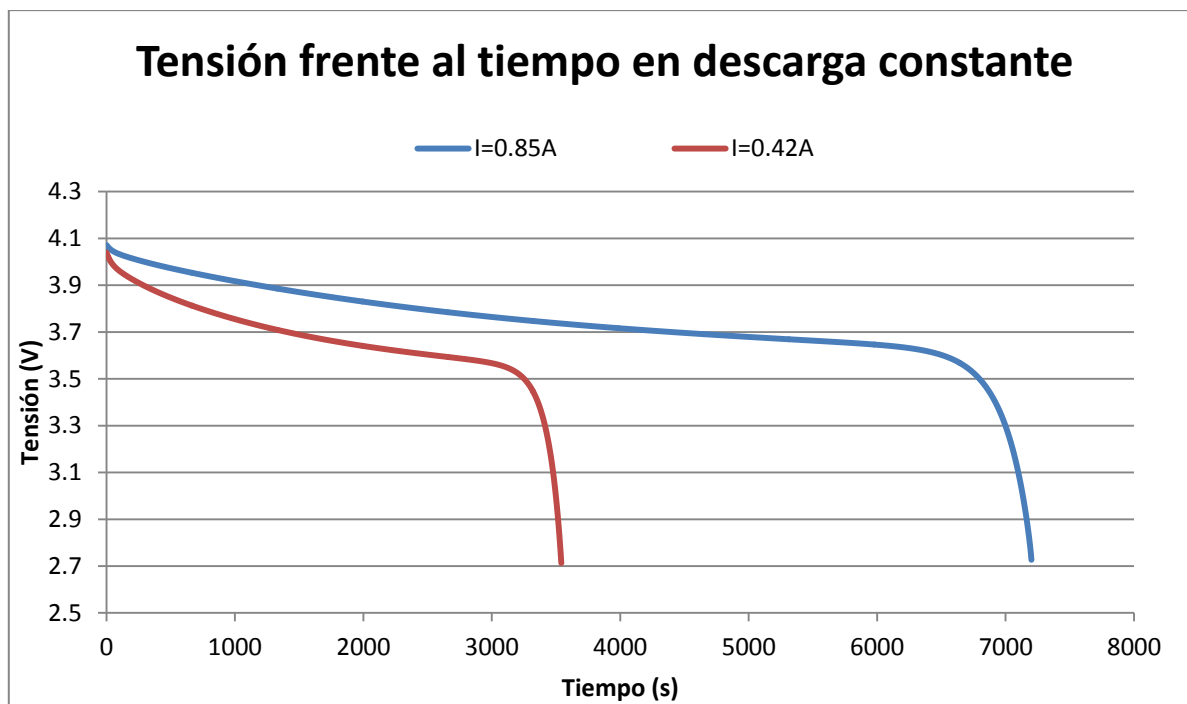


Fig. 57 Representación gráfica de la tensión frente al tiempo para descargas a corriente constante de 0.85A y 0.42A

Como se puede ver en la figura 67 el modelo tiene un comportamiento estático coherente. Las curvas de tensión coinciden plenamente con las proporcionadas por [Chen, 2006] puesto que la corriente de la batería viene definida por la parametrización de la descarga experimental realizada en laboratorio.

Para dos corrientes de descarga diferentes, la curva de tensión es la misma variando únicamente los puntos que la definen. Sin embargo, sí que se puede observar que para descargas rápidas (1C) la tensión de la batería disminuye con mayor rapidez que en ratios más moderados (0.5C).

5.6.2 Verificación del modelo mediante descarga a corriente pulsante

Otra de las pruebas realizadas por [Chen, 2006] consiste en una descarga de la batería mediante una corriente pulsante de 160mA en periodos de 2000 segundos. Una buena forma de comprobar la coherencia del modelo es replicar los resultados de esta prueba.

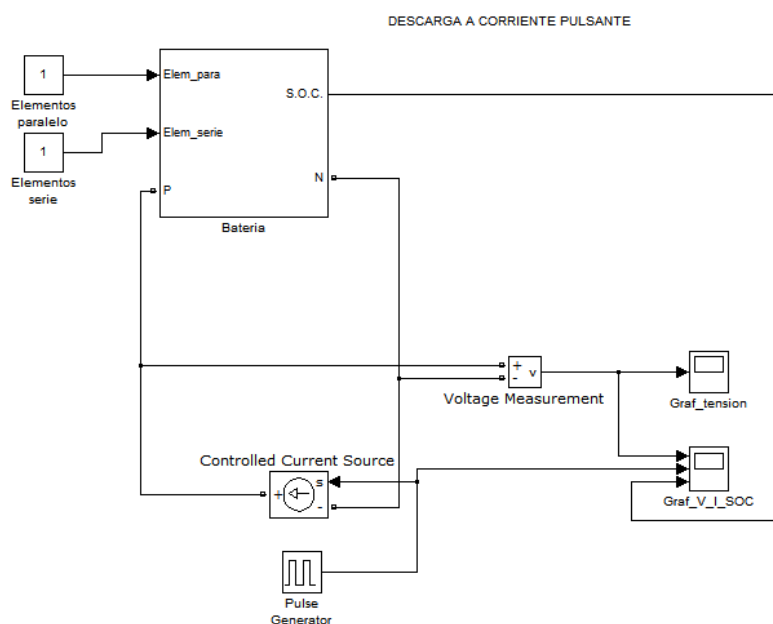


Fig. 58 Modelo en Simulink para descarga a corriente pulsante

Para ello, se ha añadido como señal de entrada a la fuente de corriente conectada a los bornes de la batería un bloque generador de señal a pulsos configurado según los parámetros proporcionados por [Chen, 2006]. El resultado debe ser similar al presentado en la figura 59.

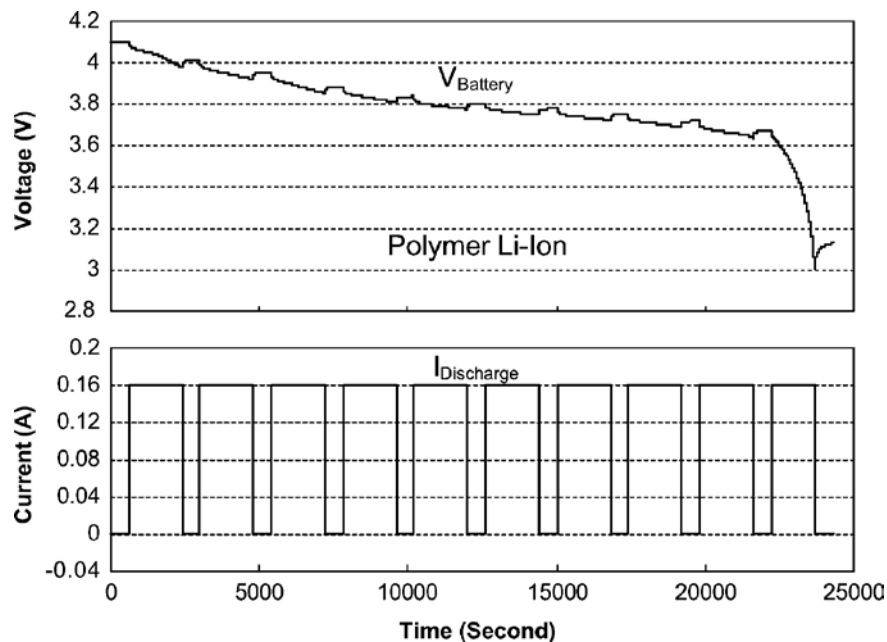


Fig. 59 Respuesta del modelo para una descarga a corriente pulsante de 160mA [Chen, 2006]

Aplicando los parámetros mencionados se simula la descarga de una celda a 160mA en periodos de 200 segundos, deteniéndose la simulación a los 23000 segundos aproximadamente. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 60 y 61.

Comparando la gráfica de tensión proporcionada por [Chen, 2006] (figura 70) y la obtenida en la simulación del modelo en Simulink se pueden apreciar múltiples coincidencias. La más notable es la coincidencia de tensiones para la mayor parte de la descarga, exceptuando la última parte de la descarga donde se observa una desviación de 0.2V.

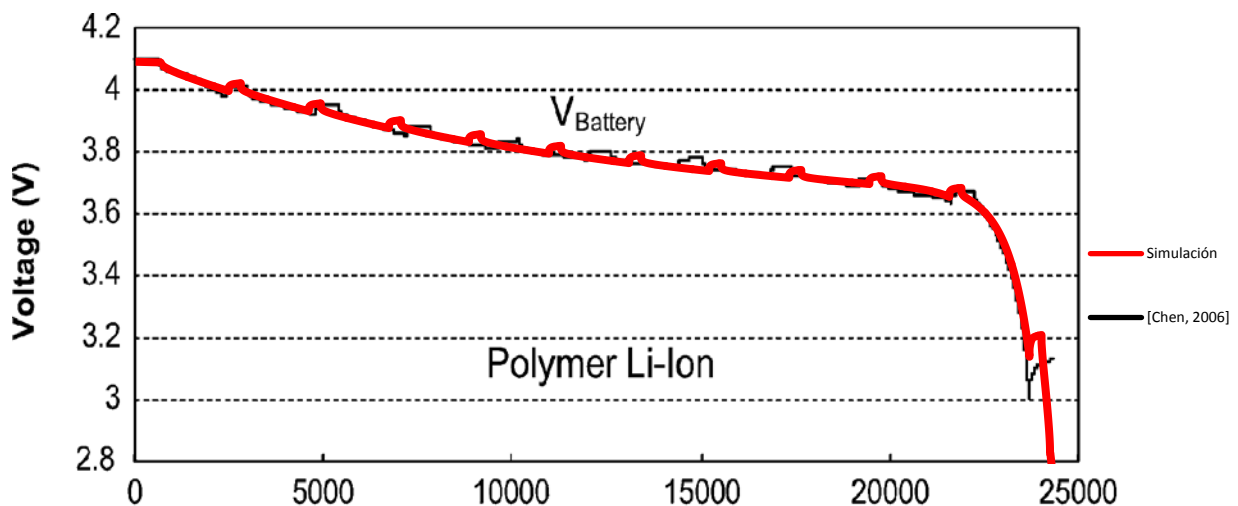


Fig. 60 Comparación de la tensión frente al tiempo obtenida en la simulación con los resultados de [Chen, 2006]

Para el resto de parámetros y comportamientos en la batería simulada no se observan incoherencias, por lo que se considera el modelo válido para simular comportamientos de este tipo de baterías afines con resultados reales.

En la figura 71 se proporciona el perfil de corriente obtenido así como la tensión y el estado de carga durante la simulación.

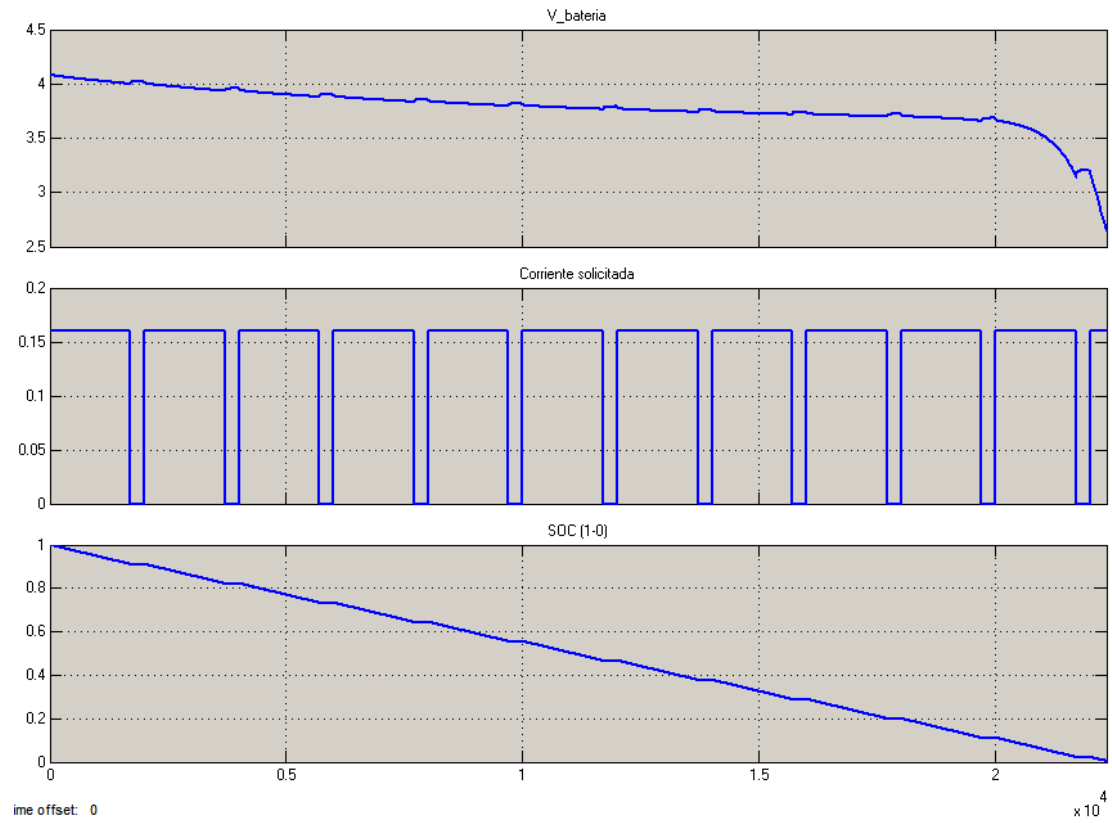


Fig. 61 Resultados para corriente de descarga pulsante de 160mA de amplitud

6. APLICACIÓN DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION PARA NISSAN LEAF

Partiendo del modelo propuesto por [Chen, 2006] y de su implementación en Simulink realizado en el capítulo anterior, se ha aplicado al sistema de almacenamiento de batería Li-ion para el Nissan Leaf de 24kWh, se ha simulado su funcionamiento comparando la distancia recorrida en ciclo NEDC declarada por el fabricante y la obtenida en la simulación.

Para ello, se ha adaptado el modelo de Simulink creado en el capítulo 5 con los parámetros del vehículo a simular y se han digitalizado los datos referentes al ciclo de homologación NEDC para poder implementarlos como carga en el modelo. A continuación se detalla el proceso seguido.

6.1 Parámetros característicos del vehículo eléctrico Nissan Leaf

El Nissan LEAF es el primer coche eléctrico de la japonesa Nissan y el más vendido a día de hoy con más de 100.000 unidades vendidas entre Europa, Estados Unidos y Japón.

Empezó su comercialización en 2010 con una versión de 24kWh capaz de realizar 145km según el ciclo NEDC. Posteriormente, se actualizó el pack de baterías proporcionándole una autonomía de 170km en NEDC. En la actualidad, Nissan comercializa dos versiones diferentes con capacidades de batería de 24 kWh y 30 kWh. La versión actual de 24kWh tiene una autonomía de 199km en ciclo NEDC, mientras que la nueva versión de 30kWh puede llegar a conseguir una autonomía de 250km [Nissan, 2017].



Fig. 62 Nissan Leaf [Nissan, 2017] y pack de baterías [INL, 2014]

Los datos declarados por el fabricante se pueden consultar en el anexo 1 de este TFM. De los datos recogidos, algunos son de mayor utilidad que otros, por ejemplo, los datos de peso, coeficiente aerodinámico y almacenamiento energético son más importantes para el tema que se trata que el tipo de suspensión que equipa el vehículo.

Por otra parte, se han utilizado los datos proporcionados por el Departamento de Energía de los EE.UU. (*U.S. Department of Energy*) en colaboración con INL (*Idaho National Laboratory*) sobre el sistema de almacenamiento eléctrico del Nissan Leaf. En concreto, se trata de dos estudios realizados sobre el vehículo para las versiones de 2011 y 2013 [INL, 2012] [INL, 2014].

Ambos estudios recopilan la configuración de las celdas de la batería, la tensión por celda, la composición de la celda y las tensiones máximas y mínimas de trabajo de la celda tipo. Además, los estudios también indican la disposición de la batería, es decir, el número de celdas en serie y las ramas en paralelo que componen el pack. Esta información es relevante para definir el modelo.

Entre las pruebas que se realizan en dichos estudios para el vehículo, destacan dos que proporcionan información vital para la construcción del modelo. Se trata de la curva tensión-SOC y la dependencia de la resistencia interna del pack respecto al estado de carga durante la descarga y durante la carga.

VEHICLE DETAILS, BATTERY DESCRIPTION AND SPECIFICATIONS	
<p>Vehicle Details</p> <p>Base Vehicle: 2011 Nissan Leaf VIN: JN1AZ0CP5BT000356 Propulsion System: BEV Electric Machine: 80 kW (peak), Permanent Magnet AC Synchronous, Air Cooled</p> <p>Battery Description</p> <p>Manufacturer: Automotive Energy Supply Corporation Type: Lithium-ion – Laminate type Cathode/Anode Material: LiMn₂O₄ with LiNiO₂/Graphite Pack Location: Under Center of Vehicle</p>	<p>Battery Specifications</p> <p>Number of Cells: 192 Cell Config.: 2 Parallel Strings of 96 in Series Nominal Cell Voltage: 3.8 V Nominal System Voltage: 364.8 V Rated Pack Capacity: 66.2 Ah Rated Pack Energy: 24 kWh Maximum Cell Charge Voltage²: 4.2 V Minimum Cell Discharge Voltage²: 2.5 V Thermal Mgmt.: Passive, Vacuum-Sealed Unit Pack Weight: 294 kg</p>

Fig. 63 Características de la batería a ensayar para Nissan Leaf 24kWh de 2011 [INL, 2012]

Como se puede ver en la figura 63, el pack de baterías del Nissan Leaf tiene 192 celdas en una configuración de dos ramas en paralelo, cada una con 96 elementos en serie. Esta disposición es posible gracias a que cada elemento tiene una capacidad de 33.1 Ah, sumando en conjunto una capacidad de 66.2 Ah para el pack de 24kWh. En la figura se pueden observar más datos referentes al pack de baterías.

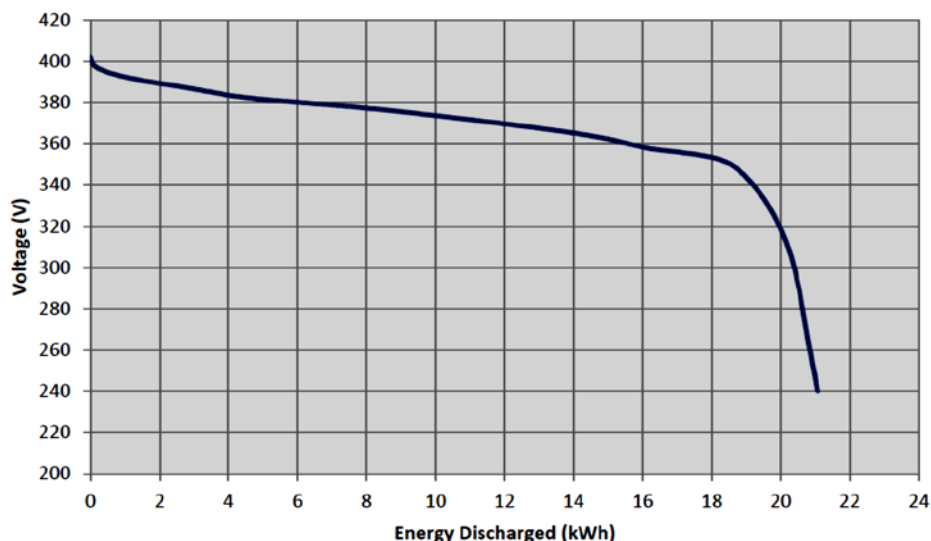


Fig. 64 Curva tensión frente energía descargada [INL, 2012]

La descarga de la batería corresponde a una tasa constante de C/3, obteniéndose una energía de 21kWh en la descarga a ese ratio. Esta prueba se ha realizado con una batería utilizada durante 10,776km (6,696 millas), por lo que se han evitado los falsos resultados de una batería completamente nueva [INL, 2012].

Para las pruebas realizadas en 2014 se obtuvieron resultados muy similares ensayando la batería de un Nissan Leaf que había recorrido 10,071km (6,258 millas) previos al ensayo. La energía obtenida en ese ensayo fue 20.8kWh para una corriente constante de descarga de C/3 [INL, 2014].

En ambos informes, las pruebas referentes a la determinación de la resistencia interna de la batería del vehículo han aportado resultados muy similares pese a que estas determinaciones suelen estar muy afectadas por las condiciones climáticas y propias de la prueba que existan en ese momento. Sin embargo, al tratarse de datos proporcionados por la misma entidad se entiende que se han realizado ambas pruebas con el mismo rigor.

Las pruebas de resistencia en descarga dan como resultado el gráfico mostrado en la figura 65. En él se puede observar que el valor se mantiene constante en torno a 0.13Ω exceptuando la zona de

descarga completa de la batería, en la que el valor comienza a subir rápidamente. El comportamiento es similar al expuesto por [Chen, 2006] en el apartado 5.1, figura 46.

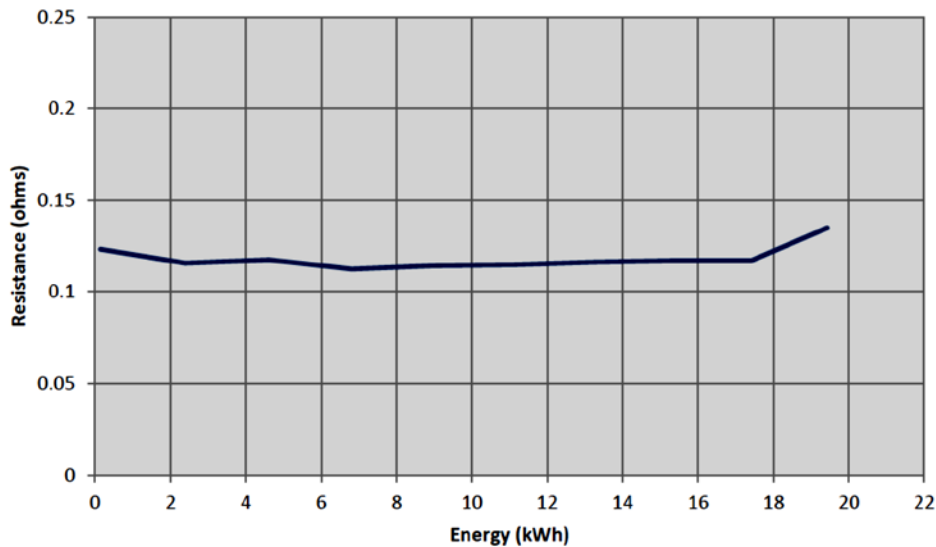


Fig. 65 Resistencia interna en función de la energía en la descarga para batería de Nissan Leaf 24kWh [INL, 2012]

En los informes se realizan más pruebas de la batería, como la potencia entregada en descarga en impulsos o la carga pulsante frente a una descarga pulsante del mismo tipo, pero no son relevantes como fuente de datos para el modelo de batería a realizar.

Pese a la importante información que proporcionan ambos estudios, no se ha conseguido información sobre otros componentes del modelo, como son las capacitancias o las resistencias internas desglosadas por elementos del modelo (resistencia serie y redes RC). A pesar de esta ausencia de información, se ha implementado el modelo de forma que aporta algunos resultados relevantes.

Otro factor importante a tener en cuenta en la simulación es el rendimiento del motor eléctrico, convertidor-variador de frecuencia y del grupo fijo de la transmisión del vehículo. Salvo en el caso del motor eléctrico, se utilizarán rendimientos genéricos para estos componentes, siendo un 95% para el grupo fijo y el convertidor eléctrico.

En el caso del motor eléctrico que equipa Nissan Leaf, el mapa de rendimiento del motor para los diferentes regímenes de par [Yamaguchi, 2011] se muestra en la figura 66. Pese a disponer de los datos, se ha simplificado la simulación asignando un rendimiento promedio del 92% en función de los valores mostrados en el gráfico.

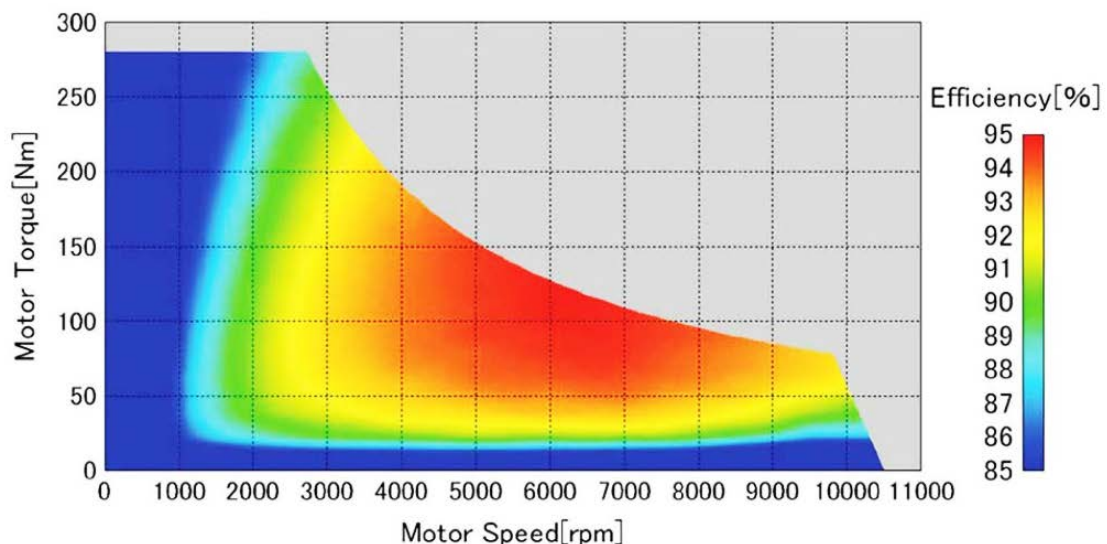


Fig. 66 Mapa de rendimiento del motor eléctrico para diferentes regímenes de carga [Yamaguchi, 2011]

6.2 Cálculo del consumo del Nissan Leaf en el ciclo NEDC

Uno de los propósitos de la simulación de la batería del Nissan Leaf es demostrar la aplicación de los modelos de baterías en el campo de la ingeniería de automoción. Para este caso, se ha propuesto simular un ciclo de homologación NEDC para el Nissan Leaf.

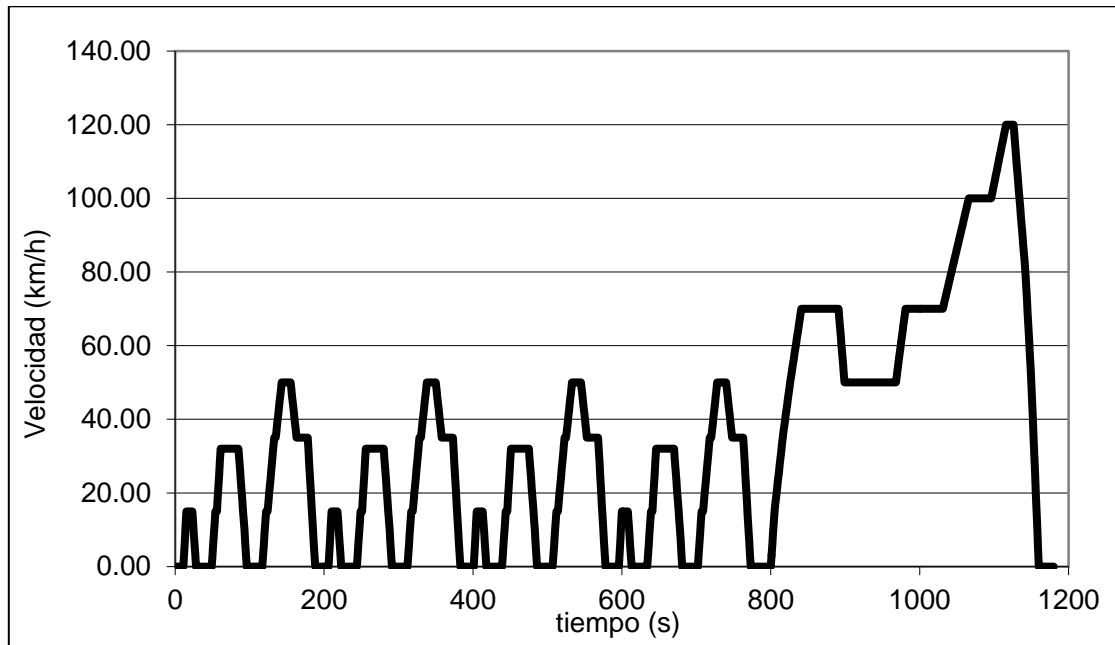


Fig. 67 Gráfico velocidad-tiempo para un ciclo urbano e interurbano NEDC completo

El *New European Driving Cycle* (NEDC) es un ciclo de conducción que consiste en cuatro ciclos de conducción ECE-15 repetidos y un ciclo de conducción extra-urbano de tipo EUDC. El ciclo NEDC es una prueba diseñada para evaluar objetivamente el impacto medioambiental de los automóviles y que actualmente se utiliza para la homologación de estos. El perfil de velocidad y tiempo se muestra en la figura 67.

Para el cálculo del consumo energético del vehículo durante el ciclo se han utilizado las ecuaciones básicas de la automoción [Tinaut, 2016] que definen la potencia necesaria de un vehículo cualquiera teniendo en cuenta su masa, la fuerza de rozamiento aerodinámica y de rodadura, y la acción de la gravedad en el caso de superficies inclinadas. Esta ecuación se define como:

$$P = \frac{v}{\eta_t} \left(F_f + F_\omega + F_g + m \frac{dv}{dt} \right)$$

Donde P es la potencia necesaria para mover el vehículo con una velocidad v . El resto de parámetros de la ecuación indican el rendimiento de las transmisiones (η_t), la fuerza aerodinámica resistente (F_f), la fuerza de resistencia a la rodadura (F_ω), la fuerza gravitatoria (F_g) y la masa del vehículo (m).

Los parámetros anteriores se pueden calcular según las siguientes ecuaciones:

- Fuerza de resistencia a la rodadura: $F_f = m \cdot g \cdot f_r$
- Fuerza aerodinámica resistente: $F_\omega = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (v + v_w)^2$
- Fuerza gravitatoria: $F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$

Siendo g la aceleración de la gravedad, ρ la densidad del aire, A_f el área frontal del vehículo, C_D el coeficiente aerodinámico del vehículo, v_w la velocidad del viento, α el ángulo de inclinación de la pendiente y f_r el coeficiente de resistencia a la rodadura, que se define como:

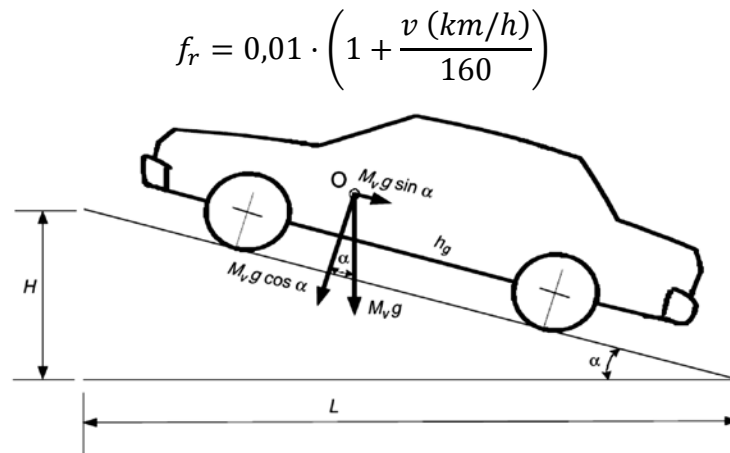


Fig. 68 Definición de las fuerzas que actúan en un vehículo para un determinado ángulo [Ehsani, 2005]

Además de definir las ecuaciones básicas de la automoción es necesario conocer los parámetros de referencia del vehículo a simular en el ciclo. En este caso, los datos proporcionados por el fabricante Nissan se han recogido en el anexo 1.

Una vez definidos todos estos parámetros, el cálculo se ha realizado trasladando las expresiones matemáticas a un libro Excel donde se ha calculado la potencia necesaria para que un Nissan Leaf de 24kWh realice un ciclo completo.

En los cálculos realizados se ha considerado viento nulo y coeficiente base de rodadura 0.01, puesto que esta prueba se realiza bajo recinto cerrado y rodillos de características similares al asfalto de cualquier carretera. También se ha tenido en cuenta la regeneración de energía que equipa este tipo de vehículos.

A continuación se muestran un gráfico (figura 69) que muestra la potencia demandada en cada instante por el vehículo considerado. En entorno urbano (50km/h) se puede considerar una potencia pico de 20kW, mientras que en entorno interurbano (120km/h) esta se duplica. En cambio, durante los procesos de frenado el vehículo puede absorber potencias destacables suponiendo un 100% de rendimiento durante el frenado.

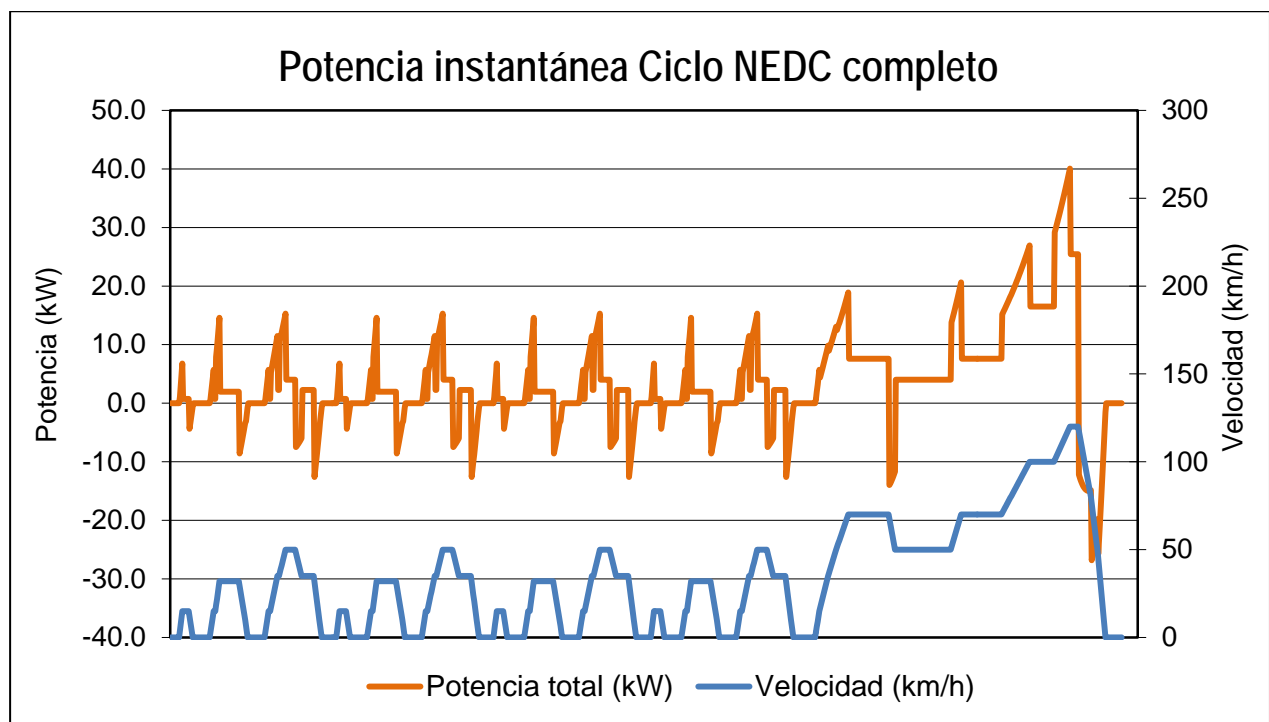


Fig. 69 Potencia instantánea demandada para Nissan Leaf 24kWh durante un ciclo NEDC completo

De hecho, la regeneración durante los procesos de reducción de velocidad y de frenado puede suponer un ahorro importante de energía, con el consiguiente incremento de la autonomía del vehículo. Para el caso actual de estudio hay una diferencia de 1,400kJ, lo que supone un ahorro del 30% de consumo si se opta de dotar o no al mismo vehículo de un sistema de regeneración. En el siguiente gráfico se ilustra este concepto.

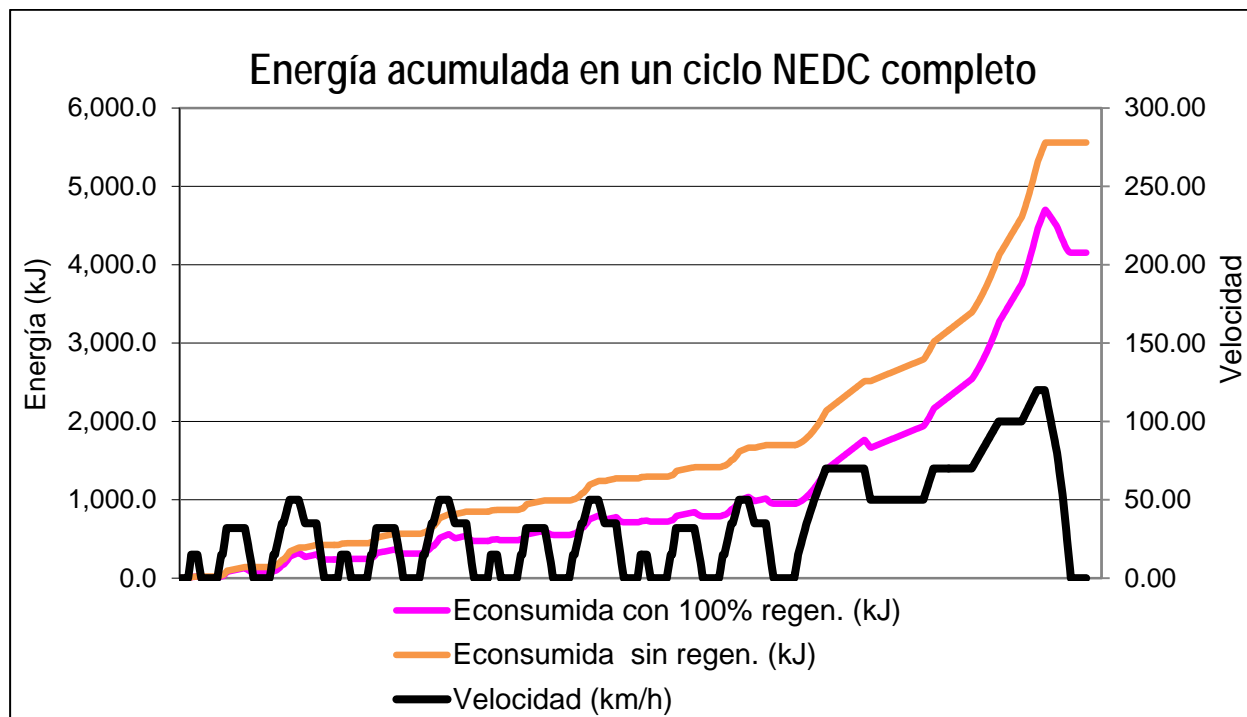


Fig. 70 Energía consumida acumulada para Nissan Leaf 24kWh durante un ciclo NEDC completo

6.3 Adaptación del modelo Simulink para Nissan Leaf

Como se expuso al comienzo del capítulo, partiendo del modelo propuesto por [Chen, 2006] y de su implementación en Simulink realizada en el capítulo anterior, se ha aplicado al sistema de almacenamiento de batería Li-ion para el Nissan Leaf de 24kWh. En este apartado se detalla el proceso seguido.

6.3.1 Factores de corrección de los parámetros del modelo

Se ha partido del modelo Simulink creado anteriormente con las parametrizaciones de los componentes utilizados en dicho modelo. Para adaptarlo al sistema de almacenamiento del Nissan Leaf se han aplicado una serie de factores correctores en las entradas del modelo.

La tensión de celda de la batería TCL PL-383562 del modelo desarrollado está comprendida entre 4.10V y 2.65V, mientras que la tensión de celda para el pack de batería equipado por Nissan Leaf está comprendida entre 4.20V y 2.50V. Al tener ambas celdas valores muy próximos se puede obtener un parámetro que relacione ambas curvas para introducirlo al modelo. Para este caso, lo denominamos $F_{Tension}$, cuyo valor es el siguiente:

$$F_{Tension} = \frac{V_{max_celda\ LEAF}}{V_{max_TCL\ PL-383562}} = \frac{4.20}{4.10} = 1.0244$$

Del mismo modo se puede crear un parámetro que relacione los componentes del circuito equivalente del modelo. En este caso, al desconocer el valor por separado de los componentes R_s , R_1 y R_2 y conocer únicamente el valor del sumatorio de las resistencias internas de la batería del Nissan Leaf, se calcula un parámetro global que incluya a todos.

Para realizar este cálculo se parte de los valores medios individuales de los componentes del modelo para la batería TCL PL-383562. Si se compara su suma con el valor de la resistencia interna de la

batería del Nissan Leaf proporcionado por [INL, 2012] se puede observar que los valores tienen el mismo orden de magnitud.

Tabla 10 Comparativa de valor para componentes del modelo entre TCL PL-383562 y Nissan Leaf

	TCL PL-383562	Nissan Leaf
Rs	0.07Ω	<i>Desconocido</i>
R1	0.05Ω	
R2	0.05	
$\sum [Rs, R1, R2]$	0.17Ω	0.13Ω

El parámetro F_{RTotal} se calcula como el cociente del valor de la resistencia interna total de la batería del Nissan Leaf y la resistencia interna total de la batería TCL PL-383562 utilizada en el modelo del capítulo 5.

$$F_{RTotal} = \frac{R_{T Nissan Leaf}}{R_{T TCL PL-383562}} = \frac{0.13}{0.17} = 0.7647$$

En el caso de las capacitancias del modelo se ha supuesto que el factor (F_{CTotal}) para adaptar las curvas de parametrización es el mismo que en el caso de la resistencia interna puesto que los parámetros del pack de batería de Nissan Leaf son del mismo orden de magnitud y de valor similar. Por tanto, a la hora de introducir el factor de corrección a C1 y C2 se ha utilizado F_{RTotal} .

$$F_{RTotal} = F_{CTotal} = 0.7647$$

6.3.2 Introducción de factores de corrección y verificación del modelo

Partiendo del modelo desarrollado en Simulink para la batería TCL PL-383562 se han introducido los factores de corrección a los componentes del modelo mediante la conexión en serie de bloques de tipo "Gain". Este tipo de bloques realizan la función producto pero simplificando la entrada de variables al bloque puesto que una de ellas es siempre constante, es decir, el factor de corrección es la entrada constante.

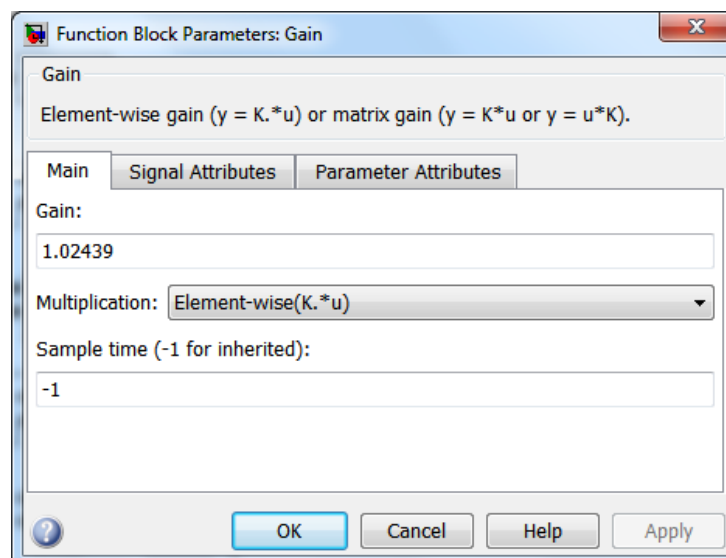


Fig. 71 Ventana de configuración del bloque "Gain"

El bloque se ha configurado para una multiplicación vectorial de los parámetros ya que Simulink trata los datos de la simulación como un vector de longitud n , donde n es el tiempo en segundos. De esta forma se han colocado este tipo de bloques a la salida del estimador de los parámetros del modelo.

En el caso de la tensión, el bloque "Gain" se aplicó directamente a la salida del calculador de tensión, adaptando la tensión de celda a la del Nissan Leaf.

Para los componentes del circuito eléctrico equivalente, estos factores se han incluido dentro de los subsistemas de cálculo de caída de tensión. De este modo el esquema global del subsistema de celda no se satura y es más legible la programación realizada.

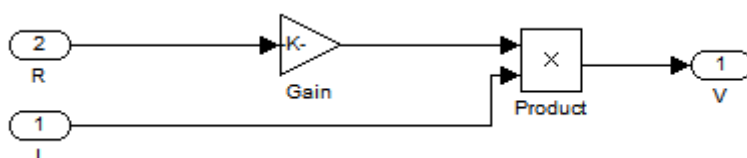


Fig. 72 Modificación del subsistema de cálculo caída de tensión en la resistencia serie del modelo

En el caso de las ramas RC se ha configurado un bloque de ganancia para la variable R y otro de idéntica configuración para la variable C. De este modo, si es necesario variar el factor de corrección para un solo componente resulta más sencillo.

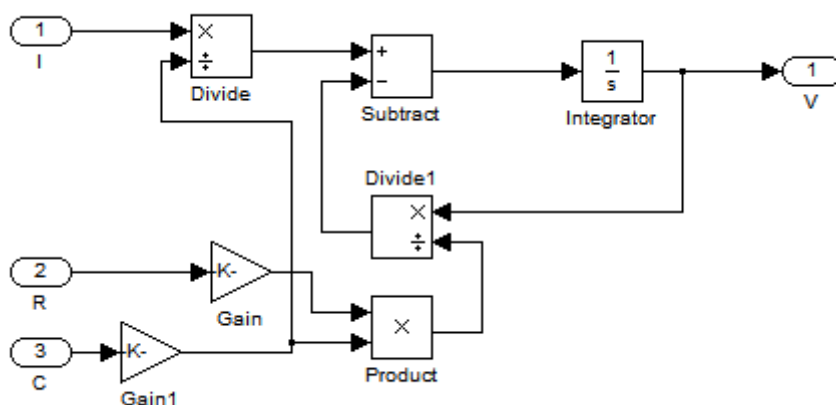


Fig. 73 Modificación del subsistema de cálculo de caída de tensión en cada rama RC del modelo

Una vez introducidos los factores de corrección se ha simulado el modelo con los nuevos parámetros que se aproximan a la batería del Nissan Leaf. Los resultados obtenidos en esta simulación se han comparado con los presentados por el informe [INL, 2012] para el Nissan Leaf de 24kWh de 2011.

En dicho informe se realiza una descarga completa de la batería a corriente constante a una corriente de $C/3$, que para esta batería se corresponde con 11.03A. En el modelo se ha seguido una configuración del modelo como la mostrada en el apartado 5.6.1, pero configurando la entrada a la fuente de corriente al valor antes mencionado.

Posteriormente se ha simulado durante el tiempo necesario para agotar completamente la batería, y con los datos de salida de tensión y SOC proporcionados por el modelo se han graficado junto con los proporcionados por [INL, 2012]. El resultado se puede observar en la figura 74.

Como se puede ver, la tensión del modelo posee un error aceptable en comparación con los valores reales proporcionados por el informe [INL, 2012]. Las zonas de mejor ajuste se dan desde 0 a 4kWh de descarga, mientras que el peor ajuste se corresponde a descargas mayores de 18kWh.

Para verificar si el modelo es válido es necesario simular bajo unas ciertas condiciones conocidas en las que conocemos el resultado de antemano gracias a la experimentación. En este caso se simula un ciclo NEDC para comparar la autonomía declarada por el fabricante y la obtenida mediante el modelo.

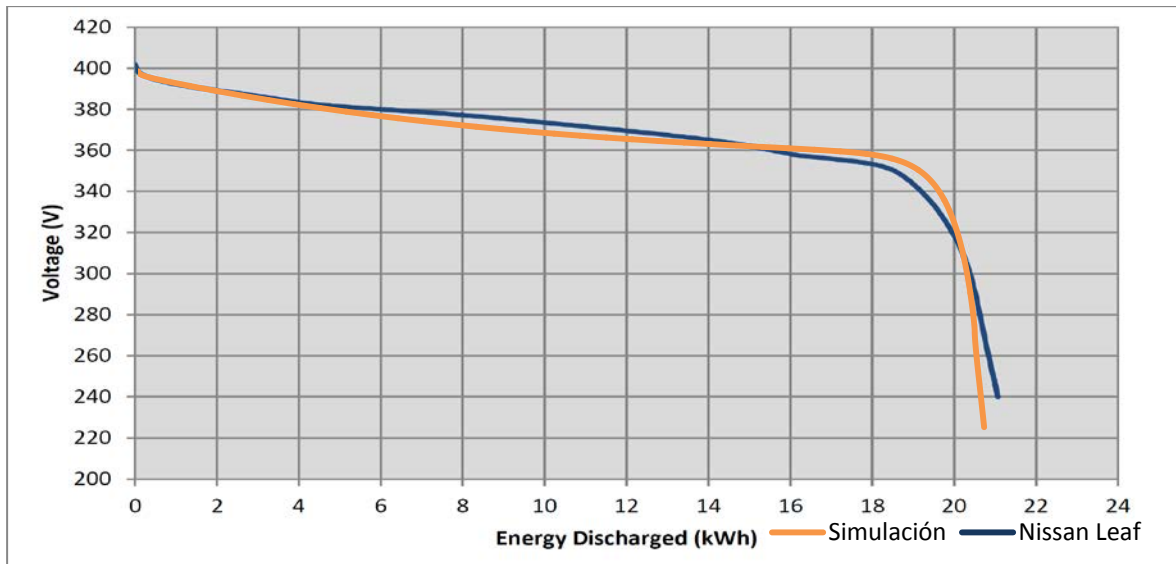


Fig. 74 Tensión frente a la energía descargada para el pack de baterías del Nissan Leaf

6.3.3 Configuración del modelo para simular ciclo NEDC

Para poder simular el vehículo en un ciclo de homologación NEDC para verificar la autonomía con la declarada por el fabricante se han añadido varios subsistemas complementarios al modelo. Estos subsistemas no afectan al comportamiento del modelo de batería.

Se ha añadido, entre otros, un subsistema de medición de tiempo en horas, minutos y segundos para controlar la duración de la simulación, un contador de energía para controlar el trasiego de energía saliente de la batería y se ha desplazado el controlador de fin de simulación al exterior de la batería, de tal forma que es más sencillo variar las condiciones de parada. Además, este último se ha modificado para que el criterio sea el SOC de la batería.

En la figura 75 se muestra un esquema del modelo de simulación del Nissan Leaf en una prueba de autonomía bajo ciclo NEDC:

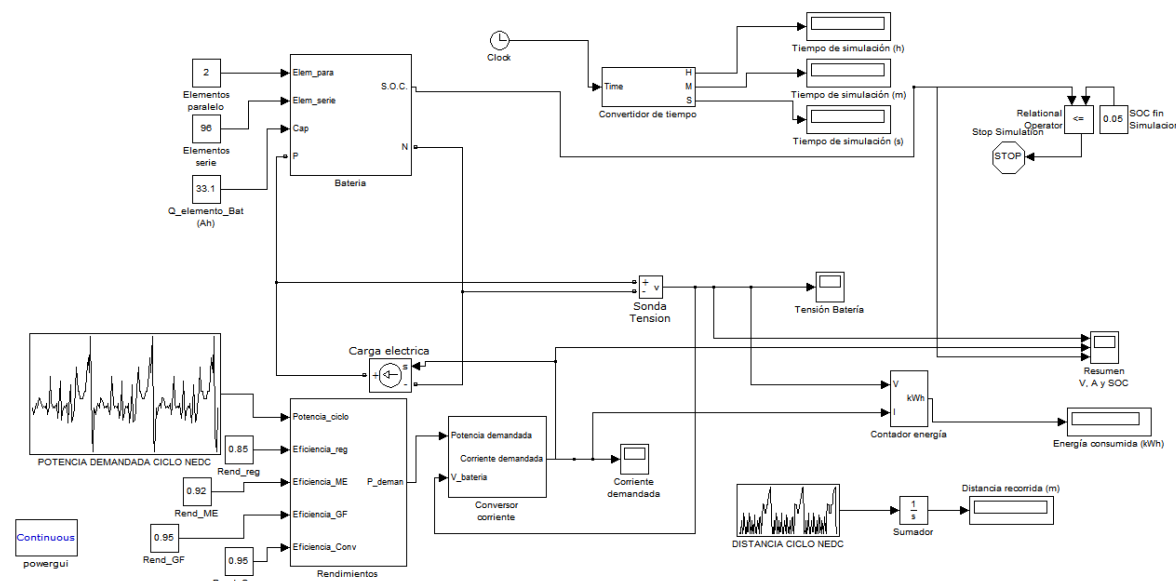


Fig. 75 Esquema general del modelo de simulación para Nissan Leaf en ciclo NEDC

Para introducir en la simulación los datos de carga del vehículo en el ciclo NEDC calculados previamente, se ha dispuesto el bloque "Potencia demandada Ciclo NEDC", que traslada los valores cargados en el archivo `consumo_LEAF.mat` y lo repite cíclicamente.

Del mismo modo se ha realizado para la distancia recorrida en el bloque “Distancia Ciclo NEDC” a través del archivo `distancia_NEDC.mat`, con la diferencia de incluir un sumatorio para poder almacenar la distancia recorrida durante la prueba. Esta se muestra en el *display* dispuesto para ello.

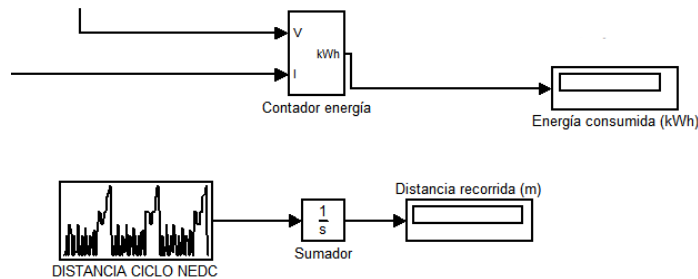


Fig. 76 Detalle del contador de distancia y del contador de energía del modelo

Puesto que se proporciona la potencia que se demanda en rueda para el vehículo, se ha creado el subsistema de rendimientos, que tiene como entrada los rendimientos del convertidor, grupo fijo y del motor eléctrico. Adicionalmente posee el rendimiento de regeneración durante el frenado para la recarga de la batería. Todos estos rendimientos se han considerado constantes y se puede cambiar su valor editando directamente el bloque que contiene su valor.

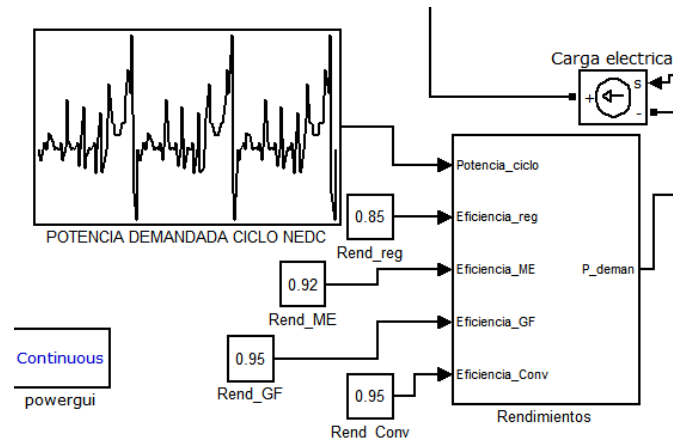


Fig. 77 Detalle del bloque de potencia para ciclo NEDC y aplicación de rendimientos en el modelo

La salida del subsistema de rendimientos tiene aplicados sobre la potencia a demandar a la batería la aplicación del coeficiente correspondiente en función del momento del ciclo. Esta señal de salida sirve de entrada directa al subsistema de conversión de corriente, que junto con la tensión en bornes de la batería, proporciona la señal de corriente a la fuente de corriente que hace la función de carga entre los bornes de la batería. La señal también se envía al contador de energía y al sistema de representación gráfica del modelo.

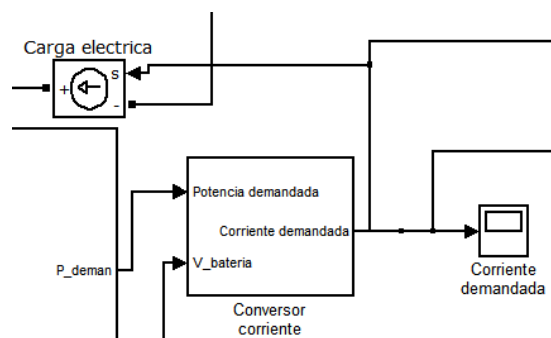


Fig. 78 Detalle del subsistema de conversión de corriente y carga eléctrica del modelo

Finalmente, el modelo dispone de un contador de tiempo (en cada *display* se muestran las horas, los minutos y los segundos) y la condición de parada del modelo, fijada en el 5% de la capacidad de la batería.

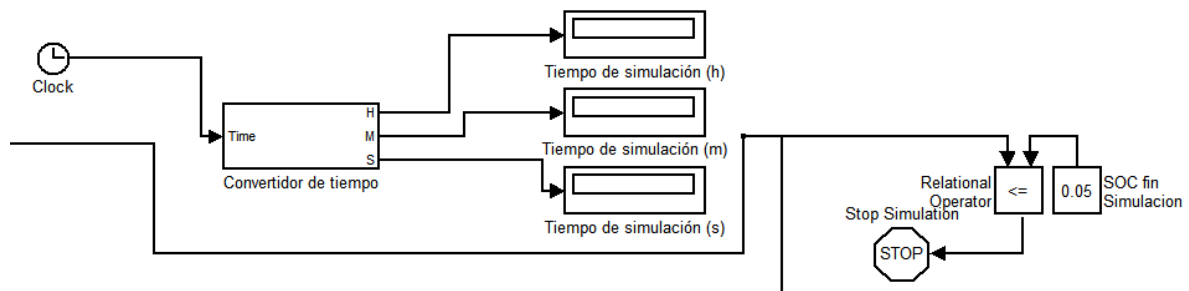


Fig. 79 Detalle del contador de tiempo y del sistema de parada del modelo

El modelo de simulación de autonomía bajo ciclo NEDC para el Nissan Leaf se encuentra en el archivo Sim_bat_LEAF.mdl adjunto a este trabajo. Para su correcto funcionamiento es necesario cargar previamente en Matlab los archivos consumo_LEAF.mat y distancia_NEDC.mat.

7. RESULTADOS DEL MODELO DE BATERÍA LI-ION PARA NISSAN LEAF

Este capítulo expone las diferentes hipótesis de simulación utilizadas en el modelo y los resultados asociados a estas. Se han recogido los resultados de cada tipo de simulación, así como la influencia de una variación en los diferentes componentes del vehículo asociados al sistema de almacenamiento como son el convertidor o la regeneración durante el frenado.

En el capítulo anterior se ha preparado el modelo para poder simular una prueba de autonomía y verificar junto con los datos del fabricante el correcto funcionamiento del modelo según los datos disponibles en la elaboración de este trabajo.

7.1 Simulación de prueba de autonomía en ciclo de homologación NEDC

Partiendo del modelo presentado en el apartado [6.3.3](#) y al que se le han cargado todos los datos de potencia demandada por el vehículo (Nissan Leaf 24kWh 2011) en las condiciones marcadas para la realización del ciclo NEDC previamente calculada.

Los rendimientos utilizados son un 95% para el convertidor y grupo fijo, un 92% para el motor y un 85% para la regeneración de energía. Estos porcentajes se han calculado en relación con el material disponible para Nissan Leaf y otros vehículos similares. Sin embargo, el porcentaje de rendimiento de la regeneración en el frenado se ha estimado en un 85% según la figura 80.

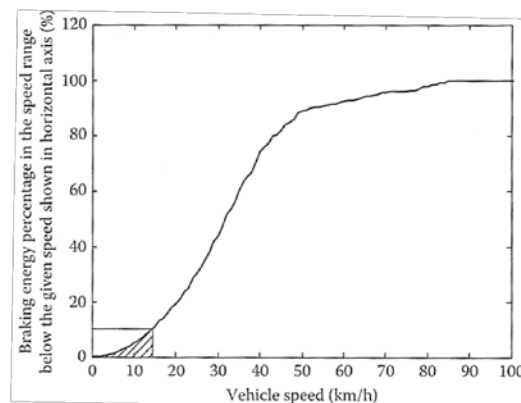


Fig. 80 Energía regenerada durante el frenado en función de la velocidad [Ripoll, 2014]

La configuración de parada de la simulación se ha configurado de tal forma que esta se detendrá si la batería se descarga en un 95%, lo que equivale a un SOC del 5%, o a los 32,000s de simulación. El propósito de fijar un tiempo máximo de simulación es prevenir que las ejecuciones se demoren en el tiempo o evitar bucles infinitos. En condiciones normales, ese tiempo basta para realizar la prueba NEDC.

LA simulación se inicia pulsando en el icono "play" de la barra superior. Simulink comienza compilando el modelo, siendo posible distinguir esta fase de la simulación porque la barra inferior derecha se ilumina de color verde. Tras la compilación del modelo comienza a realizar los cálculos matemáticos con el modelo y almacena los resultados en la variable *tout* de salida genérica del modelo. En este estado la barra inferior derecha cambia a color azul.

Si adicionalmente se necesita extraer de la simulación es necesario conectar un bloque de salida de datos (a archivo o a *workspace*) a la variable. Este tipo de bloques se encuentran en la librería de bloques genéricos de Simulink.

Al finalizar la simulación los diferentes *displays* o pantallas distribuidas por el modelo muestran los resultados finales, es decir, en el momento que se detiene el vehículo. Estos resultados son tiempo de la simulación, energía proporcionada por la batería y distancia recorrida. Entre el resto de resultados, se pueden observar gráficos de tensión, corriente y SOC ya sea por separado o en conjunto mediante doble pulsación en los bloques de tipo "scope".

7.1.1 Resultados de la simulación de prueba de autonomía

Los resultados obtenidos para una simulación bajo las condiciones anteriormente especificadas se pueden observar en las figura 82 y 83. A continuación se detallan los resultados obtenidos.

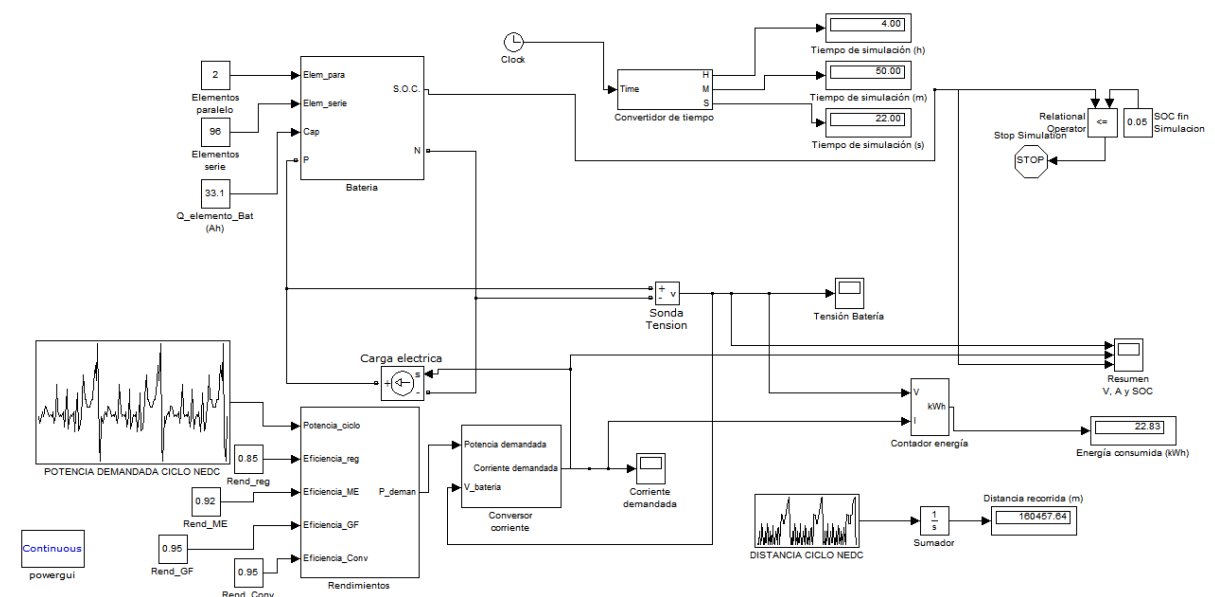


Fig. 81 Resultados de la simulación de prueba de autonomía en ciclo NEDC

La autonomía obtenida tras la simulación del vehículo ha sido de 160.5km. El resultado obtenido es algo inferior a la autonomía declara por el fabricante para la versión de 2011 del Nissan Leaf, que era de 170km. Esta diferencia puede deberse principalmente al ajuste fijo del rendimiento del motor eléctrico en vez de seguir el modelo los rendimientos declarados en la figura 76.

Sin embargo, otro factor determinante en la autonomía obtenida es el rendimiento de regeneración. Un aumento de este puede proporcionar mayores autonomías para un mismo ciclo de conducción. Por lo tanto, el rendimiento es otro factor a estudiar tal y como se hace en el apartado [7.2](#).

En cualquier caso, la autonomía real del vehículo se encuentra bastante por debajo de estos datos puesto que la autonomía depende en cualquier caso de la forma de conducción, el recorrido, la velocidad y multitud de factores más.

Otro de los resultados de la simulación es el tiempo de autonomía, que en las condiciones NEDC asciende a 4 horas y 50 minutos. Este tiempo puede considerarse elevado, sin embargo, por el tipo de constitución del ciclo NEDC es normal puesto que el ciclo se configura con cuatro repeticiones de cuatro repeticiones de ciclo urbano EFE-15 y un ciclo extraurbano. Bajo estas circunstancias se puede considerar que la mayor parte del recorrido es urbano, por lo que son habituales duraciones temporales mayores. En cambio, para un ciclo mayoritariamente de carretera y de conducción estable (por ejemplo, fijo a 100km/h) el tiempo hasta agotar la batería sería menor puesto que el vehículo necesita más energía para mantener esa velocidad debido a la fuerza aerodinámica y apenas hay regeneración de frenado.

La energía obtenida de la batería ha sido 22.83kWh, el cual se corresponde con el 95% del SOC, ya que esta es la condición de parada del modelo. Este contador discrimina la energía que se recupera de la frenada, es decir, la contabiliza como negativa, no siendo equivalente a la energía demandada por el vehículo.

La variación de la tensión de la batería respecto al tiempo se puede observar en la figura 83. En ella se aprecian las oscilaciones debidas a los cambios de sentido de la corriente sobre la batería y de magnitud de la propia corriente demandada.

Del mismo modo, se puede observarla intensidad en la figura 83, junto con el estado de carga, todos ellos en función del tiempo. En esta representación se puede visualizar fácilmente el comportamiento

de la batería para uno u otro régimen de carga en los tres parámetros estudiados. En la figura 82 se detalla para el primero de los 15 ciclos NEDC realizados en la simulación.

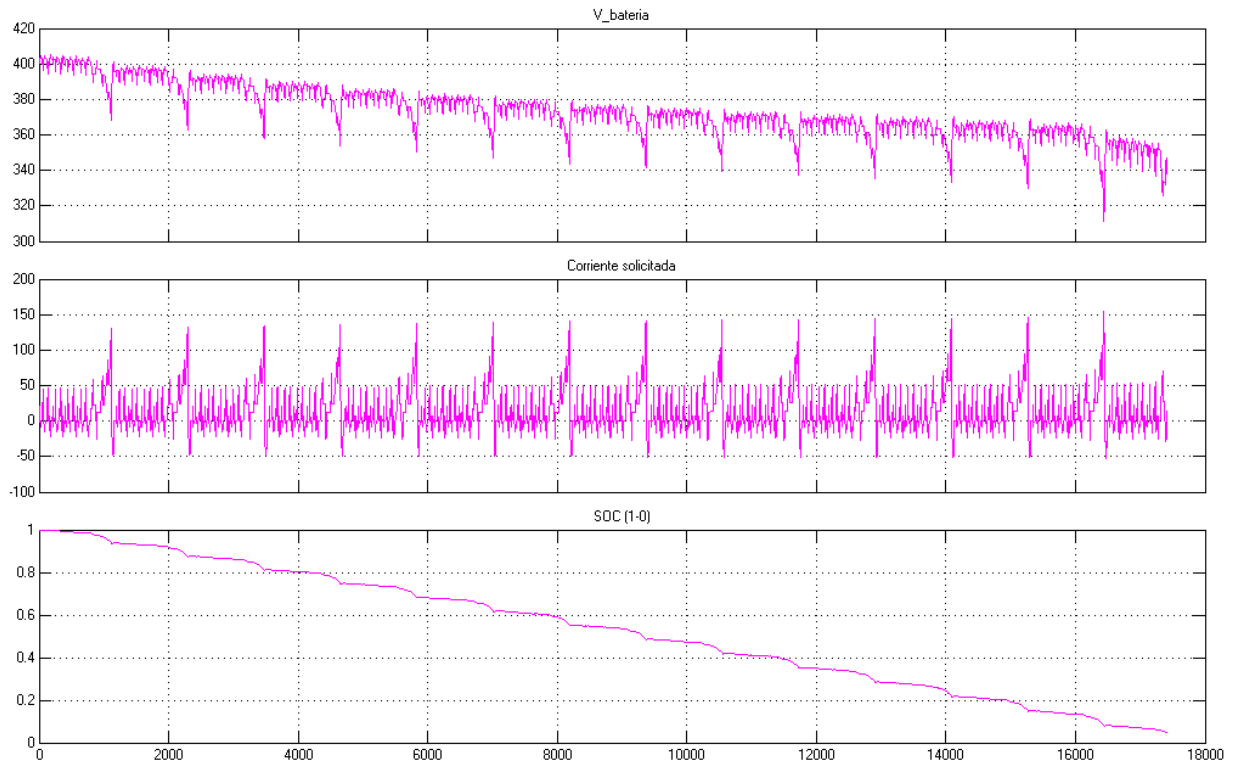


Fig. 82 Representación de la tensión, corriente y SOC en función del tiempo durante toda la simulación

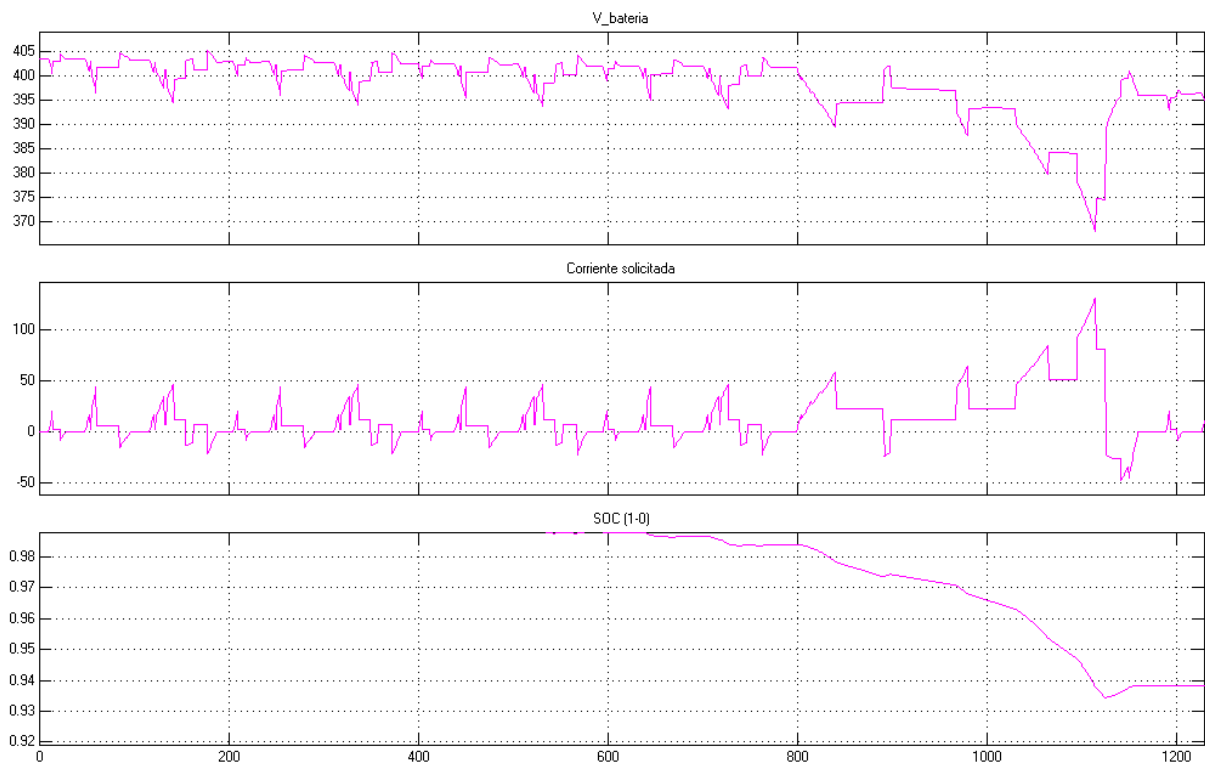


Fig. 83 Representación de tensión, corriente y SOC en función del tiempo para el primer ciclo de la simulación

7.2 Influencia de la regeneración del frenado en la autonomía

Como se ha comentado al comienzo del apartado [7.1](#) (figura 80) la energía recuperada en la frenada de un vehículo no se puede aprovechar de manera constante y depende mayoritariamente de la velocidad.

En el modelo, se ha tratado este parámetro como algo fijo ya que el porcentaje de recuperación y el rango de velocidad óptimo varía en función del vehículo a estudiar. En el modelo se ha estimado este porcentaje en un 85% debido a la velocidad media del ciclo NEDC.

Sin embargo, si variamos ese porcentaje desde el 100% de energía recuperada hasta el 0% y que, tras pasar por el motor y el convertidor de potencia, se inyecta a la batería se obtiene una variación importante en la autonomía del vehículo eléctrico. Por este motivo, es interesante que este tipo de vehículos incorporen un sistema eficiente de regeneración en el frenado.

Si graficamos las autonomías obtenidas durante la variación del parámetro asociado a la regeneración obtenemos el gráfico mostrado en la figura 84. La mayor autonomía se da para el 100% de aprovechamiento con 163km, mientras que si no hubiese opción alguna de regenerar energía en el vehículo la autonomía se ve reducida a 137km.

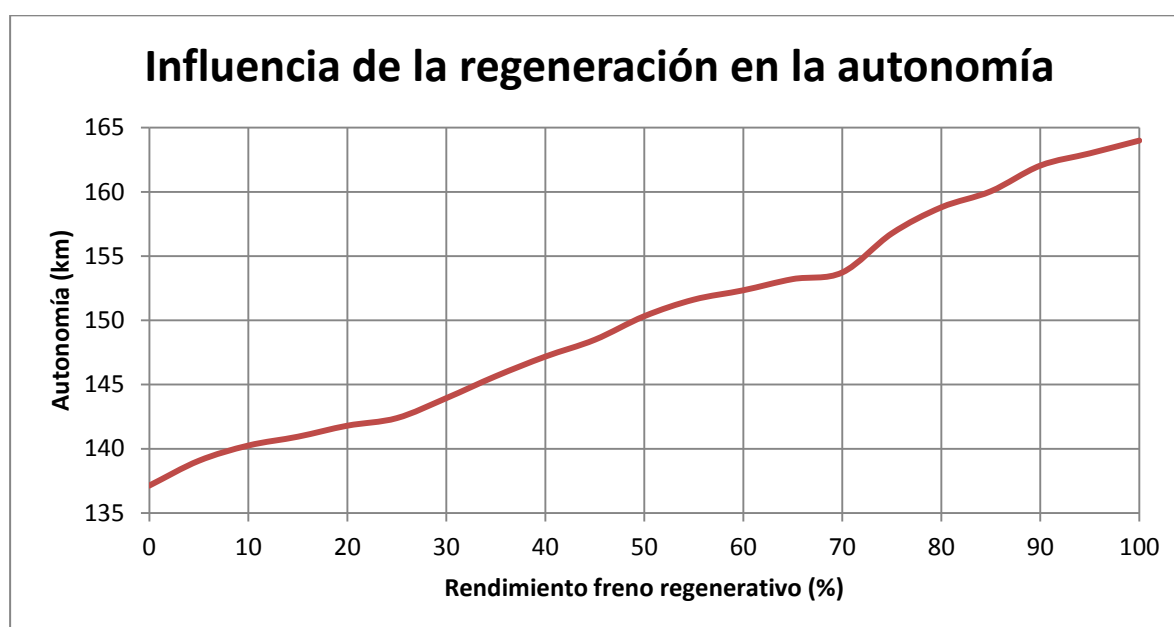


Fig. 84 Autonomía del vehículo simulado frente al rendimiento del sistema de regeneración de energía

Partiendo de datos más concretos sobre el Nissan Leaf, se puede ajustar más el porcentaje o la función que determina el rendimiento de regeneración obteniendo valores más cercanos a la realidad y dependientes del ámbito de conducción.

Desde Nissan no se proporciona más información sobre este sistema que la figura 85 sobre el funcionamiento del sistema de regeneración durante el frenado, pero no aporta ningún dato relevante que no se haya expuesto anteriormente.

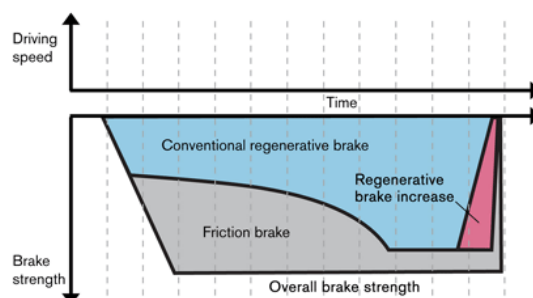


Fig. 85 Zonas de actuación del frenado convencional y del regenerativo en Nissan Leaf [Nissan, 2017]

7.3 Influencia del envejecimiento de la batería en la autonomía

En el apartado [2.7](#) se exponen los principales mecanismos de envejecimiento de las baterías de iones de litio y se detallan los efectos sobre las propias baterías en relación a la pérdida de capacidad de almacenaje de energía y el aumento de la resistencia interna entre otros.

En este apartado se ha simulado los efectos de envejecimiento para la batería del Nissan Leaf utilizado en el modelo. Para ello se ha estudiado la influencia de un aumento de la resistencia interna de la batería y, también, una pérdida relativa de capacidad sobre la batería del modelo. A continuación se detalla cada uno de los estudios.

7.3.1 Aumento de la resistencia interna de la batería

Uno de los efectos del envejecimiento de las baterías de iones de litio es un aumento de la resistencia interna de la batería. Este aumento de resistencia produce que disminuya la tensión en bornes y que aumenten las pérdidas en forma de calor en la propia batería.

Aunque predecir y cuantificar el aumento de resistencia para una batería es complicado, se ha llevado al modelo de batería de Nissan Leaf de tal forma que se aumentado la resistencia interna de sus componentes en un 10%, 20%, 30% y 50%.

Este aumento se ha realizado sobre los bloques "Gain" utilizados para aplicar el factor correctivo del cambio de batería, siendo fácil de controlar y editar este tipo de modificaciones. Los resultados sobre la tensión para una descarga constante de C/3 se pueden ver de manera conjunta en la figura 86.

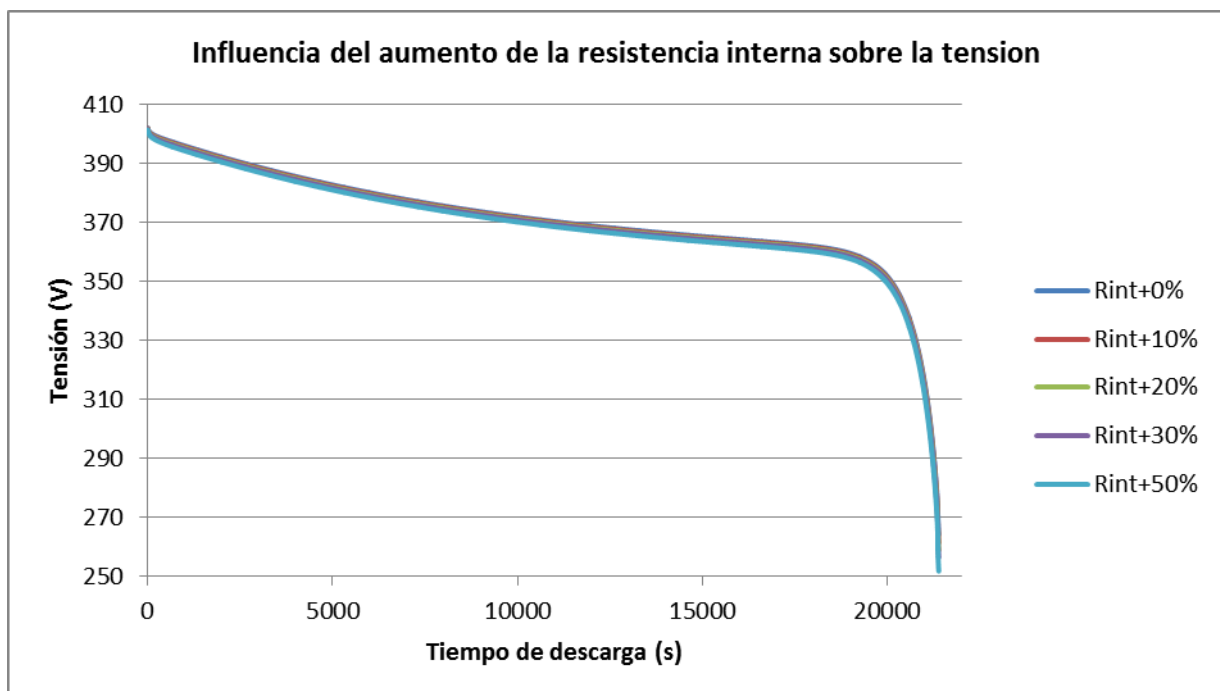


Fig. 86 Influencia del aumento de la resistencia interna sobre la tensión en bornes en C/3

Llevando estas pruebas de aumento de resistencia interna a la autonomía del vehículo se obtienen resultados más visuales, comprobando que un aumento del 50% en la resistencia interna supone una pérdida de autonomía de 4km y un aumento del 100% supone una pérdida de 7km (4.3% de la autonomía).

Tabla 11 Influencia del aumento de resistencia interna en la batería sobre la autonomía

	Rint+0%	Rint+10%	Rint+20%	Rint+30%	Rint+50%	Rint+100%
Autonomía (km)	160.5	159.5	159.0	158.7	156.9	153.2

Por lo tanto, y según lo expuesto en la tabla 16, un aumento de la resistencia interna de forma individual genera una pérdida de autonomía debido al aumento de las pérdidas en el interior de la batería.

7.3.2 Pérdida de capacidad del pack de baterías

El otro efecto característico del envejecimiento de las baterías de iones de litio es la pérdida de capacidad. En este apartado se ha realizado un estudio en el modelo suponiendo una pérdida progresiva de capacidad de todos los elementos en partes iguales.

Para ello, se ha editado en el modelo el bloque de introducción de datos de capacidad de celda con los valores nominales reducidos un porcentaje. De este modo se consigue visualizar como afecta la pérdida de capacidad a la autonomía del vehículo. Los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12 Influencia de la reducción de la capacidad de la batería sobre la autonomía

Capacidad	100%	90%	80%	70%	60%	50%
Autonomía (km)	160.5	142.5	128.5	111.8	96.5	80.5

La pérdida de capacidad en una batería supone una importante pérdida de autonomía. En este caso, una pérdida de capacidad del 10% reduce la autonomía del vehículo bajo ciclo de homologación a 142km frente a los 160km que ofrece con la totalidad de la capacidad. La autonomía se ve más reducida para casos extremos como el 60% o 50%.

En automoción, se considera que es necesario sustituir la batería del vehículo eléctrico cuando ésta ha disminuido su capacidad un 25%, es decir, posee un 75% de la capacidad original. Esta política es la que sigue la alianza Renault-Nissan cuando el vehículo eléctrico posee una batería en alquiler.

Si a este efecto se sumase el aumento de resistencia interna y otros más efectos del envejecimiento propios de las baterías, como la pérdida de potencia disponible, obtendríamos una autonomía aún menor. Por tanto, el punto débil de las actuales baterías de uso en vehículos eléctricos es el envejecimiento, factor determinante en la autonomía del vehículo a largo plazo en el tiempo.

8. CONCLUSIONES

8.1 Conclusiones

8.1.1 Conclusiones generales

Actualmente el vehículo eléctrico está apostando fuertemente por la tecnología de iones de litio para obtener cierta ventaja frente a los vehículos convencionales de combustión interna. Pese a que la tecnología Li-ion presenta múltiples ventajas frente a otras tecnologías de almacenamiento, aún es necesario investigar y desarrollar esta tecnología para que los vehículos eléctricos sean competitivos.

En el presente Trabajo Fin de Master se han expuesto las características y características de las baterías de iones de litio, cuyas características en cuanto a seguridad, precio y prestaciones superan a las tradicionales baterías de plomo-ácido o de níquel-metalhidruro que se han utilizado en tracción eléctrica.

Del mismo modo, se ha detallado el principio de funcionamiento, los procesos de carga y descarga y los procesos de envejecimiento de las baterías de iones de litio, que en muchos casos son desconocidos o no se conocen en detalle.

Además, se ha expuesto las razones de utilización de los modelos de baterías, que permiten reproducir el comportamiento de una celda aislada o un pack de batería completo bajo determinadas condiciones. Los modelos simples aportan unos resultados que resultan orientativos, pero no suponen pruebas en laboratorio de excesiva complejidad ni fuertes cargas informáticas. A medida que aumenta la complejidad del modelo, los resultados son más precisos, pero la dificultad para obtener los parámetros de la batería o la carga computacional aumenta.

Por último se ha realizado un ejemplo de aplicación práctica de un modelo de batería en ingeniería de automoción, de tal forma que se sirva como muestra del potencial de estos en los procesos de diseño y verificación de los sistemas de almacenamiento ante determinadas circunstancias.

8.1.2 Conclusiones específicas

Además de las conclusiones generales, en la realización del presente trabajo también se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se ha dado a conocer la **historia** de las baterías de litio, incluyendo las **características** entre baterías primarias y secundarias, y dentro de estas últimas entre las que contienen metal como electrodo que permitan al lector diferenciarlas.
- El **principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio** se ha expuesto junto con sus características de tal forma que permitan relacionar los mecanismos químicos presentes con el comportamiento de la batería en ante determinadas situaciones.
- Se han comentado los principales **módulos de gestión de carga** y su necesidad en este tipo de baterías recargables, así como se detalla el proceso de carga rápida y lenta que es necesario aplicar.
- Se ha definido el concepto de modelo de batería y **se han expuesto los diferentes tipos de modelos existentes** que permiten representar las baterías de iones de litio desde un aspecto electroquímico o desde un punto de vista eléctrico, centrándose el trabajo en los modelos de circuito equivalente por ser estos más representativos en automoción.
- Se han explicado los **procedimientos necesarios** llevados a cabo en laboratorio para **caracterizar una batería** para parametrizar los datos de entrada en un modelo.
- **Se ha implementado un modelo de batería de iones de litio** en un *software* de simulación que ha permitido dar a conocer el proceso a seguir. Del mismo modo, se ha puesto de

manifiesto la facilidad que proporcionan las nuevas tecnologías para simular cualquier conjunto físico.

- A partir de los datos declarados por el fabricante y los proporcionados por [INL,2012] se ha **parametrizado la batería del Nissan Leaf** en el modelo implementado y se ha calculado la potencia demandada por el vehículo en el ciclo de homologación NEDC.
- **Se ha simulado el modelo de batería del Nissan Leaf** para una prueba de autonomía bajo ciclo NEDC, obteniéndose una autonomía similar a la declarada por el fabricante.
- Suponiendo un envejecimiento de la batería en determinadas condiciones se ha simulado el modelo anterior comprobando la **variación de la autonomía respecto al envejecimiento de la batería**. Con estas simulaciones se demuestran la influencia de cada efecto del envejecimiento sobre la autonomía del vehículo eléctrico.

8.2 Principales aportaciones del autor del TFM

Durante la realización del presente Trabajo Fin de Master se ha revisado el estado del arte sobre baterías de iones de litio y su parametrización para la simulación de esta mediante modelos. Este TFM recoge y agrupa información destacada sobre el estado del arte y se perfila como un documento de referencia en castellano.

Además, se ha implementado un modelo multicelda para una batería de iones de litio partiendo del modelo monocelda propuesto por [Chen, 2006] bajo la aplicación del principio de [Kim, 2012]. Este modelo resulta de utilidad ya que permite simular cualquier batería Li-ion con solo introducir sus parámetros.

Por último, se ha simulado la autonomía del Nissan Leaf para las condiciones marcadas por el fabricante y bajo los efectos de envejecimiento de la batería, lo que permite identificar el comportamiento de la batería a futuro a la par de servir como ejemplo del potencial de la simulación de modelos en el ámbito de las baterías.

8.3 Sugerencias para trabajos futuros

De cara a complementar y ampliar los datos aportados por este trabajo, se pueden plantear una serie de desarrollos o estudios paralelos.

Una de ellas es la caracterización de una o varias baterías de iones de litio en laboratorio. Esto permitiría ampliar conocimientos en las técnicas presentadas en el capítulo 4 e introducir las como práctica para alguna de las titulaciones que se imparten en la EII.

Por otro lado, se puede implementar un mayor número de modelos en un software de simulación que permita una comparación objetiva para una misma batería, comprobando que modelo se adapta mejor a cada batería en función de la capacidad o de la magnitud de la corriente trasegada por la batería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREA, D.** (2010) *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*, Londres, Artech House.
- BAEZA, A.** (2011) *Principios de electroquímica analítica*, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- BARSOUKOV, E., y MACDONALD, J., ROSS** (2005) *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications*, John Wiley & Sons ISBN: 978-0-471-64749-2
- BRANT, W.**, (2014) *Crystallography365*. (Consultado: 14/03/2017)
Disponible en: <https://www.iycr2014.org/learn/crystallography365/authors/william-brant>
- BUCHMANN, I.** (2001). *¿Las baterías Litio-Ion energizarán el nuevo milenio?* SAFT CO.
- BMW ARCHIVE** (2017) Disponible en: <https://bmw-grouparchiv.de/research/>
- CASTAÑO, P.** (2014). *Modelado y caracterización funcional en régimen dinámico de sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía: aplicación a supercondensadores y baterías de iones de litio*. Universidad Carlos III de Madrid
- CHEN, M., RINCÓN-MORA, G. A.** (2006) *Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 21(2), 504–511.
- DANZER, M. A., LIEBAU, V., MAGLIA, F.** (2015) *Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles*. Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles.
- DIAZ, F., SUMPER A., GOMIS O.** (2016) *Energy Storage in Power Systems*. Londres, Wiley Publications
- DUBARRY, M., LIAW, B. Y.** (2007) *Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries*. Journal of Power Sources, 174(2), 856–860
- EUROBAT.** (2005). *Battery Systems for Electric Energy Storage Issues*. Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers
- EUROBAT.** (2015). *A joint industry analysis of the technological suitability of different battery technologies for use across various automotive applications in the foreseeable future*. Association of European Automotive and Industrial Battery Manufacturers
- GAO, L, LIU, S, A. D.** (2002). *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25(3), 495–505.
- GONG, X.** (2016). *Modeling of Lithium-ion Battery Considering Temperature and Aging Uncertainties*. University of Michigan-Dearborn
- HE, H., XIONG, R., FAN, J.** (2011). *Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach*. Energies, 4(4), 582–598
- HE, H., XIONG, R., GUO, H., LI, S.** (2012). *Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles*. Energy Convers. Manag. (UK), 64, 113–21

IGLESIAS, R., LAGO, A., NOGUERIAS, A., MARCOS, J., QUINTANS, C., MOURE, M. J., VALDÉS, M. D. (2013). *Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda*. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial E Instrumentación (SAAEI 2012), (June 2013), 464–469.

INL, (2012). *Avanced Vehicle Testing Nissan Leaf 2011*, 1–5.

INL, (2014). *Avanced Vehicle Testing Activity Nissan Leaf 2013*, 8–11.

JIANG, J. (2015). *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*. Singapore, Wiley Publications

JULIEN, C. M., MAUGER, A., ZAGHIB, K., GROULT, H. (2014). *Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries*. *Inorganics*, 2, 132–154.

JULIEN, C., MAUGER, A., VIJH, A., ZAGHIB, K. (2016). *Lithium Batteries*. Antimicrobial Agents and Chemotherapy (Vol. 58). Cham: Springer International Publishing.

MIT TECHNOLOGY REVIEW, BULLIS K., (2012). *Lithium-Ion Battery* (Consultado: 25/5/2017)
Disponible en: <https://www.technologyreview.com/s/428155/lithium-ion-battery/>

MOLENDÁ, J., MOLENDÁ, M. (2011). *Composite Cathode Material for Li-Ion Batteries Based on LiFePO₄ System*. Intech Regular Publication.

NAZRI, G.-A., PISTOIA, G. (2009). *Lithium Batteries: Science and Technology*. (G. M. R. & D. Center, Ed.), Chemistry & Warren, Michigan USA: Springer

NISSAN. (2017) Disponible en: <https://www.nissan.es/vehiculos/nuevos-vehiculos/leaf.html>

ORDÓÑEZ, C. P. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Universidad Complutense de Madrid

ORTIZ, R., MARTÍNEZ, Y., HERNÁNDEZ, R. (2006). *Técnicas electroquímicas*. *Electrochemical Science Journal*, 34.

RAHMOUN, A., BIECHL, H. (2012). *Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams*. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2(7), 152–156.

RIPOLL, J. A., (2014) *Apuntes de asignatura Sistemas de Transporte de Tracción Eléctrica*. Grado en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Valladolid

ROOT, M. (2010). *The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design, and Use Batteries*. Mc Graw Hill

SÁNCHEZ, J. (2015). *Almacenamiento Electroquímico: Las baterías de li-ion*. Fundación Gas Natural Fenosa.

TINAUT, F., (2016) *Apuntes de asignatura Sistemas de Propulsión Alternativos*. Máster en Ingeniería de Automoción. Universidad de Valladolid

TREMBLAY, O. (2009). *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications*. *World Electric Vehicle Journal* V, 3(October), 289–298.

VÁZQUEZ, J.L. (2007). *Empleo de la técnica de espectroscopía de impedancias electroquímicas*. Universidad Politécnica de Valencia.

WU, Y. (2015). *Lithium-ion Batteries: Fundamentals and Applications*. ASME-SCVS Professional Development Series (Vol. 23).

XING, Y., MA, E. W. M., TSUI, K. L., PECHT, M. (2011). *Battery management systems in electric and hybrid vehicles*. *Energies*, 4(11), 1840–1857

YAMAGUCHI, J. (2011) *Bringing the Leaf to life*. Nissan Leaf Special Edition. SAE Vehicle Electrification Journal

ANEXO 1: DATOS CARACTERÍSTICOS NISSAN LEAF

En este anexo se enumeran los datos característicos para el Nissan Leaf de 24kWh proporcionados por el fabricante [Nissan, 2017].

MOTOR, PRESTACIONES Y CONSUMO

Motor eléctrico	AC Síncrono
Tipo de corriente	AC
Potencia máxima (CV)	109 CV
Potencia máxima (kW/rpm)	80 kW/rpm
Par máximo	254/3000 Nm/rpm
Régimen máximo	10500 rpm
Tensión nominal	360 V
Velocidad máxima	144 km/h
Aceleración de 0-100 km/h	11,5 s
Consumo medio eléctrico	150 Wh/km
Autonomía NEDC	170 km (2011), 199 km (2013)

TRANSMISIÓN

Tracción	Delantera
Caja de cambios	Automática
Relación grupo fijo	7.9377

BATERÍA

Tipo	Laminada de iones de litio
Capacidad	24 kWh
Capacidad útil	21 kWh
Extraíble (S/N)	NO
Tipo de cargador (Connector o enchufe)	3,6 kW (6,6 kW opcional)
Numero de celdas	48
Tipo de carga / tiempo 100%	230V => 8h/ 400V =>1h
Garantía	8 años o 160,000 km
Fabricante	Automotive Energy Supply Corp. /NEC

DIMENSIONES, PESO, CAPACIDADES

Coefficiente rozamiento aerodinámico	0,28 Cx
Largo	4445 mm
Ancho	1770 mm
Alto	1550 mm
Distancia entre ejes	2700 mm
Diámetro de giro	10,42 m
Peso en vacío min/max	1587 kg
Número de puertas	5
Número de plazas	5
Capacidad de maletero	370 l
Capacidad de maletero con asientos abatidos	849 l

CHASIS

Suspensión delantera	Tipo McPherson. Resorte helicoidal. Barra estabilizadora.
Suspensión trasera	Rueda tirada con elemento torsional. Resorte helicoidal.
Frenos delanteros	Discos ventilados de 283 mm
Frenos traseros	Discos ventilados de 292 mm
Neumáticos	205 / 55 R16
Llantas	6,5 x 16
Dirección	Cremallera con asistencia eléctrica