

Trabajo de Final de Grado

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Métodos de estimación del estado de carga de  
baterías electroquímicas**

**MEMORIA**

**Autor:** Jaume Martínez Bertran  
**Director:** Daniel Montesinos i Miracle  
**Convocatoria:** 04.2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## **Resumen**

El presente proyecto de final de carrera consiste en un estudio de los tipos de batería que hay actualmente en el mercado y sus características. En concreto, se estudia de forma particular el estado de carga de las baterías y sus métodos de cálculo.

Se presentan en primer lugar algunos métodos existentes y se analiza en detalle el comportamiento de varios tipos de baterías bajo distintas condiciones de descarga, modeladas con una versión mejorada del modelo de Shepherd.

## **Resum**

El present projecte de final de carrera consisteix en un estudi dels tipus de bateries que hi ha actualment al mercat i les seves característiques. En concret, s'estudia de forma particular l'estat de càrrega de les bateries i els seus mètodes de càlcul.

Es presenten en primer lloc alguns dels mètodes existents i s'analitza en detall el comportament de diversos tipus de bateries sota diferents condicions de descàrrega, modelades amb una versió millorada del model de Shepherd.

## **Abstract**

This end-of-degree project consists on a study of the diverse kinds of batteries that exist on the market and their characteristics. More specifically, it focuses on the state of charge and how to estimate it.

First, there is an overall presentation of some of the methods, and then it is simulated the discharge of several kinds of batteries under different conditions, modelled with an improved version of Shepherd's model.



# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1. Objetivos del proyecto	5
<b>2. BATERÍAS ELÉCTRICAS</b>	<b>6</b>
2.1. Tipos de baterías	6
2.2. Caracterización de las baterías	8
2.2.1. Parámetros para caracterizar una batería	8
2.3. Baterías de Plomo – Ácido	13
2.3.1. Principios de funcionamiento	14
2.3.2. Características funcionales de las baterías de plomo – ácido	14
2.3.3. Baterías de plomo – ácido de válvula regulada	15
2.4. Baterías de Níquel – Cadmio	16
2.4.1. Características funcionales de las baterías de Níquel – Cadmio	17
2.5. Baterías de níquel – hidruro metálico	18
2.5.1. Características funcionales de las baterías de níquel – hidruro metálico	18
2.6. Baterías de Litio	19
2.6.1. Características generales de las baterías de Litio	20
2.6.2. Características funcionales del polímero de litio (LiPo)	21
2.6.3. Características funcionales del ion de Litio (con cátodo de $\text{LiCoO}_2$ )	22
2.6.4. Características funcionales del ion de Litio (con cátodo de $\text{LiFePO}_4$ )	23
<b>3. BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)</b>	<b>24</b>
<b>4. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL ESTADO DE CARGA</b>	<b>26</b>
4.1. Ley de Peukert	28
4.2. Modelo de Shepherd y su versión mejorada	29
4.2.1. Versión mejorada del modelo de Shepherd	29
<b>5. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESCARGA MEDIANTE EL MODELO DE SHEPHERD MEJORADO</b>	<b>34</b>
5.1. Modelado en Matlab	34
5.2. Parámetros de las baterías	35
5.3. Simulación batería de Plomo – Ácido	35
5.4. Simulación batería de Níquel – Cadmio	42
5.5. Simulación batería de Níquel – Hidruro metálico	44
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>

6.1. Conclusiones de la simulación.....	49
6.2. Conclusiones del trabajo.....	50
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>52</b>
7.1. Referències bibliogràfiques.....	52
7.2. Bibliografia complementària.....	52

# 1. Introducción

Este trabajo de final de carrera pretende ser un estudio de carácter general de las baterías, y más en concreto de algoritmos para el cálculo de su estado de carga. En la sociedad en la que vivimos, cada vez más dependemos de la energía eléctrica para casi cualquier actividad, y ninguna de esas aplicaciones son posibles sin una fuente de tensión o una batería. Uno de los ejemplos más claros del incremento de la importancia de las baterías en la actualidad es el de los coches híbridos o eléctricos. El mayor desafío que tienen que afrontar los fabricantes está relacionado con la alimentación de los mismos por medio de baterías.

Además, la gran importancia que tiene saber el estado de carga de las baterías en cualquier punto de su curva de descarga es que, así, se puede preservar y proteger tanto las mismas baterías como los circuitos y equipos que los usan.

## 1.1. Objetivos del proyecto

Siendo el campo de las baterías muy extenso, ha sido necesario establecer unos objetivos muy claros y definidos, así como también delimitar mucho el alcance de dicho proyecto. Cabe comentar que el trabajo se podría haber enfocado de muchas formas distintas por la infinidad de métodos, tipos de baterías, etc.

Los objetivos del presente trabajo son en primer lugar presentar una serie de conceptos clave para el estudio de las baterías, como puede ser la capacidad, el estado de carga, la tensión en bornes, ...

En segundo lugar, también se dará una introducción general a los tipos de baterías más importantes, comentar su principio de funcionamiento, y explicar sus características más destacadas, así como sus ventajas e inconvenientes.

En tercer lugar, se presentarán una serie de métodos para el cálculo del estado de carga, entre ellos el método de Shepherd.

Por último, el objetivo principal será el de realizar una serie de simulaciones para ver el comportamiento de las curvas de descarga de distintos tipos de baterías modeladas por una versión mejorada del método de Shepherd. Una vez se hayan simulado, se compararán con las curvas suministradas por los fabricantes de dichas baterías y se verificará el ajuste de dicho método a la realidad.

## 2. Baterías eléctricas

En este capítulo se van a introducir qué son, como funcionan y qué tipos de baterías existen actualmente, destacando sus usos principales y sus ventajas e inconvenientes.

### 2.1. Tipos de baterías

Según la real academia española, una batería es un acumulador o un conjunto de acumuladores de electricidad. Es decir, es un dispositivo que está constituido por una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad.

Cada tipo de batería tiene características de funcionamiento distintas, por lo que antes de empezar es importante conocer bien los distintos tipos de baterías que existen en la actualidad.

Sin embargo, pese a la gran variedad de tipos de batería, la base del funcionamiento las baterías estudiadas se basa en un proceso químico reversible llamado reducción – oxidación (también denominado redox). Dicho proceso consiste en que uno de los componentes se oxida (es decir, pierde electrones) y el otro componente se reduce (es decir, gana electrones). Es mediante esta pérdida y ganancia de electrones de los elementos que forman la batería que se genera la diferencia de potencial en sus bornes y así, al conectar un circuito a ellos, se produce el paso de corriente.

La modelización más simple de una batería se puede ver en la Figura 1, donde se puede comprobar que una batería se modela como una fuente de tensión. Además, el sentido de la intensidad es del positivo al negativo, por convenio, puesto que al principio se pensaba que eran las cargas positivas las que se movían en vez de las negativas. El flujo real de electrones (cargas negativas) se mueve desde el potencial negativo de la fuente hasta el positivo. Para un esquema detallado del funcionamiento interno de la batería ver la Figura 2.

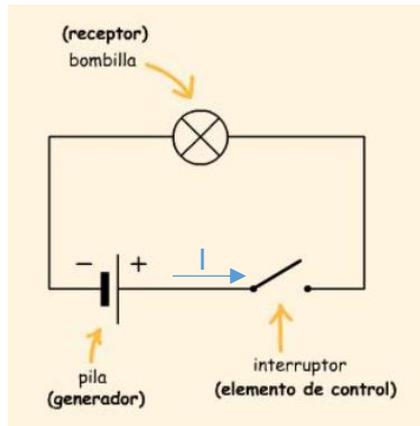


Figura 1: Esquema básico de una batería. Recuperada de [www.blogspot.com](http://www.blogspot.com)

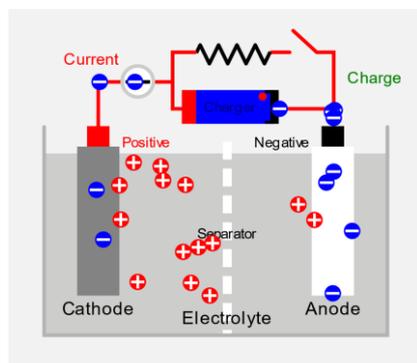


Figura 2: Esquema del funcionamiento interno de la batería. Recuperada de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

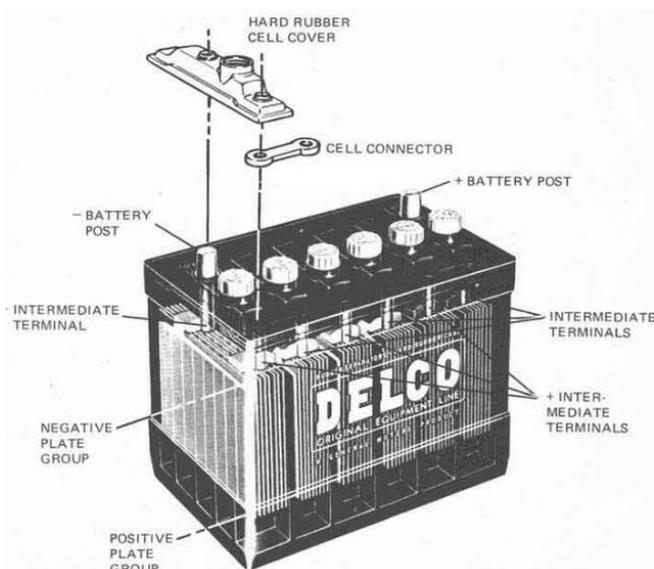


Figura 3: Fotografía de una batería con los nombres de sus partes. Recuperada de [www.automecanico.com](http://www.automecanico.com)

Existen dos grandes grupos de baterías o pilas. Las baterías primarias, cuya carga no puede renovarse cuando se agota (se debería reponer la sustancia química que la conforma) y las baterías secundarias, que sí se pueden recargar sometiéndolas al paso de una corriente eléctrica en el sentido inverso al sentido en el que la corriente de la pila fluye normalmente.

El campo de aplicación de las baterías primarias se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas, y de ahí que sean de tamaño pequeño.

Las baterías secundarias, en cambio, se comercializan en un amplio margen de potencias y capacidades, desde unos cientos de miliamperios-hora hasta capacidades de varias decenas de amperios-hora.

Debido al objetivo del proyecto, de aquí en adelante no se considerarán las baterías primarias en el estudio, sino que todos los cálculos, referencias y definiciones se centrarán en las baterías secundarias.

## 2.2. Caracterización de las baterías

Para realizar el presente proyecto, es necesario presentar algunos conceptos y definiciones necesarios para caracterizar una batería. Aunque puede que no todos serán utilizados a lo largo del mismo, es importante presentarlos para una mejor comprensión del proyecto.

### 2.2.1. Parámetros para caracterizar una batería

Para la caracterización de una batería y para estudiar su funcionamiento se usan una serie de conceptos técnicos que se van a presentar a continuación para facilitar el seguimiento del proyecto.

- **Celda:** Es el menor elemento que forma una batería y puede ser asociada en serie o en paralelo con otras celdas con el objetivo de conseguir los valores de corriente y de tensión deseados.

- **Estado de carga / State Of Charge (SOC) %:** Es la expresión que indica el estado de carga de la batería de manera porcentual. El estado de carga es el 100% cuando la batería tiene almacenada la máxima energía posible. Este parámetro es el más importante de cara al proyecto, puesto que más adelante se presentarán y estudiarán métodos para su cálculo.
- **Profundidad de descarga / Depth Of Discharge (DOD) %:** Es la relación entre la capacidad en amperios-hora (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Es un parámetro alternativo al SOC para saber el estado de carga de una batería. Cuando el SOC disminuye, el DOD aumenta.
- **Tensión de vacío ( $E_0$ ):** Es la tensión que una batería tiene entre sus terminales cuando no hay ningún elemento conectado a ellos. Su valor queda determinado por las características intrínsecas de la batería.
- **Tensión en circuito cerrado ( $E$ ):** Es la tensión que aparece en los terminales de una batería cuando esta está conectada a una carga. La tensión en circuito cerrado de una batería disminuye al conectarla a una carga dependiendo de la corriente que le ceda.
- **Resistencia interna:** Consiste en un concepto que ayuda a modelar en forma de resistencia todas las consecuencias eléctricas de las complejas relaciones químicas que se producen dentro de una batería.

Al ser un concepto teórico, no se puede medir directamente de la batería, pero se puede calcular mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. Cuando se aplica una carga a la batería, la resistencia interna de ésta se puede calcular con cualquiera de las dos ecuaciones que se presentan a continuación:

$$R_B = \frac{V_0 - V}{I} \quad (2.1)$$

$$R_B = \frac{V_0}{I} - R_L \quad (2.2)$$

siendo:

- $R_B$ : Resistencia interna de la batería
- $V_0$ : Tensión de vacío de la batería
- $V$ : Tensión de la batería con la carga.

- $I$ : Intensidad suministrada por la batería.

La resistencia interna no es un parámetro fijo, sino que varía con la edad de la batería. La mayoría de baterías comerciales tienen una resistencia interna del orden de 1 Ohm.

- **Capacidad:** La capacidad de una batería es la cantidad de electricidad que se puede almacenar para luego descargar medida en amperios-hora (Ah). El valor de la capacidad ( $C$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot \delta t \quad (2.3)$$

La ecuación anterior es de aplicación general y sirve para calcular tanto la capacidad en el proceso de carga como en el de descarga. Existen otras ecuaciones para el cálculo de la capacidad, dependiendo de las condiciones bajo las cuales se realice la medida.

- **Capacidad nominal:** Es la capacidad que puede entregar una batería desde plena carga hasta alcanzar una tensión en descarga determinada. Se mide a una temperatura ambiente fijada y utilizando una razón de descarga específica. Por ejemplo, una batería de una celda tiene una capacidad nominal de 80 Ah cuando descargándola desde plena carga, con una corriente constante de 20 A y a temperatura de 20 °C, es capaz de mantener la tensión por encima de 1 V durante al menos 4 h.
- **Capacidad real:** Capacidad que puede entregar una batería desde su estado de plena carga y en condiciones de funcionamiento diferentes a las establecidas para definir la capacidad nominal (exceptuando la tensión de finalización de descarga). La capacidad real puede ser mayor o menor que la capacidad nominal, dependiendo de la razón de descarga utilizada y de la temperatura de trabajo.
- **Capacidad retenida:** Capacidad conservada por la batería después de un periodo de reposo o inactividad.
- **Máxima corriente de descarga continua:** Es la máxima corriente que la batería puede descargar de forma continuada. Este límite viene definido por el fabricante para evitar daños o reducción de su capacidad.

- **Máxima corriente en intervalos:** Corriente máxima a la que la batería puede ser descargada en intervalos de tiempo (suelen ser alrededor de 10 ms). El límite viene fijado por el fabricante con el fin de evitar daños y pérdida de prestaciones. La máxima corriente por intervalos suele ser sensiblemente más alta que la máxima corriente continua.
- **Coulomb:** Es la unidad del sistema internacional para la medida de la magnitud física “Cantidad de electricidad” (carga eléctrica). Es frecuente usar múltiplos y submúltiplos de esta magnitud para definir la corriente de carga / descarga de una batería. Un Coulomb es la cantidad de carga transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad.
- **Autodescarga:** Pérdida de capacidad de una batería, cuando se mantiene en circuito abierto. Generalmente, la autodescarga se expresa en términos de porcentaje de pérdida de capacidad respecto la capacidad nominal en un periodo de tiempo de un mes.
- **Sobrecarga:** Proceso que tiene lugar cuando se continúa cargando una batería, después de que se pierda la eficiencia de reacciones electroquímicas al cargar.
- **Densidad de Energía:** Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l).
- **Densidad de Potencia:** Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l).
- **Energía Específica:** Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg).
- **Potencia Específica:** Potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg).
- **Vida útil:** Tiempo que la batería puede mantener sus prestaciones por encima de unos límites mínimos predeterminados. Definido también como el número de veces que la batería puede ser recargada, para recobrar su capacidad completa después de su uso.

- **Eficacia (%):** Es la fracción de energía eléctrica que devuelve la batería en relación a la que ha sido necesaria para cargarla.
- **Tiempo de recarga normal (h):** Es el tiempo necesario para realizar una recarga completa de la batería.
- **Tiempo de recarga rápida (h):** Son los tiempos necesarios para recargar la batería a la mitad o al 99% de su capacidad. Este tipo de carga no está enfocado a las actuales baterías de litio, en las que su tiempo de recarga ronda los 60 minutos.
- **Curvas de carga / descarga:** Son los gráficos utilizados para definir el funcionamiento y prestaciones de una batería.

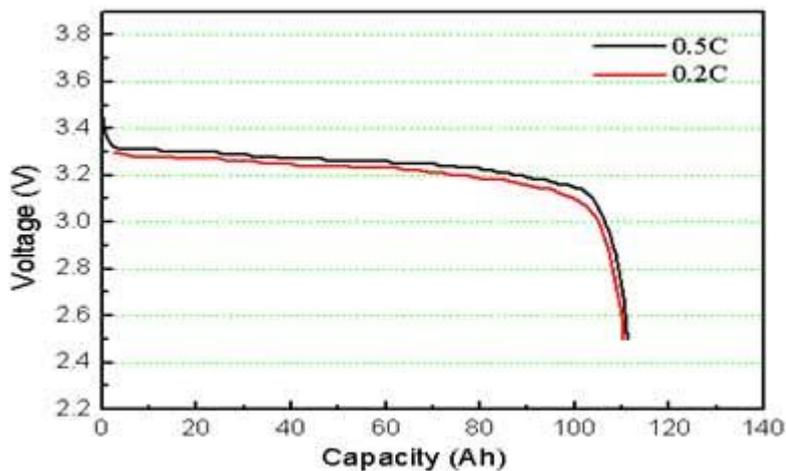


Figura 4: Curva del voltaje de una batería en función de su capacidad.  
Recuperada de [www.boundless.com](http://www.boundless.com)

- **Delta Peak:** Sistema utilizado para cargar las baterías de NIMH y NiCd. Detecta el fin de carga a partir de los picos de tensión que proporciona este tipo de baterías durante su carga. Al aproximarse a la plena carga, su voltaje aumenta bruscamente igual que sus picos de tensión, los cuales son detectados por el cargador, quien finaliza la carga.
- **Descargas anormales:** Son aquellas descargas que están separadas al menos un 10% de la curva de descarga estimada.

- **Potencia máxima de un elemento (en tecnología de litio):** Es aquella potencia en la que el elemento es capaz de entregar al menos un 80% de su capacidad nominal, antes de bajar de 3 V y no superar los 50 °C en su superficie, en el menor tiempo posible.
- **Coste (€/kWh):** El coste de la batería por unidad de energía almacenada es esencial para aplicaciones económicas. Un acumulador de plomo estándar tiene un coste del orden de 350 €/kWh. En cambio, el coste medio de electricidad en Europa es alrededor de 0,1 €/kWh.

### 2.3. Baterías de Plomo – Ácido

Las baterías de plomo son un tipo de baterías muy comunes en vehículos convencionales, no híbridos. Suelen ser de 6 V y de 12 V y están formadas por celdas de 2 V cada una. Constituyen una parte importante del mercado mundial de baterías, tanto primarias como secundarias.

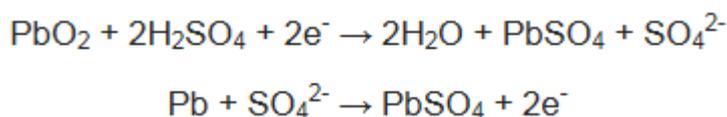
Poseen una gran capacidad de descarga durante un breve periodo de tiempo, lo que las hace especialmente buenas a la hora de arrancar un motor de combustión. Su forma más conocida es la de batería de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior una serie de placas de plomo dispuestas de forma alterna.



Figura 5: Fotografía de una batería de Plomo-Ácido. Recuperada de [www.silversanz.com](http://www.silversanz.com)

### 2.3.1. Principios de funcionamiento

Para generar electricidad, estas baterías usan la reacción de reducción que se presenta a continuación:



Durante la carga, el sulfato de plomo es reducido a plomo metal en las placas negativas, mientras que en las placas positivas se forma óxido de plomo. En el proceso de descarga se invierte el proceso de carga, reduciendo así el óxido de plomo a sulfato de plomo mientras que el plomo metal es oxidado para dar igualmente sulfato de plomo.

Durante el proceso de descarga, la concentración de ácido sulfúrico desciende y aumenta la cantidad de agua liberada en la reacción. Como el ácido sulfúrico concentrado tiene mayor densidad que el ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido se puede usar como indicador del estado de carga de este tipo de baterías.

### 2.3.2. Características funcionales de las baterías de plomo – ácido

Las principales características funcionales de las baterías de plomo – ácido se pueden analizar considerando las ventajas e inconvenientes que presenta esta tecnología:

Ventajas:

- Alta tensión por celda (2 V) lo que permite obtener baterías de mayor tensión con un número menor de celdas conectadas en serie.
- Excelente capacidad para suministrar picos de corrientes altos durante la descarga.
- Su tasa de auto-descarga mensual es muy baja (aproximadamente un 5%).
- Alta eficiencia (por encima de un 80%).
- Facilidad para su reciclaje

Desventajas:

- Elevado peso debido a la utilización de plomo como material activo.

- Baja energía específica (por debajo de 30 Wh/kg). Se usa para cubrir las necesidades de arranque, iluminación e ignición puesto que no son capaces de mover un vehículo.
- Corta vida cíclica (500 o 600 ciclos de carga-descarga).
- No aceptan carga rápida, por lo que se necesitan largos periodos de tiempo para su recarga.
- Baja resistencia ante sobrecargas y descargas accidentales.
- Se ven afectadas seriamente por la corrosión de sus electrodos.
- Necesitan mantenimiento periódico

Debido al continuo desarrollo de estas baterías, se han optimizado mucho y lo siguen haciendo en cuestiones de reducción de necesidad de mantenimiento, disminución de peso y reducción de tiempo de descarga. El siguiente tipo de baterías, son una versión mejorada de éstas.

### **2.3.3. Baterías de plomo – ácido de válvula regulada**

Las baterías de plomo – ácido de válvula regulada (en inglés VRLA) representan una de las mejoras respecto a estas baterías.

Una de las ventajas fundamentales que aporta esta tecnología es la posibilidad de recombinación de los gases producidos durante las reacciones de sobrecarga, cuando la batería se encuentra próxima a su estado de plena carga.

De esta forma se evita la pérdida de electrolito en forma de gases y se reducen las necesidades de mantenimiento de la batería. Es por ello que a este tipo de baterías se les denomina “baterías libres de mantenimiento” o “baterías de recombinación de gases”.

Estas baterías pueden tener un uso más diverso que las de plomo – ácido convencional puesto que se pueden usar en espacios cerrados por no emitir líquido / gas corrosivo al entorno.

Sin embargo, estas baterías también presentan serias dificultades a la hora de realizar la carga rápida.

La ventaja principal de este subtipo de baterías es que son extremadamente económicas en comparación con el resto de baterías del mercado y tienen un proceso de reciclado bastante sencillo.

## 2.4. Baterías de Níquel – Cadmio

Este tipo de baterías utilizan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrolito de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez agotada, para permitir su reutilización.

Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50Wh / kg por lo que poseen una capacidad no muy elevada. Admiten sobrecargas y no se dañan al seguir cargándose una vez el proceso de carga ya ha sido terminada (aunque no se siga almacenando más carga).

Se usa la tecnología “delta peak” para determinar el estado plena de carga, pues se produce un aumento súbito de la tensión de la batería al aproximarse a este estado. Esta tensión es detectada por el cargador y así puede detener el proceso de carga.



Figura 6: Fotografía de una batería de Níquel - Cadmio. Recuperada de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

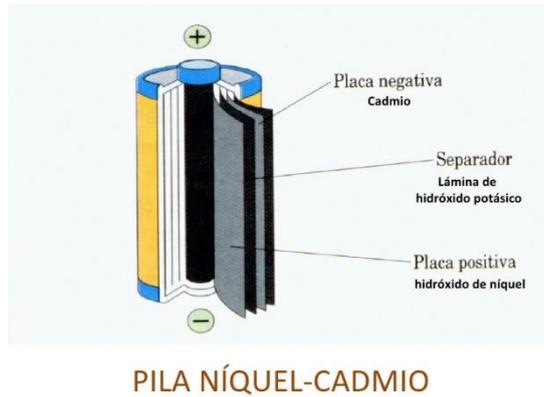


Figura 7: Estructura interna de una batería de Níquel - Cadmio. Recuperada de [www.slideshare.com](http://www.slideshare.com)

### 2.4.1. Características funcionales de las baterías de Níquel – Cadmio

Desde un punto de vista funcional, estas baterías superan en prestaciones a las baterías de plomo – ácido.

Ventajas:

- Buen comportamiento en un gran rango de temperaturas (-40 °C a +60 °C)
- Admiten sobrecarga y no se dañan al seguir cargándose una vez alcanzada la carga máxima.
- Vida cíclica larga (superior a los 1.500 ciclos)
- Gran robustez
- Gran fiabilidad (a diferencia de las de plomo – ácido, que pueden fallar de forma repentina).

Desventajas:

- Precio elevado (por encima de los 300 € / kWh)
- Contienen Cadmio, un componente altamente contaminante que obliga a aumentar la eficiencia de reciclado de las baterías una vez quedan fuera de servicio. Ya existen algunas técnicas de reciclado total de este tipo de baterías y se siguen desarrollando nuevos procesos de reciclado.
- Actualmente no se fabrican en muchos de los países desarrollados.

- La autodescarga es bastante elevada ( 10 % mensual).
- La tensión nominal de celda es de 1,2 V / Celda, un valor bastante bajo lo que requiere un mayor número de celdas conectadas en serie para alcanzar una determinada tensión.
- Con el calor sufren envejecimiento prematuro.

## 2.5. Baterías de níquel – hidruro metálico

Las baterías de Níquel – Hidruro metálico (NiMH) tienen un rendimiento similar a las de NiCd, siendo la principal diferencia que las primeras utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Al estar libres de cadmio, todas las desventajas que tenía el uso de este material desaparecen.



Figura 8: Fotografía de dos baterías de Níquel - Hidruro metálico. Recuperada de [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

### 2.5.1. Características funcionales de las baterías de níquel – hidruro metálico

Como explicado anteriormente, estas baterías tienen unas características muy similares a las de tecnología Níquel – Cadmio. La tensión nominal por celda es de 1,2 V y sus curvas de carga y descarga son muy similares. Al igual que en las de NiCd, también se usa la tecnología “delta peak” para determinar el fin de su proceso de carga.

Ventajas:

- Tienen una densidad energética y una energía específica mayor que las de NiCd.
- Tecnología libre de cadmio (mucho menos contaminante).

- Pueden ser cargadas con un cargador convencional
- Seguras
- Fácil manejo comparado con la tecnología de Litio.

A pesar que la tecnología de estas baterías ha evolucionado mucho, siguen teniendo una serie de desventajas, las cuales se presentan a continuación:

- Alta razón de autodescarga (aproximadamente un 15-20% cada mes).
- Menor fiabilidad que las de NiCd.
- No soportan fuertes descargas.
- Voltaje por celda bajo (1.2 V)
- Vida media de aproximadamente 300-500 ciclos.
- Tiempos de carga superiores a las de NiCd.

## 2.6. Baterías de Litio

Durante muchos años las baterías de níquel – cadmio fueron las únicas que podían usarse en aplicaciones tan exigentes como teléfonos móviles, ordenadores, ... A principios de los 90 aparecieron las baterías de níquel – metal – hidruro y las de ion – litio ofreciendo mayores capacidades y menores pesos. Las más utilizadas hoy en día son las de Ion – Litio.

El litio es el metal más ligero que existe ya que solo cuenta con tres protones. Esto le concede al material un gran potencial químico para crear baterías de gran capacidad con un peso muy reducido.



Figura 9: Fotografía de una batería de Ion Litio. Recuperada de [www.phonehouse.es](http://www.phonehouse.es)

### 2.6.1. Características generales de las baterías de Litio

Al principio de su descubrimiento, estas baterías eran bastante problemáticas debido a la inestabilidad química del Litio, especialmente durante su carga. Esto implicaba poner en riesgo la seguridad y fiabilidad de las baterías. Sin embargo, se solucionaron estos problemas y se empezaron a comercializar.

La densidad de energía de una batería de la familia del litio es más del doble que en una batería de Níquel – Cadmio. Además, los investigadores aseguran que estas baterías tienen aún mucho potencial por delante.

El voltaje por celda de la familia de litio oscila entre los 3,3 y los 3,7 V, lo que permite diseñar baterías con una única celda (por ejemplo, en los teléfonos móviles). Para conseguir dicha tensión en una batería de NiCd serían necesarias 3 celdas conectadas en serie.

Estas baterías no requieren mantenimiento y tienen una ratio de autodescarga muy bajo.

Por otro lado, son muy delicadas y su estructura es frágil por lo que requieren un circuito de seguridad. Este circuito limita el voltaje máximo que puede alcanzar cada celda durante la carga y también limita el voltaje mínimo de éstas durante la descarga.

El envejecimiento de las baterías es un tema que los fabricantes intentan ocultar, pero no cabe duda que es elevado y que existe una degradación notoria al cabo de un año.

Ventajas:

- Alta densidad de energía
- Alta energía específica
- Alta capacidad de descarga en algunos tipos de baterías de litio
- No necesitan mantenimiento
- Bajo efecto de autodescarga

Desventajas:

- Requieren un circuito de seguridad para mantener el voltaje durante la carga y la descarga dentro de unos límites
- Baja capacidad de descarga en las baterías de iones de litio.
- Precio superior a las otras baterías.

### **2.6.2. Características funcionales del polímero de litio (LiPo)**

La batería de polímero de litio este tipo también, conocida también como Lipo, y se diferencia del resto por usar un polímero sólido como electrolito.

Este polímero ofrece ventajas de fabricación como por ejemplo la posibilidad de fabricar baterías muy finas (hasta 1 milímetro de grosor).

Su principal problema es la poca conductividad debido a la alta resistencia interna, lo que hace que tenga baja capacidad de carga, se caliente mucho (se puede añadir un gel al electrolito como refrigerante) y sea inviable para ciertas aplicaciones.

Ventajas:

- Pueden fabricarse hasta con 1 mm de grosor.
- Pueden empaquetarse de formas múltiples
- Alta densidad de energía y poco peso
- No necesitan mantenimiento
- Bajo porcentaje de autodescarga

#### Desventajas

- Requieren un circuito de seguridad
- Tecnología todavía en desarrollo
- Precio muy elevado
- Puede explotar si se perfora

### 2.6.3. Características funcionales del ion de Litio (con cátodo de $\text{LiCoO}_2$ )

Las baterías de litio – ion con cátodo de  $\text{LiCoO}_2$  son muy comunes en la electrónica de consumo. Se trata de uno de los tipos más populares de baterías recargables para dispositivos electrónicos portátiles, con la mejor relación peso, energía y además cuenta con una lenta pérdida de carga cuando no está en uso.

Este tipo de baterías poseen la mayor “densidad energética” y “energía específica” del mercado. Sin embargo, poseen una de las capacidades de descarga más bajas, razón por la que se suelen encontrar en aparatos electrónicos que no necesitan de descargas de corriente.

#### Ventajas:

- Batería con la mayor densidad energética y energía específica del mercado
- Alta tensión por celda (3,6 – 3,7 V)
- Tasa de autodescarga inferior a 10 %
- No lleva productos tóxicos

#### Desventajas

- Problemas de ecualización y necesidad de circuitos electrónicos adicionales
- Las altas temperaturas son perjudiciales para su ciclo de vida
- Capacidad de descarga muy pequeña

#### 2.6.4. Características funcionales del ion de Litio (con cátodo de $\text{LiFePO}_4$ )

Las baterías de ion de litio con cátodo de  $\text{LiFePO}_4$  son una variación del grupo anterior con cátodo de  $\text{LiCoO}_2$ . Son conocidas por las siglas LIFE.

El fosfato de hierro litio posee un bajo coste, no es tóxico, tiene alta abundancia de hierro, muy buena estabilidad térmica y buenas características de seguridad con un rendimiento electroquímico bueno.

Son baterías cuya mayor ventaja es la seguridad debido a su gran estabilidad química y tienen una muy buena capacidad de carga y mayor vida útil que las anteriores.

Ventajas:

- Alta tensión en circuito abierto, 3,3 V
- $\text{LiFePO}_4$  es un cátodo de material intrínsecamente más seguro que  $\text{LiCoO}_2$
- No contienen productos tóxicos.
- Es la batería de litio que mejor tolera las altas temperaturas
- Supera los 2000 ciclos de vida y tiene una vida superior a los 10 años
- Tiempo de carga entre 15 y 30 minutos
- Buena capacidad para soportar la sobrecarga
- Buena energía específica y densidad energética

Desventajas

- Necesitan circuitos electrónicos adicionales
- Densidad energética sensiblemente menor a las de  $\text{LiCoO}_2$

### 3. Battery Management System (BMS)

El Battery Management System (BMS), o en español el sistema de gestión de baterías, es un sistema electrónico que gestiona las baterías secundarias (las recargables). Estos sistemas son necesarios para controlar la descarga de energía, proteger la batería para que no opere fuera de su área segura (Safe Operating Area) tanto en términos de voltaje e intensidad, estado de carga, estado de salud ... como en términos de temperatura, daño, etc. Además, es el encargado de mantener la batería en las condiciones óptimas para que la batería pueda desarrollar a la perfección la tasca para la cual fue diseñada.

En los sistemas de gestión más avanzados, se usa un conjunto de software y hardware para calcular y procesar los parámetros de la batería y asegurarse así que ésta trabaja en la zona deseada.

Dependiendo del uso que se le va a dar a la batería, el sistema de gestión también se encarga de controlar parámetros específicos como puede ser la frenada regenerativa en caso de los vehículos eléctricos.

A continuación, se muestra un ejemplo del funcionamiento de un sistema de gestión de batería, en el que se muestran distintos fallos y la reacción del BMS.

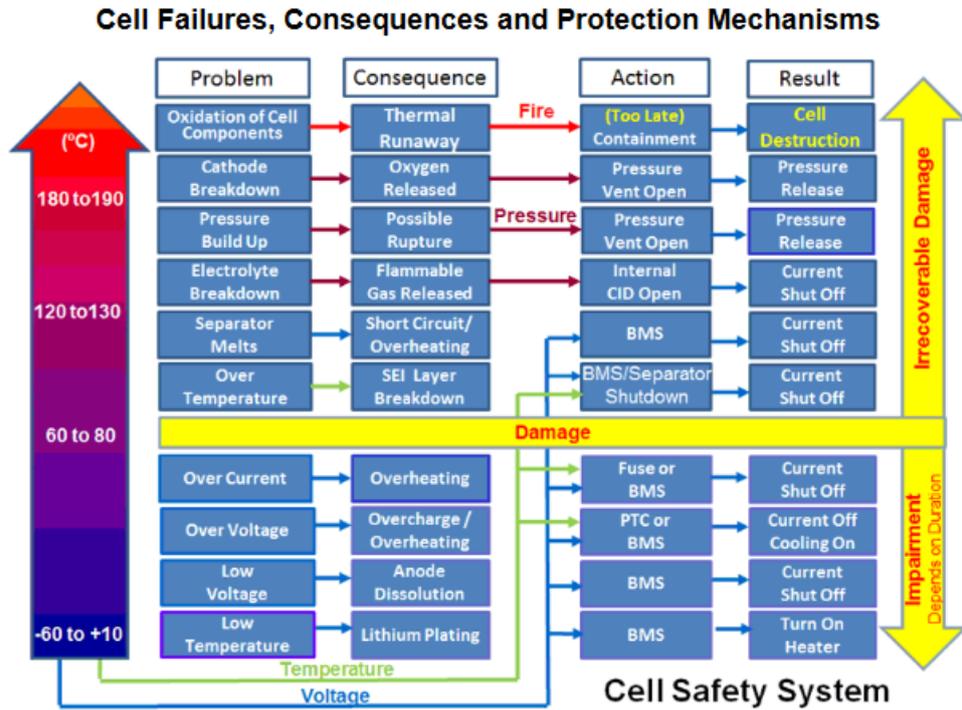


Figura 10: Esquema sobre el sistema de gestión de la batería BMS. Recuperado de [www.mpoweruk.com](http://www.mpoweruk.com)

## 4. Métodos para el cálculo del estado de carga

Una vez se han introducido los conceptos básicos sobre baterías, el siguiente tema que toca introducir son los métodos para calcular su estado de carga.

Antes de empezar, pero, es importante definir que la información sobre cuanta carga tiene una batería no nos aporta mucho por si sola. Haciendo un paralelismo con un coche, el saber si quedan 10 litros de gasolina no me indica cuántos kilómetros puedo recorrer, pues la autonomía que me den esos 10 litros dependen del tipo de vehículo, de su eficiencia y del modo de conducir que tenga.

Es por ello que se debe decidir cómo se da la información, si se da en Amperios-hora o en porcentaje y se deja al usuario la responsabilidad de estimar cuánto tiempo puede usar un dispositivo, o se le facilita una estimación en minutos o horas del tiempo de carga que tiene disponible.

Hay distintos métodos para el cálculo del estado de carga de una batería, dependiendo del tipo de batería, condiciones del sistema, ... Los más importantes se explican a continuación:

- Medida directa:

Se trata de un método teórico e hipotético ya que se basa en la hipótesis de una corriente de descarga constante. Este valor es multiplicado por el tiempo de descarga total de la batería obteniéndose la capacidad de la pila de baterías. Como es fácil de intuir, se trata de un método que es inviable a la práctica, pues la corriente de descarga es variable y además el propósito de conocer el estado de carga es para usar el instante y de poco sirve saber el estado de carga una vez la batería ya ha sido descargada por completo.

- Medida de la gravedad específica:

Este método también es conocido como medida de densidad relativa, y para usarlo es necesario tener acceso al electrolito líquido interno de la batería. La relación entre la densidad del agua y la de una sustancia electrolítica desciende de forma lineal con la descarga de la celda de la batería. Por tanto, midiendo la densidad del electrolito se obtiene una estimación del SOC de la celda. Aunque se trata de un método bastante preciso, no es capaz de determinar la capacidad total de la batería.

- Impedancia interna:

Con los ciclos de carga y descarga, la composición de los componentes químicos internos a una celda cambia y eso deriva en una variación de la impedancia interna de esta batería. Este parámetro también es un indicativo del estado de carga, pero su medida se hace muy difícil durante el funcionamiento real de una batería. Además, este parámetro tiene una gran dependencia con la temperatura, lo que dificulta aún más su uso.

- Estimaciones basadas en voltaje

Este método se basa en la existencia de una relación directa entre el voltaje actual de la batería y la capacidad de la misma. Se trata de un método poco preciso debido al comportamiento no lineal de muchos tipos de batería. En el gráfico que se muestra a continuación se puede comprobar como existe una caída en picado del voltaje cuando se aproxima el estado de descarga completa.

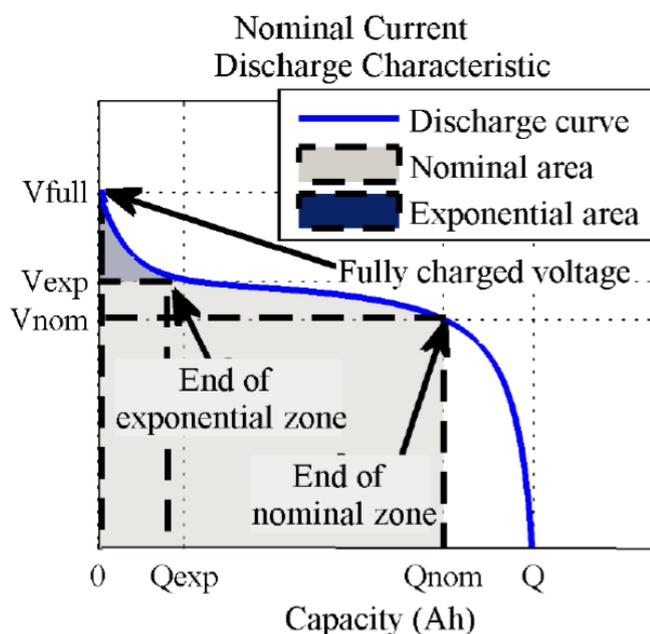


Figura 11: Curva del voltaje en función de la capacidad instantánea de una batería [1]

Es sabido que cuando un ordenador o un dispositivo se queda sin batería, el disco duro se puede dañar y es por eso que las compañías necesitaban predecir el momento antes de que eso ocurriera para poder realizar una apagada programada, dando tiempo a desconectar el equipo de forma segura.

Para el propósito anterior, es de vital importancia tener una gran precisión para estimar el voltaje anterior a la parada por batería baja.

- Estimación basada en la intensidad:

Este método también es llamado Coulomb Counting y consiste en la integración de la corriente entrante y saliente de la batería. Básicamente el método integra en el tiempo la intensidad que cargan y descargan las celdas y su resultado es la carga almacenada en el interior de las mismas. Este método es el calificado como más preciso para estimar el estado de carga de la batería debido a que, como su nombre indica, cuentan las cargas que entran y salen de las celdas de la batería.

## 4.1. Ley de Peukert

A continuación, se presenta la Ley de Peukert, puesto que más adelante se hace mención a ella y además explica un fenómeno que sucede en las baterías que, a parte de ser un fenómeno que no es nada obvio, no se cumple en algunos de los modelos de descarga. La ley de Peukert consiste en una relación entre el estado de carga de una batería y su ratio de descarga: a mayor ratio de descarga, menor capacidad de la batería. La ecuación de Peukert es la siguiente:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (4.1)$$

Siendo:

- $C_p$ : Capacidad de la batería descargándola a 1 amperio (h)
- $I$ : Corriente de descarga real (A).
- $t$ : Tiempo de descarga real (h).
- $k$ : Constante de Peukert (adimensional)

La anterior ecuación se puede reformular considerando  $H$  el tiempo de descarga teórico de la batería:

$$t = H \left( \frac{C}{IH} \right)^k \quad (4.2)$$

Teóricamente si tenemos una batería con una capacidad de 100 Ah, si la descargamos a una intensidad de 5 A, tendremos una duración de 20h.

Sin embargo, si consideramos la Ley de Peukert el cálculo no es tan directo. Si suponemos que la batería tiene una constante de Peukert de 1,2 (una batería de ácido – plomo tiene una k entre 1,1 y 1,3) y la sometemos a una descarga de 10 A obtenemos:

$$t = 20 \left( \frac{100}{10 \cdot 20} \right)^{1,2} = 87 \text{ Ah}$$

## 4.2. Modelo de Shepherd y su versión mejorada

El modelo de Shepherd es un modelo sencillo que nos permite calcular el estado de carga de una batería a partir de parámetros internos de la misma midiendo el voltaje en bornes de la misma. Los parámetros que utiliza son la resistencia interna de la batería, la tensión en bornes, la tensión de vacío y la intensidad de descarga. El problema que presenta dicho modelo es que, dependiendo de las condiciones de simulación, puede entrar en un bucle matemático e impedir así la correcta simulación de la curva de descarga.

Es por ello que en este trabajo se ha considerado una versión mejorada del modelo de Shepherd, que impide el problema matemático comentado anteriormente.

### 4.2.1. Versión mejorada del modelo de Shepherd

Esta versión del modelo de Shepherd es la que se ha tomado como referencia para este estudio y es la que se va a considerar a partir de ahora.

Las características principales de éste modelo son las mismas que las del modelo original de Shepherd, es decir, que el estado de carga depende de parámetros internos de la batería, que las curvas de carga y descarga se modelizan usando la misma ecuación, ...

Sin embargo, este modelo tiene la ventaja de que mediante unas constantes se evita que la simulación entre en bucle matemático como en el caso anterior.

La ecuación que se usa para modelizar la batería es la siguiente:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (4.3)$$

Siendo:

- E = Tensión sin carga (V)
- $E_0$  = constante de voltaje de la batería (V)
- K = Voltaje de polarización (V)
- Q = Capacidad de la batería (Ah)
- $i \cdot t$  = Estado de carga instantáneo (Ah)
- A = Voltaje del inicio de la zona exponencial (V)
- B = Inverso de la constante de tiempo de la zona exponencial (Ah)<sup>-1</sup>
- R = Resistencia interna ( $\Omega$ )
- i = Intensidad instantánea (A)

En el modelo original, hay un término no lineal igualado a  $K \frac{Q}{Q-it} \cdot i$  por lo que cuando la batería esta descargada por completo y no hay corriente circulando, el voltaje en bornes tiene a  $E_0$ . En cuanto el corriente empieza a circular de nuevo, el voltaje cae de forma repentina (de hecho, así sucede en la realidad), pero el modelo matemático se comporta de tal forma que compromete su estabilidad.

Con el modelo propuesto, cuando la batería está descargada por completo y no hay corriente circulando, el voltaje tiende a 0. Este modelo representa resultados de alta precisión y además no compromete la estabilidad del modelo.

Sin embargo, el modelo mejorado está basado en las siguientes premisas y tiene sus limitaciones:

- Premisas:
  - La resistencia interna es supuesta constante tanto durante la carga como la descarga y no varía con el valor de la corriente.
  - Los parámetros del modelo se deducen del proceso de descarga y se consideran también para el proceso de carga.
  - La capacidad de la batería no se ve afectada por el valor de la corriente (no se considera el efecto Peukert).
  - No se consideran los efectos de la temperatura, ni el fenómeno de la autodescarga.
  - La batería se considera “sin memoria”.
  
- Limitaciones del modelo:
  - El valor mínimo de la tensión de vacío en la batería es 0 V (el máximo no está limitado)
  - La capacidad mínima de la batería es 0 Ah (la máxima no está limitada). Como consecuencia, el estado de carga de la batería puede ser superior al 100% en caso de sobrecarga.

### **Determinación de los parámetros del modelo**

A continuación, se presenta un método para extraer los parámetros del modelo. El método está hecho en base a una batería de Níquel – Hidruro metálico, pero el procedimiento es equivalente para las baterías de Plomo – Ácido, Níquel – Cadmio y Ion – Litio.

Los parámetros que usa la batería pueden ser extraídos de las curvas de descarga ofrecidas por el fabricante. Sin embargo, en el caso de la resistencia interna, a veces el valor suministrado por el fabricante no es el que hace que la curva obtenida se ajuste más a la realidad. Es por esta razón que se ha determinado un método para obtener la resistencia interna a través de la eficiencia.

$$R = V_{nom} \cdot \frac{1-\eta}{0,2 \cdot Q_{nom}} \quad (4.4)$$

Ahora la dificultad está en encontrar la eficiencia de la batería. Gracias a un experimento realizado con más de 30 pruebas de descarga de batería, se determinó que la eficiencia media para baterías con una tensión de celda de 1,2 V era de media un 99,5%.

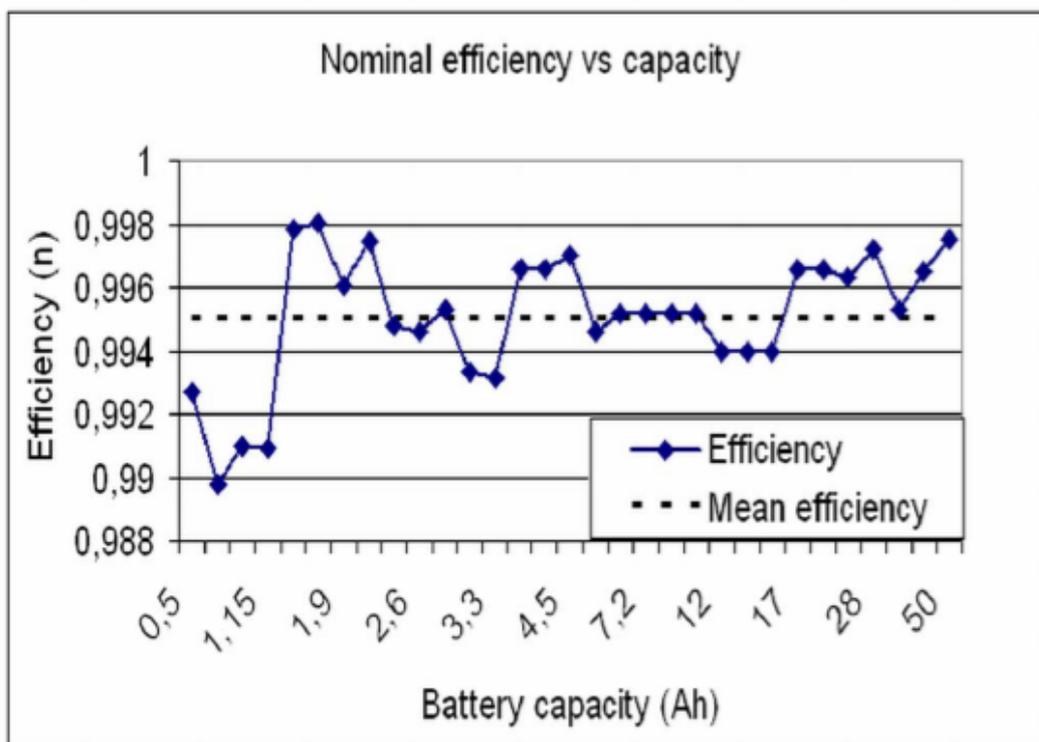


Figura 12: Eficiencia de distintas baterías de distintas capacidades [1]

Para extraer el resto de parámetros del modelo se necesita conocer tres puntos o estados de la batería: el voltaje cuando está cargada al máximo, el final de la zona exponencial (voltaje y carga) y el final de la zona nominal (voltaje y carga).

El valor del parámetro A, que equivale a la caída de potencial durante la zona exponencial se calcula mediante:

$$A = E_{max} - E_{exp} \quad (4.5)$$

Siendo  $E_{max}$  el voltaje cuando la batería está cargada al máximo y  $E_{exp}$  el voltaje del fin de la zona exponencial.

El valor del parámetro B (3/B equivale a la carga de la batería al final de la zona exponencial) se calcula mediante:

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (4.6)$$

El voltaje de polarización K se deduce de la siguiente expresión:

$$K = \frac{E_{max} - E_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot it} - 1) \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (4.7)$$

La constante  $E_0$  se deduce del voltaje cuando la batería está cargada al máximo,  $E_{max}$

$$E_0 = E_{max} + K + R \cdot i - A \quad (4.8)$$

Cabe remarcar que la precisión del modelo depende del valor de los parámetros encontrados mediante el procedimiento anterior, y éstos, a su vez, dependen de los tres puntos o estados de la batería, los cuales a veces no son fáciles de obtener.

## 5. Simulación del proceso de descarga mediante el modelo de Shepherd mejorado

En este capítulo, con intención de validar el modelo de Shepherd mejorado, se llevarán a cabo varias simulaciones de descarga mediante el programa Matlab ® con su extensión Simulink ®. Para hacer más completa la validación, se llevará a cabo se simularán una batería de Níquel – Hidruro metálico, una de Plomo – Ácido y una de Níquel – Cadmio con distintas intensidades de descarga, y se compararán los resultados con las curvas de descarga suministradas por el fabricante.

### 5.1. Modelado en Matlab

Para llevar a cabo la simulación, se ha modelado en Matlab ® mediante Simulink ® el modelo de Shepherd y el resultado ha sido el siguiente:

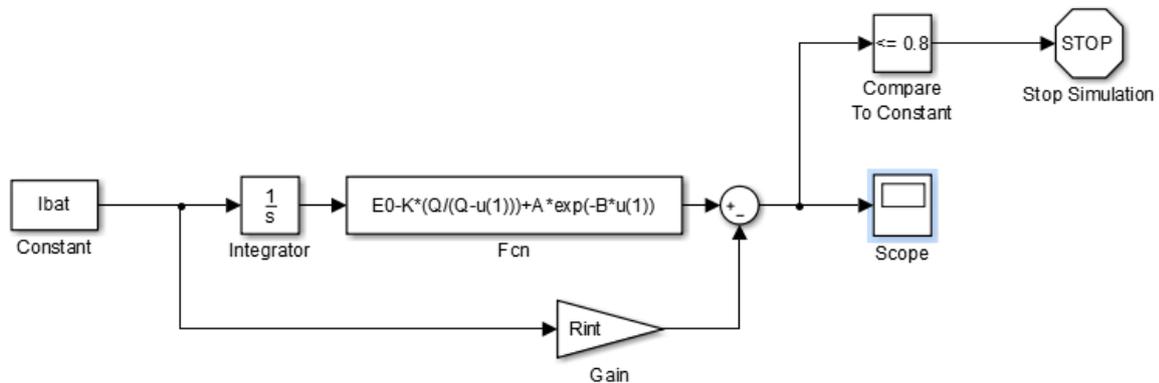


Figura 13: Esquema del modelo de Shepherd mejorado en Simulink ®

## 5.2. Parámetros de las baterías

Para la simulación y mediante el procedimiento explicado anteriormente, se podrían haber calculado los parámetros necesarios para los tres tipos de baterías a simular. Puesto que no se disponían de datos para todas las baterías, se han cogido los datos del artículo *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles* **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tipo	Plomo – Ácido		Níquel – Cadmio		Níquel – H. Metálico	
<b>Datos Fabricante:</b>	V=12 V	Q=1,2 Ah	V=1,2 V	Q=1,3 Ah	V=1,2 V	Q=6,5 Ah
<b>E<sub>0</sub> (V)</b>	12,7163		1,2505		1,2848	
<b>R (Ω)</b>	0,25		0,023		0,0046	
<b>K (V)</b>	0,4		0,00852		0,01875	
<b>A (V)</b>	0,66		0,144		0,144	
<b>B (Ah)<sup>-1</sup></b>	2884,61		5,7692		2,3077	

## 5.3. Simulación batería de Plomo – Ácido

Para simular el comportamiento de una batería de Plomo – Ácido con los parámetros descritos en el apartado anterior se ha tomado como referencia una curva de descarga suministrada por el fabricante. La curva de descarga en cuestión estaba definida para dos intensidades de descarga distintas, las cuales también han sido usadas para hacer la simulación y de este modo poder hacer una pequeña comparación de los resultados.

La primera intensidad de descarga simulada ha sido la de 0,13 A y la curva de descarga obtenida es la siguiente:

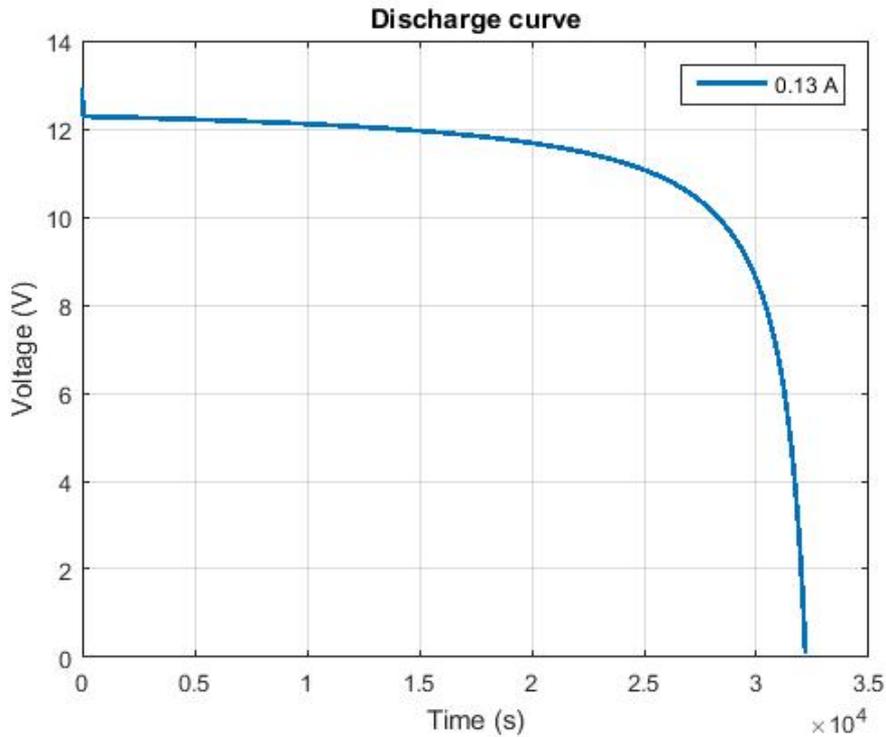


Figura 14: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Plomo - Ácido con una intensidad de descarga de 0,13 A

Considerando que la tensión mínima de la batería para que pueda funcionar son 10,5 V, la duración de la batería en estas condiciones es de aproximadamente  $2,75 \times 10^4$  segundos, que equivale a unas 7,6 horas.

A continuación, se han cambiado las condiciones de descarga y se ha hecho una simulación con una intensidad de descarga de 0,065 A, y la curva resultante de la simulación es la siguiente:

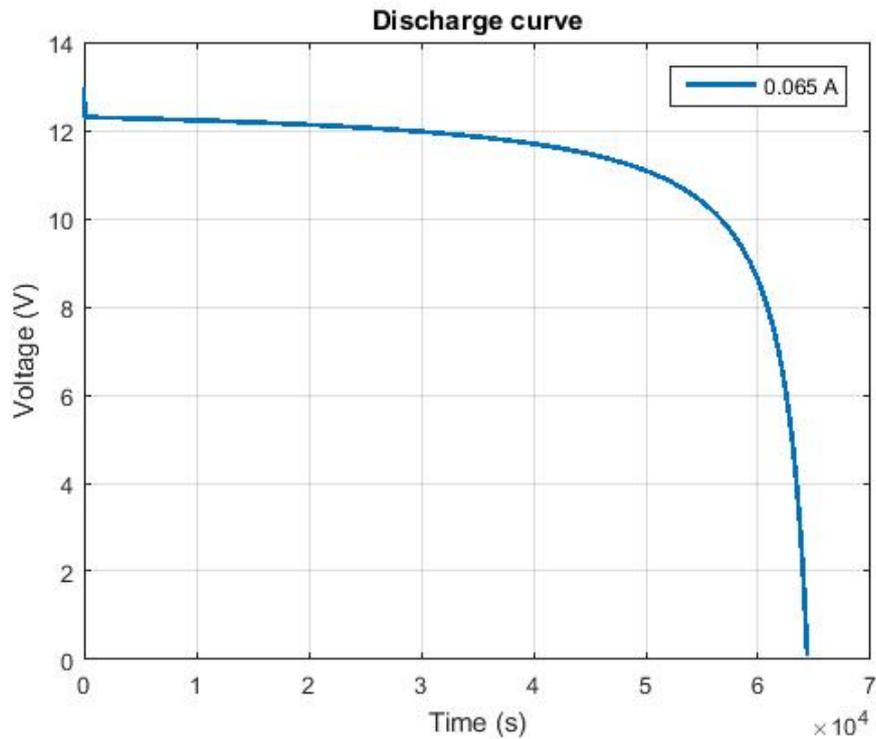


Figura 15: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Plomo - Ácido con una intensidad de descarga de 0,065 A

En esta ocasión, el tiempo de descarga de la batería, con una intensidad mucho menor, es de aproximadamente  $5,5 \times 10^4$  segundos, que equivalen a algo más de 15 horas.

Como se puede comprobar, según el modelo de Shepherd, al realizar una descarga a una intensidad igual a la mitad que la inicial, la duración de la batería es el doble. En realidad, este comportamiento es erróneo, puesto que el modelo no tiene en cuenta entre otros factores el efecto Peukert. Sin embargo, los resultados son bastante precisos.

A continuación, se presenta una figura que muestra una comparación entre las curvas reales presentadas por el fabricante y las curvas simuladas con el modelo de Shepherd.

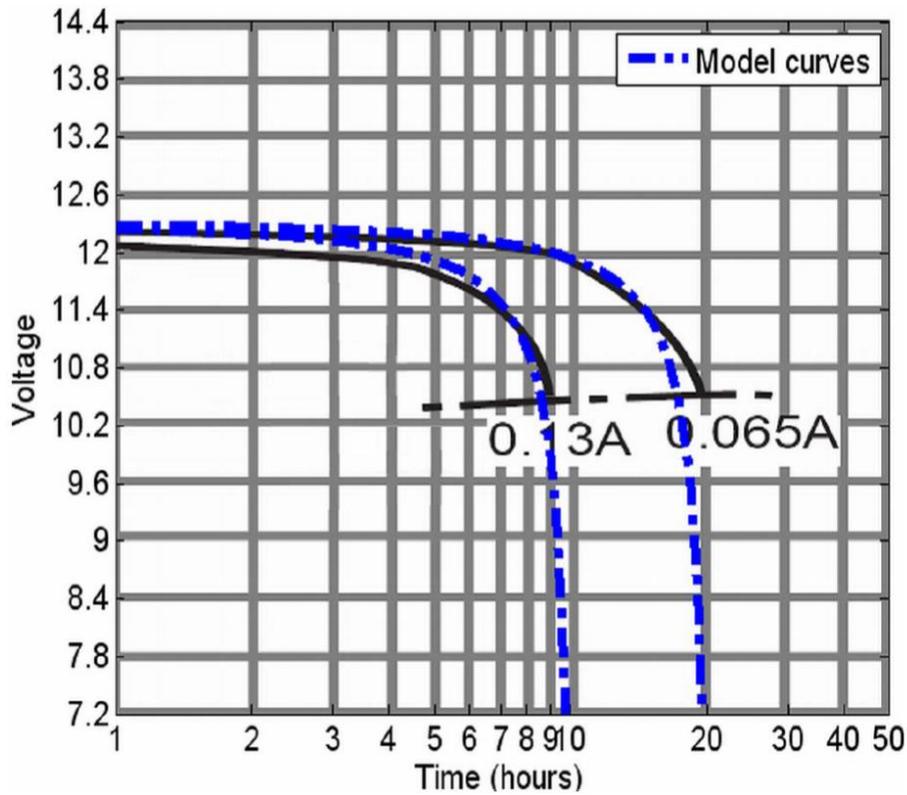


Figura 16: Curvas de descarga de una batería de Plomo - Ácido para distintas intensidades [1]

Para esta primera batería, se han hecho algunas simulaciones más para ver cómo se comportaba la batería en distintas condiciones de descarga.

La primera de ellas ha sido simular una descarga de 0,13 A durante las cuatro primeras horas y luego cambiar la intensidad de descarga a 0,065 A. El resultado de dicha simulación se presenta a continuación en la Figura 17. Se ha añadido una marca roja al gráfico para marcar el punto dónde cambia la intensidad.

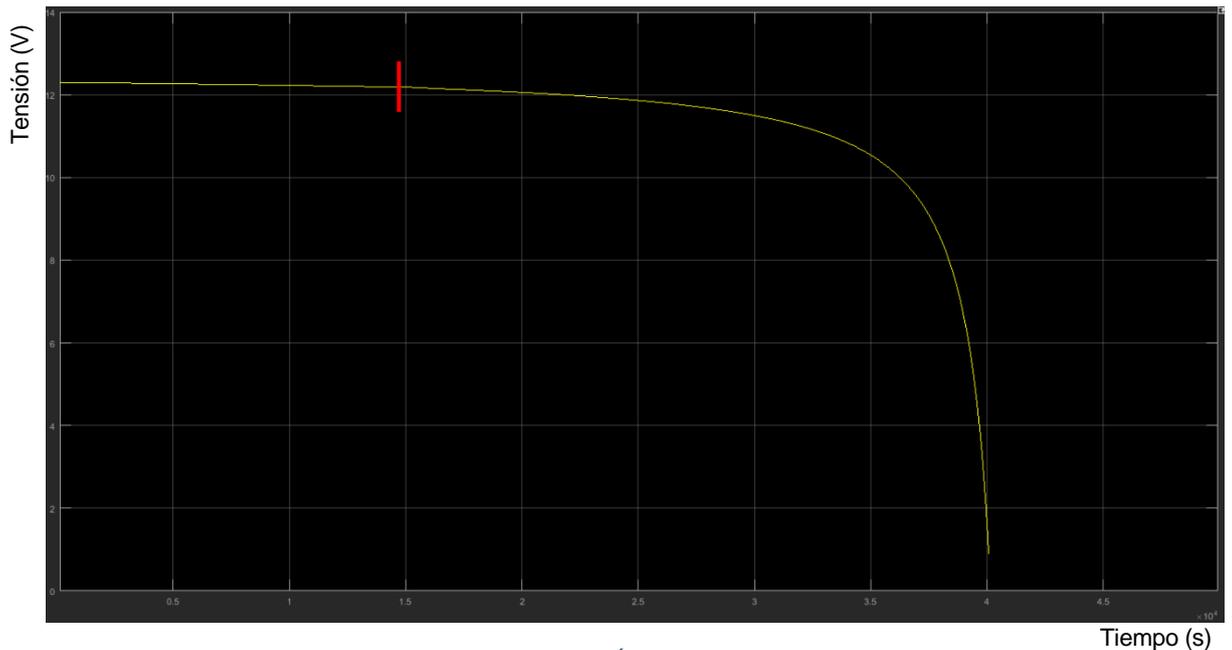


Figura 17: Curva de descarga de una batería Plomo – Ácido con una  $I$  de descarga de 0,13 A las primeras 4 h y de 0,065 A hasta la descarga completa.

Como se puede comprobar, se produce un cambio de pendiente en la curva de descarga al cambiar la intensidad. En este caso, como la intensidad de descarga disminuye, el pendiente también lo que provoca que la descarga suceda a un tiempo superior.

La descarga completa se produce en esta situación a un tiempo de  $3,5 \times 10^4$  segundos que equivalen a casi 10 horas de funcionamiento. Además, es un resultado coherente porque el tiempo resultante está entre los dos resultados anteriores.

La siguiente simulación se ha realizado siguiendo la misma idiosincrasia que la anterior, pero al revés: se ha simulado el proceso de descarga para una intensidad de 0,065 A durante las primeras 8 horas de la simulación y a continuación se ha cambiado la intensidad de descarga a 0,13 A. El resultado de dicha simulación se puede ver en la Figura 18.



Figura 18: Curva de descarga de una batería Plomo – Ácido con una  $I$  de descarga de 0,065 A las primeras 8 h y de 0,13 A hasta la descarga completa.

Como se puede comprobar, en la zona marcada en rojo se produce un cambio de pendiente, que, a diferencia del caso anterior, el pendiente aumenta y por consiguiente el tiempo total de descarga disminuye. En esta ocasión, el tiempo de descarga de la batería es de  $4,25 \times 10^4$  segundos que equivalen a 11,8 horas.

El tiempo de descarga obtenido también es coherente, puesto que está en medio de los dos iniciales.

Por último, se ha querido simular una situación con dos cambios en el valor de la intensidad de descarga. En esta ocasión, se ha empezado la simulación con una intensidad de 0,065 A, a las 5 h se ha cambiado el valor a 0,13 A y finalmente, a las 5 h del cambio anterior se ha cambiado la intensidad a 0,26 A. El resultado de esta simulación se puede ver en la Figura 19.

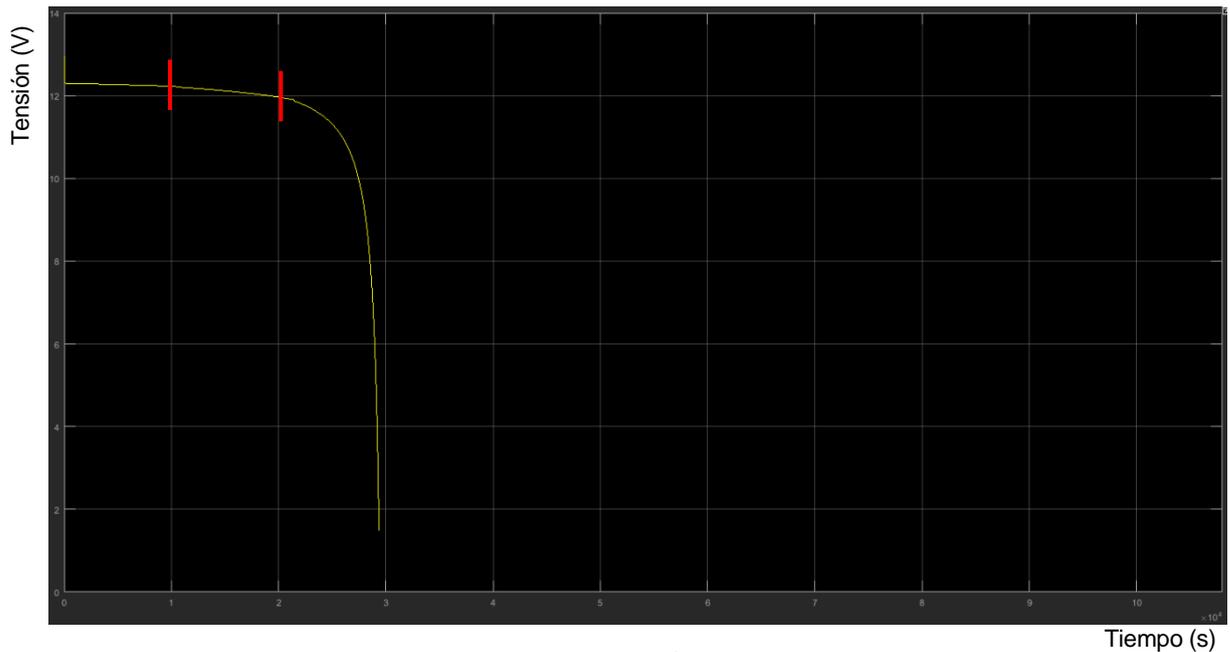


Figura 19: Curva de descarga de una batería Plomo – Ácido con una  $I$  de descarga de 0,065 A las primeras 3 h, de 0,13 A las siguientes 3 h y de 0,26 A hasta la descarga completa.

Como se puede comprobar, en esta ocasión se han producido dos cambios en las intensidades de descarga, señalados en la figura por las marcas rojas. En la zona inicial de la curva de descarga, la intensidad era la menor y, por tanto, el pendiente de la curva es más horizontal que en las demás zonas. A medida que va aumentando la intensidad de descarga, el pendiente de la curva sufre cambios, lo que implican un tiempo total de descarga disminuye.

El tiempo total de descarga alcanzado bajo estas condiciones de simulación es de  $2,75 \times 10^4$  segundos, que equivale a unas 7,6 horas hasta la descarga completa.

Puesto que se ha visto que el modelo de Shepherd funciona correctamente tanto para descargas con intensidad fija, como variable, para los distintos tipos de batería sólo se va a simular para una intensidad fija para toda la simulación.

## 5.4. Simulación batería de Níquel – Cadmio

La segunda simulación es con una batería de Níquel – Cadmio y para ello también se han tomado los parámetros de la tabla. En esta ocasión, la primera intensidad de descarga usada para la simulación ha sido la de 0,6 A, y la curva obtenida ha sido la que se presenta a continuación:

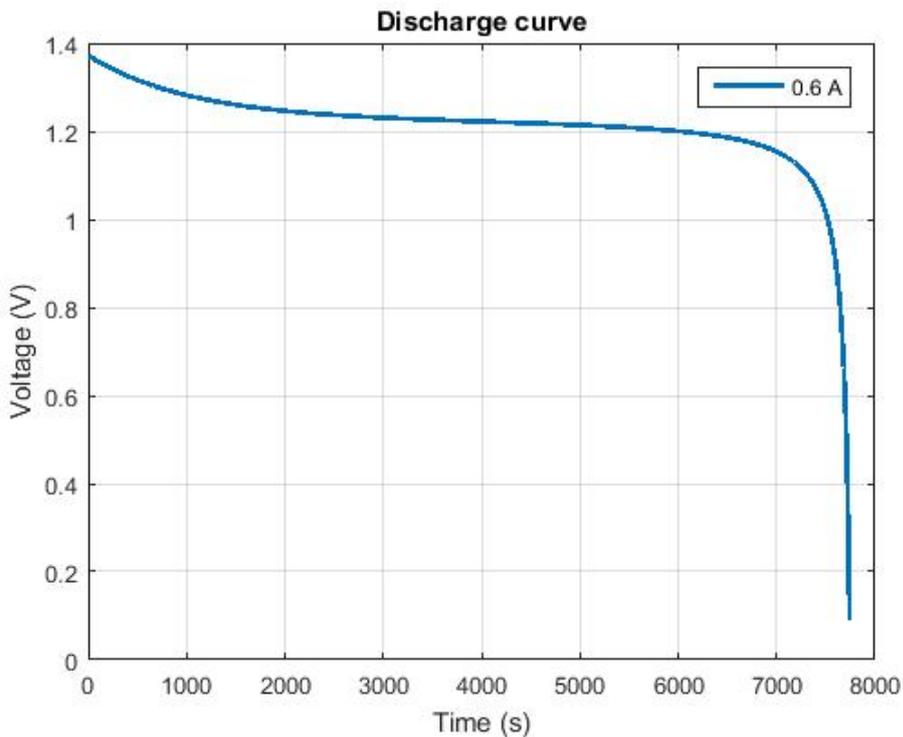


Figura 20: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Níquel - Cadmio con una intensidad de descarga de 0,6 A

Considerando que la tensión mínima de la batería para que pueda funcionar es de 1 V, la duración de la batería en estas condiciones es de aproximadamente 7500 segundos, que equivale a unas 2 horas.

A continuación, se han cambiado las condiciones de descarga y se ha hecho una simulación con una intensidad de descarga de 0,24 A, y la curva resultante de la simulación es la siguiente:

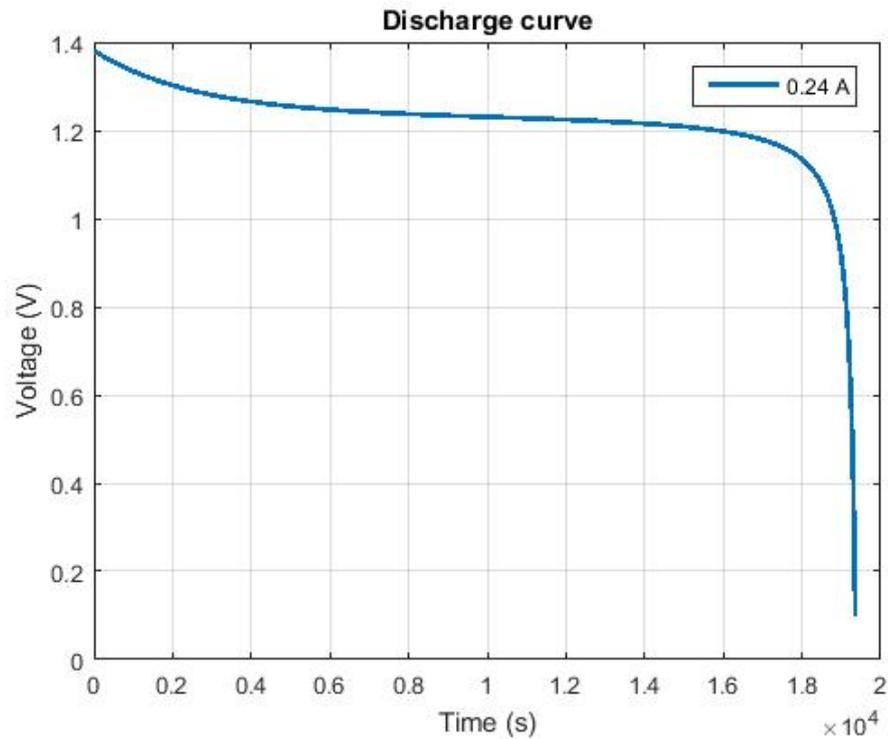


Figura 21: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Níquel - Cadmio con una intensidad de descarga de 0,24 A

En esta ocasión, el tiempo de descarga de la batería, con una intensidad mucho menor, es de aproximadamente  $1,9 \times 10^4$  segundos, que equivalen a un poco más de 5 horas.

Igual que el apartado anterior, finalmente se han sobrepuesto los gráficos anteriores con los suministrados por el fabricante:

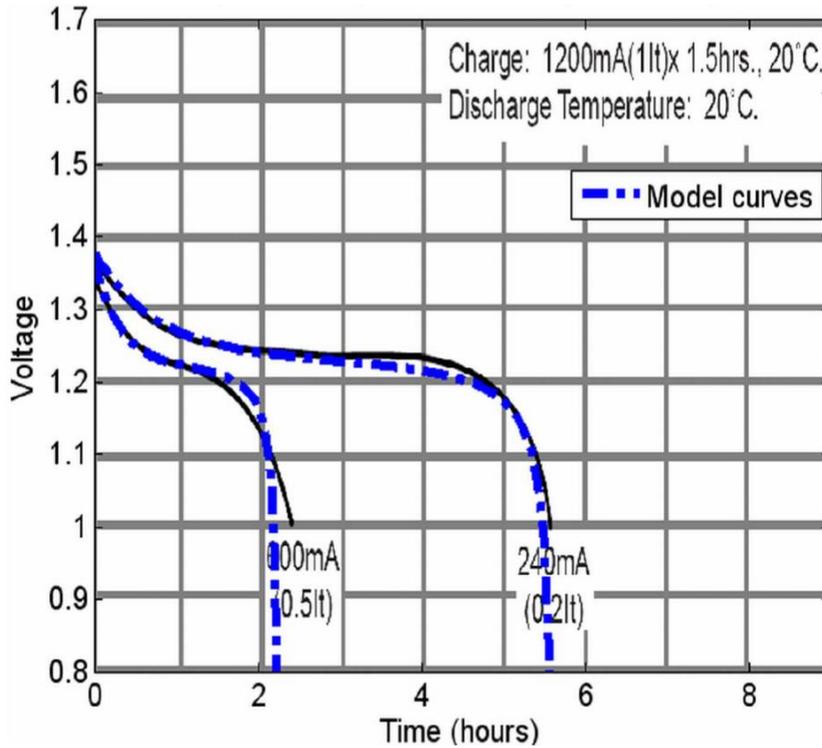


Figura 22: Curvas de descarga de una batería de Níquel - Cadmio para distintas intensidades [1]

### 5.5. Simulación batería de Níquel – Hidruro metálico

Por último, se ha llevado a cabo la simulación de una batería de Níquel – Hidruro metálico. Para ello, igual que en los casos anteriores, también se han utilizado los parámetros de la tabla. En este caso se disponía de tres curvas de descarga con distintas intensidades y por eso se han hecho tres simulaciones en vez de dos.

La primera simulación se ha hecho considerando una intensidad de descarga de 6,5 A y la curva de descarga obtenida es la que se presenta a continuación:

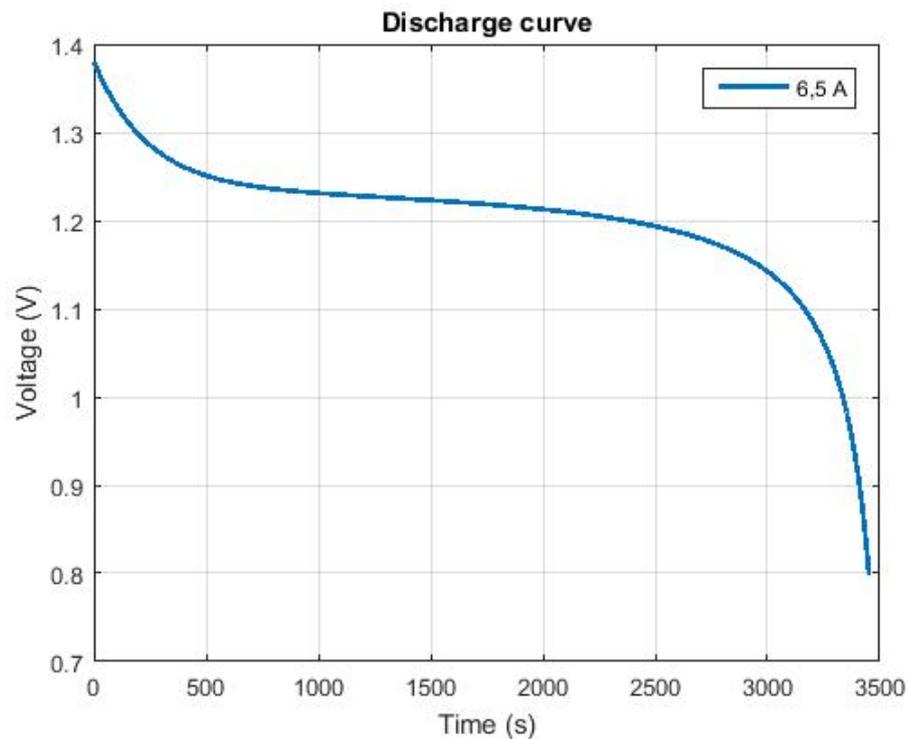


Figura 23: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Níquel - Hidruro metálico con una intensidad de descarga de 6,5 A

Considerando que la batería puede funcionar hasta que tenga una tensión en bornes de 1 V, el tiempo de descarga en estas condiciones es de 3300 segundos que equivalen a 55 minutos.

La segunda simulación se ha hecho considerando una intensidad de descarga de 13 A y la curva de descarga obtenida es la siguiente.

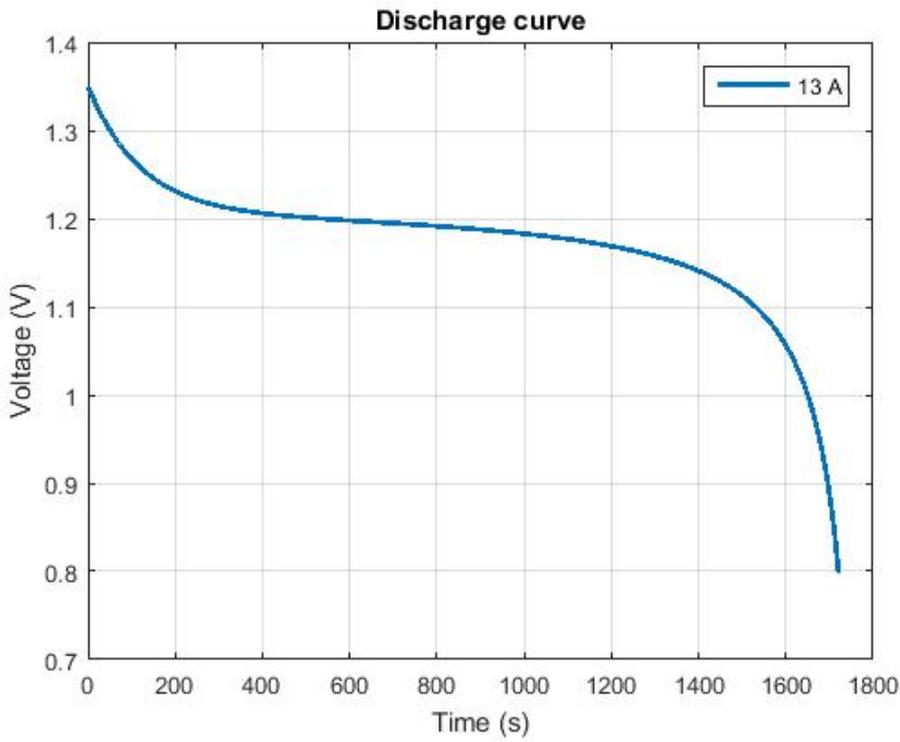


Figura 24: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Níquel - Hidruro metálico con una intensidad de descarga de 13 A

En esta ocasión, el tiempo de descarga es de unos 1650 segundos que equivalen a 27,5 minutos.

Por último, se ha simulado una tercera descarga, en esta ocasión con una intensidad de descarga de 32,5 A y la curva de descarga ha quedado de la siguiente manera:

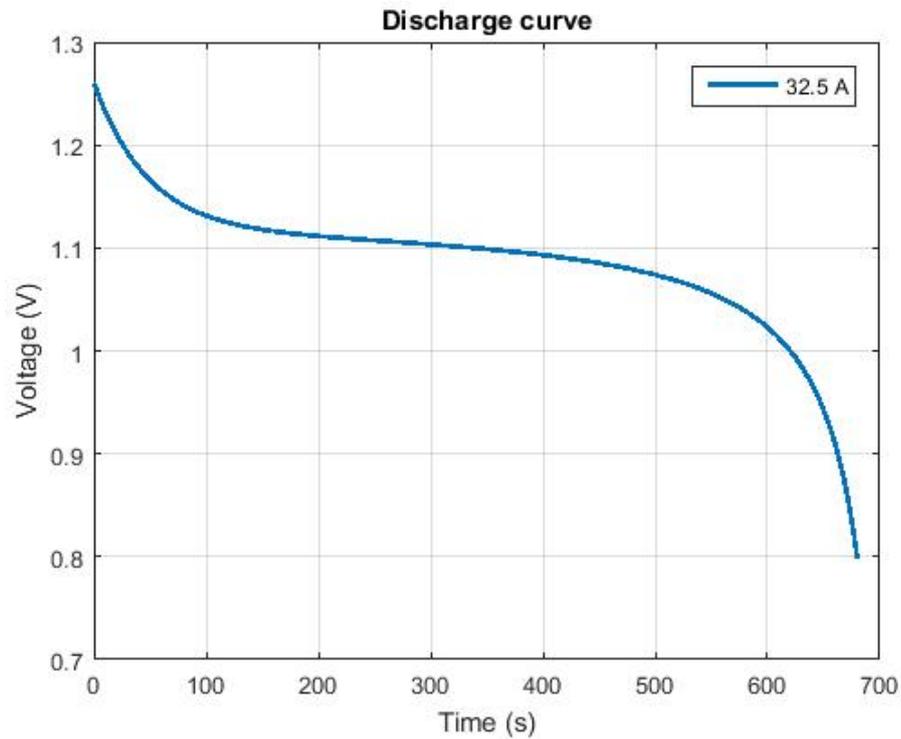


Figura 25: Curva del voltaje en función del tiempo de una batería de Níquel - Hidruro metálico con una intensidad de descarga de 32,5 A

En esta ocasión, y con una intensidad de descarga de 32,5 A, el tiempo de descarga hasta alcanzar el voltaje mínimo de funcionamiento supuesto es de unos 625 segundos, que equivalen a 10,4 minutos.

Igual que en los casos anteriores, se han sobrepuesto las curvas de descarga simuladas y las curvas suministradas por el fabricante obteniendo los siguientes resultados:

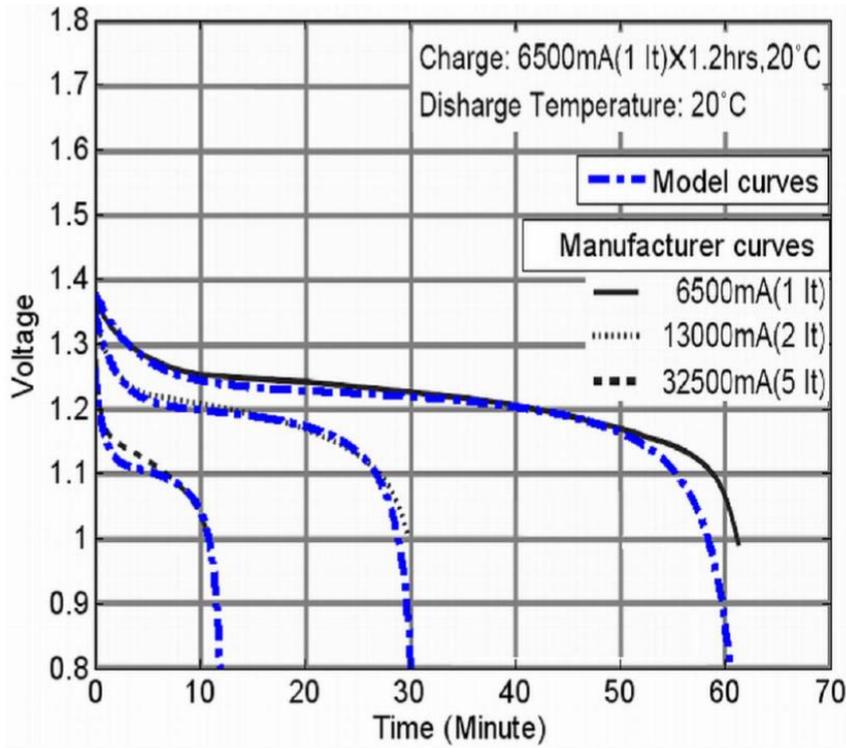


Figura 26: Curvas de descarga de una batería de Níquel - Hidruro metálico para distintas intensidades [1]

## 6. Conclusiones

En este apartado se presentarán las conclusiones tanto del trabajo en sí como de los resultados de las simulaciones. Es por eso que se ha decidido dividir el apartado de las conclusiones en dos subapartados.

### 6.1. Conclusiones de la simulación

Los resultados de la simulación, a pesar de la poca precisión de los gráficos del fabricante, puede considerarse como buena. Los tiempos de descarga del modelo se ajustan de forma correcta a la descarga teórica en todos los puntos de la misma. Además, también ha respondido bien al cambiar el valor de la intensidad de descarga en medio de la simulación.

Cabe remarcar que en los extremos de la curva es donde más error se cometía como norma general, lo que puede hacer el método poco válido para usar en el caso de que se necesite mucha precisión (por ejemplo, para apagar el dispositivo por batería baja de forma controlada antes de que se apague solo y evitar así una posible pérdida de datos y un posible daño en el mismo).

Por otro lado, el hecho de tener un método que funcione de forma correcta para muchos tipos de batería, como es el método de Shepherd mejorado, hace que sea mucho más interesante el considerar este método a la hora de estimar el estado de carga. Cuanto más universal y más versátil sea un método, mayor rango de aplicaciones tendrá y desde luego, éste tiene un rango amplio.

Además, para pequeñas variaciones de intensidad de descarga, se pueden extrapolar los resultados de la descarga con una intensidad a otra, al no considerar el efecto de Peukert. Este fenómeno se ha comprobado en la primera simulación, la de la batería de Ácido – Plomo. Se ha visto que para una intensidad de descarga de 0,13 A, el tiempo de descarga era de  $2,75 \times 10^4$  segundos y para una intensidad de descarga de 0,065 A (la mitad que en el caso anterior) el tiempo de descarga era de  $5,5 \times 10^4$  segundos (es decir, el doble que el caso anterior).

Sin embargo, un punto negativo del modelo mejorado de Shepherd es la dificultad en obtener los parámetros necesarios para su simulación. Además, dichos parámetros dependen de cada batería, por lo que, para poder simular una batería, o se disponen de los parámetros o no se puede emplear el modelo (al referirme a parámetros me refiero básicamente a la eficiencia, puesto que como se ha demostrado, se pueden obtener el resto de parámetros a partir de la eficiencia).

## 6.2. Conclusiones del trabajo

Una vez terminado el trabajo se puede afirmar que se han cumplido los objetivos. Se han presentado los distintos tipos de baterías, junto con sus características. También se han comentado los distintos métodos para el cálculo del estado de carga y se ha hecho especial hincapié al modelo de Shepherd mejorado, del cual se han presentado también sus premisas, sus ecuaciones y sus hipótesis de funcionamiento. Por último, se ha podido analizar distintos tipos de baterías, con distintas intensidades de descarga con el modelo de Shepherd mejorado. Se han simulado además por una batería distintas intensidades en una misma simulación con la intención de aproximarla más a las condiciones de trabajo reales de una batería, en donde la corriente solicitada depende del tipo de uso que se le dé al dispositivo. En todas las baterías se han obtenido unos resultados buenos al compararlos con las curvas suministradas por el fabricante.

Como comentario final del trabajo, se deben destacar varios conceptos. El primero de ellos es la importancia de disponer de un buen método para estimar el estado de carga de las baterías. La tendencia mundial es que cada vez más dependamos más de fuentes de energía eléctrica, y un ejemplo claro de ello, como se ha comentado al principio del trabajo es el coche eléctrico. Entonces es imprescindible el poder tener baterías de alta capacidad y peso reducido, y el poder determinar de forma precisa el estado de carga permite aprovechar mucho más el potencial de las mismas. Puntos de la batería como el llenado completo (para lograr aumentar la vida útil de las baterías) y el punto más próximo a la descarga completa (para poder realizar un apagado del dispositivo de forma controlada y evitar así posibles pérdidas de información o daños en los sistemas electrónicos) son de vital importancia.

Dentro de los métodos existentes, hay algunos que son muy precisos, pero son complicados de implementar.

Sin embargo, el método de Shepherd, y en concreto su versión mejorada, permite obtener mediante un proceso no muy complicado, unos resultados de simulación bastante precisos, así que se puede considerar un método muy equilibrado en cuanto a precisión de resultados – dificultad de implementación.

Sí que es cierto que la dificultad del método recae en encontrar los parámetros de la batería para poder llevar a cabo la simulación, y que en sus premisas no considera algunos efectos que se producen en las baterías en la realidad, pero en términos generales, el método tiene muchos rangos de aplicaciones y puede ser un muy buen candidato para usar en muchas aplicaciones.

## 7. Bibliografia

### 7.1. Referències bibliogràfiques

- [1] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles

### 7.2. Bibliografia complementària

- Diaz-González Francisco, Sumper Andreas y Gomis-Bellmunt Oriol. *Energy Storage in Power Systems*. Chichester: Wiley, 2016.
- Yevgen Barsukov, Jinrong Qian. *Battery Power Management for Portable Devices*. Norwood: Artech House, 2013.
- Weicker Phillip. *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Norwood: Artech House, 2014.