

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL:

ELECTRÓNICA INDUSTRIAL



**ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS.**

AUTOR: Carlos Peña Ordóñez.

TUTOR: Jorge Pleite Guerra.

Mayo, 2011





Estudio de baterías para vehículos eléctricos.

Autor: Carlos Peña Ordóñez.

Director: Jorge Pleite Guerra.

EL TRIBUNAL

Presidente: D. Pablo Zúmel Vaquero.

Vocal: D. David Mauricio Alba Lucero.

Secretario: D. Carlos González García

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 24 de Mayo de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Dedicado mi madre.

OBJETIVOS

El presente Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo recabar información sobre baterías para vehículos eléctricos, forma parte de un amplio proyecto que la Universidad Carlos III de Madrid está desarrollando. El trabajo consiste en el desarrollo de una motocicleta eléctrica de competición. Con este documento se pretende abordar una de las partes que ayudarán al desarrollo de dicha motocicleta.

La principal motivación que persigue este proyecto, es la búsqueda de documentación sobre las tecnologías de baterías actuales, buscando la más óptima para este fin. Abordando la problemática de las baterías para los vehículos eléctricos, ya que las baterías son el punto débil de los prototipos eléctricos que están empezando a salir al mercado del automóvil. Sus prestaciones limitadas y un alto precio relativo, hacen dura la competencia con vehículos convencionales de combustión. Sin embargo, existe una creciente demanda social de tecnologías limpias, más respetuosas con el medio ambiente que hacen especialmente deseable el desarrollo de vehículos eléctricos al menos para su uso en un entorno urbano.

Una vez seleccionada el tipo de batería, el objetivo se centra en profundizar conocimientos sobre esa tecnología y los elementos adicionales que mejoran el rendimiento y prestaciones de ella.

Para conseguir una comprensión aun más profunda sobre este tipo de tecnología, también se estudia los métodos de fabricación de la batería seleccionada.

La otra gran motivación del proyecto, es proponer un frenado regenerativo, mediante un sistema de supercondensadores, los cuales aumentan la autonomía del vehículo absorbiendo energía durante las frenadas. Por lo que se propondrá tanto el circuito eléctrico, como los cálculos necesarios para dicho sistema.

Por último, se ha de mencionar que los medios por los cuales se ha captado información para la realización de este proyecto, han sido exclusivamente a través de la red y no solo por la vasta información existente, sino por la dificultad de conseguir información actual a través de libros u otros documentos.

ESTRUCTURA DEL PROYECTO

A continuación se detalla la estructura que se ha seguido para la descripción del trabajo realizado.

En el **capítulo 1**, se describe el estado del arte de las tecnologías de baterías, que se utilizan en aplicaciones cíclicas de carga-descarga. En este capítulo se definen los principales índices de comportamiento, que fijan las características de las tecnologías de baterías, facilitándose una mejor comprensión del análisis que se realiza de los mismos.

Después del análisis comparativo de las diferentes tecnologías de baterías, se seleccionan aquellas que se consideran más adecuadas para su aplicación en vehículos. A partir de este momento la atención queda centrada en la tecnología del litio y sus variantes.

En el **capítulo 2**, se estudia la electrónica asociada a las baterías, en concreto el sistema “BMS”, el cual es el encargado de gestionar los parámetros de funcionamiento de las baterías, además de optimizar su funcionamiento.

El objetivo del **capítulo 3**, es explicar los pasos de fabricación del polímero de litio, hasta su uso comercial.

El **capítulo 4**, se centra en el manejo de las baterías de polímero de litio y los posibles efectos de un mal uso.

En el **capítulo 5**, se propone un sistema de supercondensadores complementarios a las baterías, con el objetivo de mejorar la eficiencia del motor y conseguir una mayor autonomía, debido al frenado regenerativo.

Finalmente, en el **capítulo 6**, se exponen las conclusiones de este proyecto y las principales aportaciones realizadas. Además, se enumeran una serie de sugerencias o propuestas para futuros trabajos, teniendo en cuenta nuevas ideas surgidas durante la investigación desarrollada y que no ha sido posible estudiar en este proyecto.



Índice

CAPÍTULO 1

1. ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS.....	16
1.1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.2. CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS.....	16
1.3. TERMINOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS.....	17
1.3.1. PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN A UNA BATERÍA.....	17
1.4. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.....	22
1.4.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LAS BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO	23
1.4.2. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO DE VÁLVULA REGULADA.....	24
1.5. BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO.....	25
1.5.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LAS BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO.....	25
1.6. BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO.....	26
1.6.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE LAS BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO.....	26
1.7. BATERÍAS LITIO.....	27



1.7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS BATERÍAS DE LITIO.....	28
1.7.2. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL POLÍMERO DE LITIO (LIPO).....	30
1.7.3. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL ION DE LITIO CON CÁTODO DE LiCoO ₂	32
1.7.4. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL ION DE LITIO CON CÁTODO DE LiFePO ₄	33
1.8. COMPARACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE BATERÍAS.....	34
1.8.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	36
1.8.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES.....	36
1.8.3. CONCLUSIONES.....	43

CAPÍTULO 2

2. BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM).....	46
2.1. INTRODUCCIÓN.....	46
2.2. PROTECCIÓN DE CELDAS.....	46
2.2.1. PROTECCIÓN EN TEMPERATURA.	47
2.2.2. PROTECCIONES CONTRA CORTOCIRCUITOS.....	47
2.2.3. APLICACIONES CON MULTI-CELDAS.....	51
2.2.3.1. PROBABILIDAD DE FALLO EN LAS CADENAS DE CELDAS.	51



2.2.4. GESTIÓN DE LA DEMANDA.....	51
2.2.5. ESTADO DE CARGA (SOC).....	52
2.2.5.1. CÓMO SE DETERMINA EL SOC.....	52
2.2.6. ESTADO DE SALUD (SOH).....	53
2.2.6.1. CÓMO SE DETERMINA EL SOH.....	53
2.2.6.2. CUÁL ES LA UTILIZACIÓN DEL SOH.....	54
2.2.7. EQUILIBRIO DE LAS CELDAS.....	54
2.2.7.1. ORIGEN DE LOS DESEQUILIBRIOS.....	54
2.2.7.2. TODAS LAS CÉLULAS NO SON IGUALES.....	55
2.2.7.3. EQUILIBRADO DE LA CÉLULA.....	55
2.3. BATERÍAS INTELIGENTES.....	56
2.3.1. OBJETIVOS DE LAS BATERÍAS INTELIGENTES.....	57
2.3.2. FUNCIONES DEL CHIP DE MEMORIA EN LA BATERÍA INTELIGENTE.....	57
2.4. AUTENTIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN.....	58
2.4.1. IDENTIFICACIÓN MEDIANTE CÓDIGO NUMÉRICO.....	59
2.4.2. IDENTIFICACIÓN MEDIANTE RADIOFRECUENCIA.....	59
2.4.3. IDENTIFICACIÓN MEDIANTE HOLOGRAMAS.....	59
2.4.4. IDENTIFICACIÓN MEDIANTE CÓDIGO DE BARRAS.....	59
2.4.5. COMUNICACIÓN.....	59
2.5. BMS PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO O HÍBRIDO.....	60



2.5.1. FUNCIONES DE UN BMS PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO O HÍBRIDO.....	60
2.5.2. SISTEMA DEL CONTROL AUTOMÁTICO.....	61
2.5.3. MONITOREO DE LA BATERÍA.....	61
2.5.4. PROTECCIÓN DE CELDA.....	61
2.6. APLICACIÓN PRÁCTICA BMS.....	62
2.6.1. TOPOLOGÍA ESTRELLA.....	62
2.6.2. TOPOLOGÍA ANILLO.....	63

CAPÍTULO 3

3. CONSTRUCCIÓN DE BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO.....	66
3.1. INTRODUCCIÓN.....	66
3.2. CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.....	66
3.3. ELEMENTOS DE UNA CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.....	66
3.4. TEMPERATURA Y DISEÑO.....	68
3.5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN INTERNOS A LA CELDA.....	70
3.6. ELEMENTOS PARA LA FABRICACIÓN DE UNA CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.....	71
3.7. GENERACIÓN ATMÓSFERA PROTECTORA.....	72
3.7.1. SALA ACONDICIONADA.....	72
3.7.2. LÍNEAS DE PRODUCCIÓN AISLADAS.....	72
3.8. FABRICACIÓN.....	73



3.8.1. FABRICACIÓN LÁMINA DE LITIO.....	73
3.8.1.1. EXTRUSIÓN.....	74
3.8.1.2. LAMINACIÓN.....	76
3.8.1.3. COMPROBACIÓN CALIDAD.....	77
3.8.1.4. ENROLLADO.....	76
3.8.2. FABRICACIÓN DEL ELECTROLITO.....	79
3.8.3. FABRICACIÓN DE LA LÁMINA DE ALUMINIO.....	80
3.9. LÁMINA COMPLETA.....	81
3.10. SOLDADURA DE LOS ELECTRODOS.....	82
3.10.1. SOLDADURA POR PUNTO.....	82
3.10.2. SOLDADURA POR ULTRASONIDO.....	83

CAPÍTULO 4

4. CÓMO Y QUÉ FACTORES AFECTAN A LA VIDA DE LAS BATERÍAS DE LITIO.....	86
4.1. CICLOS DE VIDA EN LAS BATERÍAS LITIO.....	86
4.2. HINCHAMIENTO DE LAS CELDAS DE LITIO.....	86
4.3. COMO AFECTAN LAS CARGAS Y DESCARGAS A LAS BATERÍAS DE LITIO.....	87
4.4. COMO AFECTA LA TEMPERATURA A LA VIDA Y A LAS PRESTACIONES EN BATERÍAS DE LITIO.....	87



CAPÍTULO 5

5. SUPERCONDENSADORES.....	90
5.1. SUPERCONDENSADORES.....	90
5.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	90
5.3. FRENADO REGENERATIVO ELÉCTRICO.....	91
5.3.1. EL MOTOR COMO GENERADOR.....	91
5.3.2. LIMITACIONES.....	92
5.4. BENEFICIOS DEL USO DE SUPERCONDENSADORES PARA UN MOTOR ELÉCTRICO.....	92
5.4.1. MEJORAS EN RENDIMIENTO.....	92
5.4.2. MEJORAS EN AUTONOMÍA.....	93
5.5. CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE CONDENSADORES EN COMBINACIÓN CON BATERÍA DE POLÍMERO DE LITIO.....	93
5.6. CÁLCULO PARA EL SISTEMA DE SUPERCONDENSADORES.....	94

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	99
6.1. CONCLUSIÓN.	99
6.2. TRABAJOS FUTUROS.	101



Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa de diferentes tipos de baterías [1][6][7][9][10][11][12][13][14].....35

Tabla 2. Voltajes máximos, mínimos y nominales [1][6][7][9][10][11][12][13][14].....41

Índice de figuras

<i>Figura 1. Curva de descarga de la celda 26650 de A123 System [13].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2. Elementos altamente contaminantes [4].....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Tabla periódica [8].....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4. Celdas de polímero de litio.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5. Batería de polímero de litio diseñada por la nasa [30].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6. Batería de ion de litio de un ordenador portátil [9].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7. Esquema de conexiones de celdas y diodos.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 8. Gráfica de funcionamiento de un diodo Zener[44].....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 9. Conexión topología estrella [16].....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 10. Conexión topología anillo [16].....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 11. Celda de polímero de litio [31].....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 12. Capas pertenecientes a una celda de polímero de litio [31].....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 13. Gráfico de la conductividad del electrolito [32].....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 14. Láminas generadoras de calor [32].....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 15. Esquema sobre los conductos de entrada y salida de aire [34].....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 16. Línea de producción aislada [34].....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 17. Características mecánicas, físicas, eléctricas y térmicas de un lingote de litio [35].....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 18. Línea de producción de láminas de litio para baterías [35].....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 19. Boquilla para la extrusión del litio [35].....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 20. Sistema de laminado mediante rodillos en tándem [36].....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 21. Carrete de litio para la fabricación de baterías [38].....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 22. Características de un carrete de litio [38].....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 23. Características del electrolito para baterías de polímero de litio [39].....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 24. Enrollado de lámina de aluminio [40].....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 25. Soldador por puntos TIG [42].....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 26. Soldador por ultrasonidos de varias puntas [42].....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 27. Circuito de batería de condensadores.....</i>	<i>93</i>



1. ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

1 ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

1.1. INTRODUCCIÓN.

La electricidad hoy en día tiene innumerables aplicaciones, esto es debido a la facilidad con que se transforma en otras formas de energía, como mecánica, química o térmica. El principal suministro de energía eléctrica se realiza a través de la red eléctrica, sin embargo hay muchas ocasiones en las que se necesita disponer de energía eléctrica sin poder adquirirla de la red eléctrica.

Uno de los principales problemas de la energía eléctrica, es la dificultad a la hora de su almacenamiento. Las baterías son una de las pocas formas fiables de almacenar la energía eléctrica, convirtiendo la energía eléctrica, en energía química y viceversa. De esta manera podemos disponer de energía eléctrica cuando deseemos sin depender de la red.

El desarrollo en los últimos años de nuevas aplicaciones (vehículos eléctricos, sistemas fotovoltaicos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.) han propiciado el surgimiento y desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, cada vez más eficientes y fiables.

En los siguientes apartados de este capítulo, se clasifican los diferentes tipos de baterías y se describe la terminología que se ha adoptado. Además, se realiza un análisis comparativo de las principales tecnologías de baterías [1].

1.2. CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS.

Existen dos clases de pilas: la primaria, cuya carga no puede renovarse cuando se agota, excepto reponiendo las sustancias químicas de que está compuesta, y la secundaria, que sí es susceptible de reactivarse, sometiéndola al paso más o menos prolongado de una corriente eléctrica, en sentido inverso a aquél en que la corriente de la pila fluye normalmente [1].

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

Las baterías secundarias se comercializan en un amplio margen de capacidades, desde capacidades bajas (algunos cientos de miliamperios-hora) hasta capacidades medias y altas (varias decenas o centenas de amperios-hora).

Este proyecto se centra en el estudio de la tecnología más adecuada para una moto de competición eléctrica, por este motivo, el trabajo se refiere únicamente al grupo de baterías secundarias.

1.3. TERMINOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BATERÍAS.

A lo largo de este proyecto será necesario mencionar distintos parámetros e índices, que definen las características de las baterías. Debido a esto y para acondicionar la introducción a los siguientes capítulos de este proyecto, se hace necesario presentar los siguientes parámetros.

1.3.1. Parámetros que caracterizan a una batería.

- **Celda:** El menor elemento que forma una batería, pueden ser asociada en serie o en paralelo con otras, con el objetivo de conseguir los valores de corriente o de tensión deseados [2].
- **Estado de carga (SOC) %:** Expresión que indica el estado de carga de la batería de manera porcentual, respecto al cien por cien de la capacidad cuando la batería está completamente cargada [2].
- **Profundidad de descarga:** Relación entre la capacidad en amperios-hora (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. DOD (*Depth Of Discharge*) [2].
- **Tensión en vacío (E₀):** La tensión que una batería tiene entre sus terminales, cuando no se cierra un circuito a través de ellos, su valor depende de la naturaleza de la química que se utilice [2].
- **Tensión en circuito cerrado (E):** Tensión que aparece entre los terminales de una batería cuando está conectada a una carga. Cuando una batería suministra energía a una carga, su tensión disminuye tanto o más, cuanto mayor sea la corriente de descarga [2].
- **Resistencia interna:** Se define como un concepto que ayuda a modelar las consecuencias eléctricas de las complejas reacciones químicas que se producen dentro de una batería.

Es imposible medir directamente la resistencia interna de una batería, pero ésta puede ser calculada mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. Así, cuando a una batería se le aplica una carga, la resistencia interna se puede calcular mediante cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$R_B = \left(\frac{V_S - V}{I} \right) \quad (1.1) \quad R_B = \left(\frac{V_S}{I} \right) - R_L \quad (1.2)$$

- R_B : Resistencia interna de la batería.
- V_S : Voltaje de la batería en vacío.
- V : Voltaje de la batería con la carga.
- R_L : Resistencia de la carga.
- I : Intensidad suministrada por la batería.

La resistencia interna varía con la edad de la batería, pero en la mayoría de baterías comerciales la resistencia interna es del orden de 1 ohmio [3].

- **Capacidad:** La capacidad de una batería es la cantidad medida de amperios-hora m (Ah), que puede suministrar o aceptar una batería. El valor de la capacidad de una batería (C), se calcula como la integral de la corriente a lo largo de un determinado periodo de tiempo, esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$C = \int_{t1}^{t2} i \cdot \delta t \quad (1.3)$$

La ecuación es de aplicación general tanto para la descarga (capacidad extraída de la batería) como para la carga (capacidad suministrada a la batería). Aunque esta ecuación es una definición básica de capacidad, existen diferentes definiciones dependiendo de las condiciones bajo las cuales se realiza la medida de capacidad [1].

- **Capacidad nominal:** Capacidad que puede entregar una batería desde plena carga, hasta alcanzar una tensión en descarga determinada, a una temperatura ambiente fijada y utilizando una razón de descarga específica. Por ejemplo, una batería tiene una capacidad nominal de 100 Ah, cuando descargándola desde su estado de plena carga, con una corriente constante de 20 A y a temperatura de 23°C, es capaz de mantener la tensión por encima de 1 V/celda durante al menos 5 horas [1].
- **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 de la batería, excepto la tensión de finalización de la descarga. La capacidad real puede ser menor o mayor que la capacidad nominal, dependiendo de la razón de descarga utilizada y de la temperatura ambiente del entorno donde está funcionando la batería [2].
- **Capacidad retenida:** Capacidad conservada por la batería después de un periodo de reposo o inactividad [2].
- **Máxima corriente de descarga continua:** Máxima corriente que la batería puede descargar de forma continuada. Este límite viene definido por el fabricante para evitar daños o una posible reducción de la capacidad de la batería.
- **Máxima corriente en intervalos:** Corriente máxima a la que la batería puede ser descargada en intervalos de tiempo (entorno a 10 ms), límite que viene fijado por el fabricante con el fin de evitar daños y pérdidas de prestaciones. La máxima corriente por intervalos suele ser sensiblemente más alta que la máxima corriente continua.
- **Índice C:** El **culombio** o **coulomb** (símbolo **C**), es la unidad derivada del sistema internacional para la medida de la magnitud física “cantidad de electricidad” (carga eléctrica) [5].
Es la razón de carga o descarga expresada en amperios y hora. Con frecuencia se utilizan múltiplos y submúltiplos de este índice, para definir la magnitud de la corriente de carga o de descarga de la batería.

Se define como la cantidad de carga transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad de corriente eléctrica.

$$1 \cdot C = 1 \cdot A \cdot s \quad (1.4)$$

- **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, con respecto a la capacidad nominal en un periodo de tiempo de un mes [2].
- **Sobrecarga:** Proceso que tiene lugar cuando se continúa cargando una batería, después de que se pierde la eficiencia de las reacciones electroquímicas al carga [2].
- **Densidad de Energía:** Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l) [2].
- **Densidad de Potencia:** Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l) [2].
- **Energía Específica:** Energía que puede almacenar una batería por unidad de peso (Wh/kg) [2].
- **Potencia Específica:** Potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg) [2].
- **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 [2].
- **Eficacia (%)**: Es la fracción de energía eléctrica que devuelve la batería, en proporción a la energía que ha sido necesaria para cargarla. Cuanto más alta, mayor será su rendimiento, idealmente el 100%. También es importante que una batería mantenga su eficacia en función del tiempo de almacenamiento [4].

- **Tiempo de recarga normal (h):** Es el tiempo necesario para recargar completamente la batería [2].
- **Tiempo de recarga rápida:** 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 la que su tiempo de carga ronda los 60 minutos o menos [2].
- **Curvas de carga y descarga:** Gráfica utilizada para definir el funcionamiento y prestaciones de una batería.

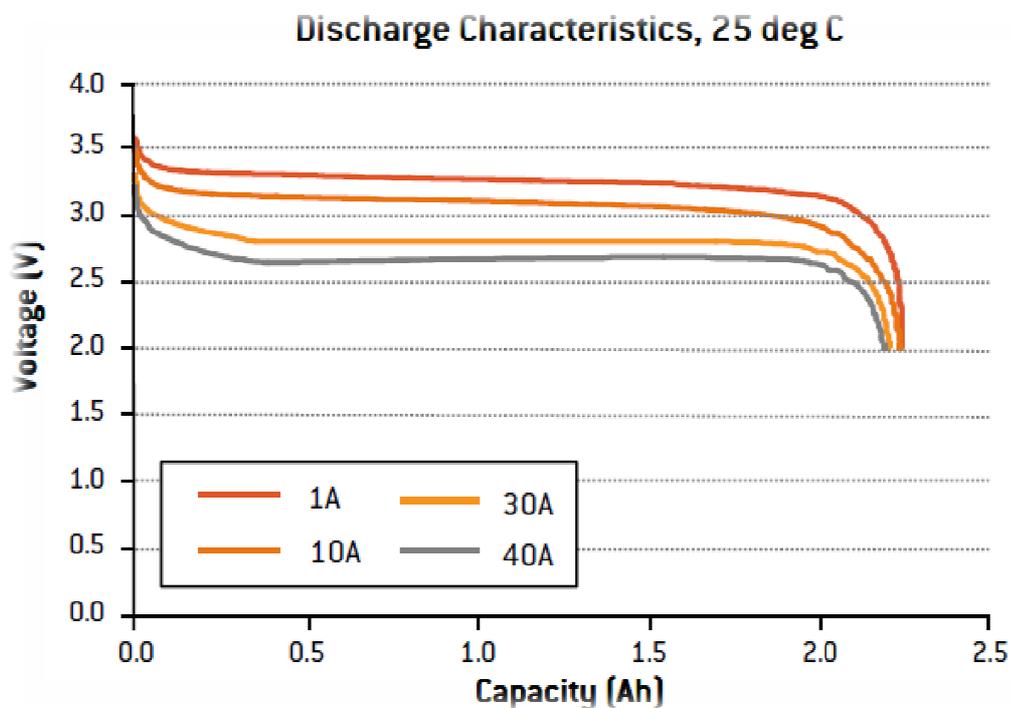


Figura 1. Curva de descarga, de la celda 26650 de A123 System [13]

- **Delta Peak:** Sistema utilizado para la carga de 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.

Cuando las baterías se acercan a su plena carga, su voltaje aumenta bruscamente aumentando también sus picos de tensión, los cuales son detectados por el cargador, quien finalizará la carga.

- **Descargas anormales:** Son aquella que se separa al menos un 10% de la normal teórica estimada para su curva de descarga (subjativa a cada fabricante) [2].
- **Potencia máxima de un elemento(en tecnología de litio):** Aquella en la que el elemento es capaz de entregarnos al menos un 80% de su capacidad nominal, antes de bajar de 3V y no superar 50° en su superficie, en el menor tiempo posible (subjetivo a cada fabricante) [2].
- **Coste (€/kWh):** el coste de la batería por unidad de energía almacenada, esencial para aplicaciones económicas. Para un acumulador de plomo típico es del orden de 350 €/kWh. En comparación, el coste medio de electricidad en Europa es alrededor de 10 céntimos de €/kWh [4].
- **Toxicidad:** No es fácil de cuantificar, pero es de vital importancia debido a que muchas tecnologías utilizan productos muy contaminantes. Es por ello que las nuevas tecnologías desechan el uso de metales como el mercurio que ha causado importantes incidentes medioambientales [4].



Figura 2. Elementos altamente contaminantes [4]

1.4. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.

Las baterías de plomo son un tipo de baterías comunes en vehículos convencionales, no híbridos. Suelen ser de 6 y 12v y están constituidas internamente por celdas de 2v. 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 ideales para el arranque de motores de combustión. Su forma más conocida es la batería de automóvil. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior una serie de placas de plomo dispuestas alternadamente.

1.4.1. Características funcionales de las baterías de plomo-ácido.

Las principales características funcionales de las baterías de plomo-ácido se pueden analizar considerando las ventajas y las desventajas que presenta esta tecnología.

Ventajas:

- Tecnología totalmente establecida.
- Alta tensión por celda (2 V/celda) lo que permite obtener baterías de mayor tensión con un número menor de celdas conectadas en serie.
- Excelente capacidad para suministrar picos de corriente altos durante la descarga.
- Su tasa de auto-descarga mensual es de las más bajas, aproximadamente un 5%.
- Alta eficiencia, por encima del 80 por ciento.
- Facilidad de reciclado.

Desventajas:

- Elevado peso debido a la utilización de plomo como material activo.
- Baja energía específica menor a un 30-50 Wh/kg. Se usa para cubrir las necesidades de arranque, iluminación e ignición, ya que no son lo suficientemente grandes como para mover un vehículo.
- Corta vida cíclica (500 ó 600 ciclos de carga-descarga).
- No aceptan carga rápida, por lo que se necesitan largos periodos de tiempo para la recarga.
- Baja resistencia ante sobrecargas y descargas accidentales.
- Se ven afectadas seriamente por la corrosión de sus electrodos.
- Necesidad de mantenimiento periódico.

Las investigaciones actuales sobre estas baterías, están dirigidas fundamentalmente a lograr una mejora de sus prestaciones en cuanto a reducción de la necesidad de mantenimiento, aumento de la vida útil, disminución del volumen, peso y reducción del tiempo de recarga.

En este sentido, las baterías de plomo-ácido de válvula regulada ya son una realidad y abarcan una parte significativa de las aplicaciones donde se emplean baterías de plomo-ácido [1][6][7].

1.4.2. Baterías de plomo-ácido de válvula regulada.

Las baterías de plomo-ácido de válvula regulada, conocidas por sus siglas en inglés como VRLA (*Valve-Regulated Lead Acid*) representan un avance dentro de la tecnología de plomo-ácido.

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 batería se le denomina “batería libre de mantenimiento” o “batería de recombinación de gases”. También se emplea el término “batería de plomo-ácido sellada” porque para conseguir la recombinación de los gases en el interior de la batería, el contenedor debe estar completamente cerrado y solo permitir el intercambio con el exterior a través de una válvula que abre cuando la presión interior excede determinados límites.

Las reacciones electroquímicas que se producen durante la sobrecarga en una batería de plomo-ácido de válvula regulada, se basan fundamentalmente en el principio de la recombinación.

Este tipo de baterías permite su uso en diferentes posiciones así como en lugares cerrados, ya que durante su funcionamiento normal no se producen fugas de líquidos o gases corrosivos que puedan afectar al resto de dispositivos que se encuentran en su entorno.

Por todo lo expuesto, este tipo de baterías ha propiciado nuevas expectativas en cuanto a la utilización de baterías de plomo-ácido dentro del mercado actual, ampliando los horizontes de aplicación y brindando mejores prestaciones.

En cuanto a la reducción del tiempo de recarga, la aplicación de carga rápida presenta serias dificultades, ya que la velocidad del proceso de recombinación no garantiza la reducción del gas que se produce de forma temprana en el interior de la batería. En estos casos se fuerza la apertura de la válvula de seguridad y el exceso de gas se expulsa al exterior con la consiguiente pérdida de electrolito.

Las razones fundamentales que mantienen a esta tecnología como una de las más empleadas, son su coste extremadamente bajo con respecto al resto de tecnologías y un proceso de reciclado fácil una vez que termina su vida útil.

1.5. BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO.

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 está agotada, para su reutilización.

Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, por lo que poseen una capacidad media. Admiten sobrecargas, además de poder seguir siendo cargadas cuando ya no admiten más carga (aunque no se almacene).

En la proximidad al estado de plena carga, se produce un aumento súbito de la tensión de la batería, provocada por un incremento de su resistencia interna, este efecto es conocido como “delta peak” y es utilizado por el cargador para evaluar el final de la carga.

1.5.1. Características funcionales de las baterías de níquel-cadmio.

Desde el punto de vista funcional, las baterías de níquel-cadmio superan en sus prestaciones a la tecnología de plomo-ácido (tanto abiertas como de válvula regulada) [1][6][7].

Ventajas:

- Tecnología muy establecida.
- Buen comportamiento en un amplio margen de temperaturas ($-40^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C}$).
- Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacenan.
- Vida cíclica larga (superior a los 1.500 ciclos, de dos a tres veces lo alcanzado por la tecnología de plomo-ácido).
- Gran robustez ante abusos eléctricos y mecánicos.
- Gran fiabilidad, no fallan de forma repentina como las baterías de plomo-ácido.

A pesar de las ventajas de esta tecnología de batería existen inconvenientes que han frenado su uso más generalizado.

Desventajas:

- Precio elevado, en comparación con las baterías de plomo-ácido (por encima de los 300 €/kWh).
 - Dentro de los componentes utilizados en la fabricación de estas baterías se encuentra el cadmio, elemento altamente contaminante y que obliga a aumentar la eficiencia en el reciclado de estas baterías, una vez que quedan fuera de servicio. En la actualidad existen técnicas para el reciclado total de este tipo de baterías y los esfuerzos encaminados en este sentido están apoyados de forma conjunta por los gobiernos y los grandes fabricantes de baterías.
 - Actualmente ya no se fabrican en muchos de los países desarrollados.
 - Autodescarga de un 10% mensual.
 - La tensión nominal es de 1,2 V/celda, un valor bastante bajo por celda, lo que requiere la conexión en serie de un mayor número de celdas para alcanzar una determinada tensión.
 - Efecto memoria muy alto.
 - Sufren envejecimiento prematuro con el calor.

1.6. BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO.

El hidruro metálico de níquel (NiMH) se introdujo comercialmente en la última década del siglo XX. Tiene un rendimiento similar al de la batería de NiCd, siendo la principal diferencia que en la batería de NiMH utiliza un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico, que las hacen libre de cadmio, lo que conlleva una ventaja considerable.

Estas ventajas se centran básicamente en un aumento de la capacidad, una disminución del peso y un menor efecto memoria.

1.6.1. Características funcionales de las baterías de níquel-hidruro metálico.

La tecnología de níquel-hidruro metálico tiene características eléctricas similares a la tecnología de níquel-cadmio. La tensión nominal por celda es 1,2V y las curvas de carga y descarga son bastante parecidas. Al igual que en las baterías de NiCd es el efecto “delta peak” el utilizado para marcar el fin de carga en las baterías.

Ventajas:

- Una mayor densidad energética y mayor energía específica, que el NiCd.
- Tecnología libre de cadmio (menos contaminante).
- Pueden ser cargadas con un cargador convencional.
- Seguras.
- Fácil manejo comparado con la tecnología del litio.

Aunque se han conseguido avances importantes con la tecnología de níquel-hidruro metálico estas baterías presentan ciertas desventajas que han limitado su uso:

Desventajas:

- Alta razón de autodescarga, entre un 15 a un 20% por mes.
- Menor fiabilidad que las baterías Ni-Cd,
- No soportan fuertes descargas.
- Voltaje bajo de 1,2V por celda.
- Vida media de aproximadamente 300-500 ciclos de carga (en función del fabricante)
- Tiempos de carga superiores al Ni-Cd.

1.7. BATERÍAS LITIO.

Durante muchos años la batería de níquel-cadmio fue la única opción para aplicaciones portátiles como teléfonos móviles, ordenadores, aeromodelos, etc. En 1990 aparecieron las baterías de níquel-metal-hidruro e ion-litio, ofreciendo mayores capacidades y menores pesos. Ambas tecnologías reclaman su superioridad sobre la otra, pero últimamente se ha hecho patente que las baterías de Ion-Litio han ganado la carrera.

Los primeros trabajos para crear una batería de litio se desarrollaron en el año 1912 por G.N. Lewis, pero no fue hasta los años 70 cuando la primera batería de litio apareció comercialmente.

Hay que recordar que el litio (**Li**) es el metal más ligero que existe, ya que al tener únicamente tres protones, su peso atómico es muy bajo. Permitiendo un gran potencial químico para crear baterías de gran capacidad con poco peso [8].

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110								
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une	Uun								
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Figura 3. Tabla periódica [8]

Los primeros intentos de crear una batería de Litio metálico fallaron debido a problemas de seguridad, por la inherente inestabilidad química del Litio, especialmente durante su carga. Los investigadores decidieron utilizar una forma química del Litio que no fuera metálico para mejorar la seguridad en aquellas baterías.

En 1991 la compañía Sony comercializó la primera batería de Ion-Litio y después otros fabricantes le siguieron.

1.7.1. Características generales de las baterías de litio.

La densidad de energía de una batería de la familia del litio es aproximadamente más del doble que en una batería de níquel-Cadmio. Los investigadores aseguran que la batería de litio puede alcanzar un potencial muy superior al actual.

El voltaje de una celda de la familia de litio oscila entre los 3.3 a 3.7 Voltios, lo que permite diseñar baterías de una única celda que se utilizan especialmente en teléfonos o aeromodelos de vuelo indoor. Recordemos que para alcanzar un voltaje similar con una batería de níquel-Cadmio sería necesario utilizar tres células conectadas en serie.

Las baterías de la familia del litio no requieren mantenimiento, cosa que no puede decirse de otras baterías. No tienen efecto memoria y no es necesario realizar un reciclado cada cierto número de cargas. Además, el ratio de autodescarga de una

batería almacenada es menos de la mitad de otros tipos de batería.

Pero también hay que tener en cuenta que su estructura es frágil y requieren de un circuito de seguridad. Se hace necesario un circuito que limita el voltaje máximo que puede alcanzar cada célula durante la carga, y también limitar el voltaje mínimo de cada célula durante la descarga. Aproximadamente el factor de carga de una batería es de 1C o 2C.

El envejecimiento de las baterías de Litio es un tema que los fabricantes suelen ocultar, pues las capacidades químicas de una batería se degradan notablemente en un periodo de un año. Esta degradación química ocurre tanto si se utiliza la batería o no.

Los fabricantes están constantemente mejorando las baterías de Litio, lo que abre un futuro prometedor ante este problema de la degradación química.

A continuación se van a citar las ventajas e inconvenientes generales de las baterías que basan su química en el litio [1][6][7].



Figura 4. Celdas de polímero de litio

Ventajas:

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

Desventajas:

- Requiere un circuito de seguridad para mantener los límites de voltaje máximo y mínimo por celda.
- Almacenar en lugar frío al 40% de su carga.
- Baja capacidad de descarga en las baterías de iones de litio.
- Limitaciones en su transporte aéreo.
- Precio superior a otras baterías.

1.7.2. Características funcionales del polímero de Litio (LiPo).

La batería de polímero de litio también conocida como lipo, se diferencia del resto de las baterías por el electrolito usado. El diseño original data de los años 70 usando un polímero sólido como electrolito. Este electrolito se ensamblaba en un recipiente plástico que no conducía la electricidad, y que impedía el paso de electrones [30].

El polímero sólido ofrece ventajas de fabricación, permitiendo alcanzar grosores de 1 milímetro, lo que permite crear baterías con el espesor de una tarjeta de crédito.

Desafortunadamente el polímero sólido sufre de baja conductividad debido a la alta resistencia interna, por lo que no puede ofrecer la suficiente capacidad de descarga, además de aumentar su temperatura hasta cerca de 60 grados, lo que la hace inviable para ciertas aplicaciones. Para solucionar este problema se añadió un gel al electrolito [30].

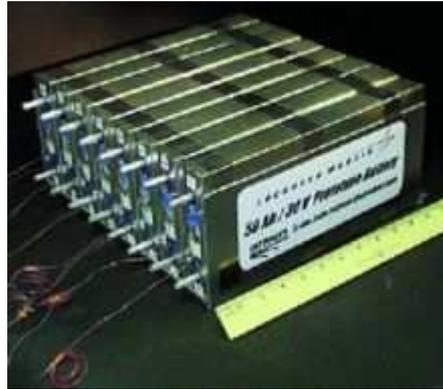


Figura 5. Batería de polímero de litio diseñada por la nasa [30]

Las celdas de polímero de litio, utilizan una bolsa flexible de aluminio en lugar de fundas rígidas, esto conlleva un ahorro considerable en el peso y el tamaño que demanda cada celda, un 20% más ligero que el equivalente en pilas cilíndricas. Estas baterías pueden también impulsar la próxima generación de vehículos eléctricos de baterías. El coste de un coche eléctrico de este tipo es prohibitivo, pero los defensores argumentan que con el aumento de la producción, el costo de las baterías de Li-Po bajará [12].

Ventajas [7][12]:

- Pueden reducirse hasta grosores de 1 milímetro.
- Pueden empaquetarse de múltiples formas.
- Alta densidad de energía.
- Poco peso.
- No necesitan mantenimiento.
- Sin efecto memoria.
- Bajo porcentaje de autodescarga.

Desventajas [7][12]:

- Requiere un circuito de seguridad para mantener los límites de voltaje.
- Almacenar en lugar frío al 40% de su carga.
- Limitaciones en su transporte (compañías aéreas).
- Tecnología en desarrollo.
- Pueden explotar si se perfora.

1.7.3. Características funcionales del Ion de Litio (con cátodo de LiCoO_2).

Las baterías de litio-ion con cátodo de LiCoO_2 , son 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, sin efecto memoria y una lenta pérdida de la carga cuando no están en uso.

Más allá de la electrónica de consumo, están creciendo en popularidad para usos militares, vehículos aeroespaciales y distintas aplicaciones debido a su alta densidad energética [9].

Las investigaciones están introduciendo mejoras en la densidad energética, durabilidad, costo y seguridad de estas baterías.



Figura 6. Batería de ion de litio de un ordenador portátil [9]

Esta tipo de baterías poseen la mayor “densidad energética” y “energía específica” del mercado, por el contrario poseen una de las capacidades de descarga más bajas, razón por la cual suelen encontrarse en la mayoría de los aparatos electrónicos que no exigen bruscas descargas de corriente, como es el caso de portátiles, móviles etc.

Ventajas [6][7][9]:

- Batería con la mayor densidad energética del mercado.
- Batería con la mayor energía específica del mercado.
- Alta tensión por celda 3.6-3.7v
- No posee efecto memoria.
- Tasas de autodescarga inferior al 10%.
- No está fabricada con productos tóxicos.

Desventajas [6][7][9]:

- Problemas de ecualización y necesidad de circuitos electrónicos adicionales.

- Las altas temperaturas son bastante perjudiciales para su ciclo de vida.
- Sufren el efecto de pasivación.
- Capacidad de descarga muy pequeña [6][7][9].

1.7.4. Características funcionales del ion de litio con cátodo de LiFePO_4 .

Las baterías de ion de litio con cátodo de LiFePO_4 , son una variación de las baterías de ion de litio con cátodo de LiCoO_2 . Son normalmente conocidas por las siglas "LIFE".

El fosfato de hierro litio (LiFePO_4), posee un bajo costo, no es tóxico, tiene una alta abundancia de hierro, una excelente estabilidad térmica, buenas características de seguridad y un rendimiento electroquímico bueno.

La mejora de su conductividad respecto al ion de litio con ánodo LiCoO_2 se debe a la presencia de nanotubos de carbono.

Este tipo de baterías son utilizadas en productos industriales por grandes empresas como:

Black and Decker 's, DeWalt, General Motors, Chevrolet Volt, Daimler, Cessna and BAE Systems, etc.

Una ventaja clave sobre las baterías de ion de litio es su mejor estabilidad química y térmica, la cual ofrece mejores características de seguridad que el resto de baterías de litio.

Comparando el fosfato de hierro litio, con su antecesor de mayor capacidad el ion de litio, se aprecia que a partir del año la densidad energética en una batería de LiCoO_2 será aproximadamente la misma que una de LiFePO_4 . Después de dos años la densidad energética de batería LiCoO_2 será inferior a una de LiFePO_4 . Esto es debido, a una mayor vida útil por parte de LiFePO_4 .

Una de las principales ventajas de LiFePO_4 en comparación con LiCoO_2 es mayor capacidad de descarga.

La química del fosfato de hierro litio ofrece el ciclo de vida más largo de las baterías existentes en el mercado actual [10][11].

Ventajas [10][11]:

- Alta alta tensión en circuito abierto, 3,3v
- LiFePO_4 es un cátodo de material intrínsecamente más seguro que LiCoO_2 .
- No posee efecto memoria.
- No está fabricada con productos tóxicos.
- Es la batería perteneciente a la familia del litio que mejor tolera las altas temperaturas.
- Supera los 2000 ciclos de vida.
- Vida superior a los 10 años.
- Tiempo de carga entre 15- 30 minutos.
- Buena capacidad para soporta sobrecarga
- Buena energía específica y densidad energética.
- Buena potencia específica.

Desventajas [10][11]:

- Problemas de eualización y necesidad de circuitos electrónicos adicionales (menor tendencia al desequilibrio que el polímero de litio).
- La densidad energética en una batería LiFePO_4 , es sensiblemente inferior su antecesora el ion de litio cátodo de LiCoO_2 , aproximadamente en un 14%.
- Sufren el efecto de pasivación.

1.8. COMPARACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE BATERÍAS.

A continuación se muestran las principales características que definen una batería. Estas características serán las que determinen que tipo de baterías es más adecuada en función de su uso. Recordar que este proyecto nace de la necesidad de buscar documentación para ampliar el conocimiento sobre las baterías actuales en el mercado. En concreto para su aplicación en una moto de competición eléctrica.



Tecnología	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ión [LiCoO ₂]	LiFe	LI-PO
Parámetros						
Voltaje (V/celda)	2v	1.2v	1.2v	3.6/3.7v	3.3v	3.7v
Autodescarga (%/mes)	3%-20%	10%	30%	8%	-	5%
Descarga en continua		10c	8c	1c	26c	20-45c
Descarga por picos	-	-	-	-	52c	30-90c
Mantenimiento	Bueno	Malo	Regular	Fácil	Bueno	Fácil
Ciclos de vida	500-800	1500-2000	300-500	400-1200	2000	>1000
Densidad energética [wh/l]	60-75	50-150	140-300	250-360	220	300
Energía específica [Wh/kg]	30-40	40-60	30-80	100-250	90-110	130-200
Potencia específica [W/Kg]	180	150	250-1000	250-340	3000	7100
Corriente carga rápida [C]	0.4	1- 2	1-2	1	4	1-2
Eficiencia. Carg/Desca	50%-92	70%-90%	66%	80%-90%	-	99.8%
Tolerancia a sobrecargas	-	M. buena	Media	M. mala	Mala	M. mala
Robustez a impactos	Buena	M. buena	Buena	M. mala	Media	M. mala
Altas temperaturas	Media	M. buena	Media	M. mala	Mala	M. Mala
Problemas de eualización	No	No	No	Si	Si	Si
Seguridad	M. buena	M. buena	M. buena	M. buena	M.buena	Buena
Formato	-	Cilíndrico	Cilíndrico	Prisma	Pris/Cilin	Prisma

Tabla 1. Comparativa de diferentes tipos de baterías [1][6][7][9][10][11][12][13][14]

1.8.1. Principales características.

- 1) Tensión por celda.
- 2) Tasa de auto-descarga.
- 3) Capacidad de descarga de forma continuada.
- 4) Capacidad de descarga por picos.
- 5) Seguridad.
- 6) Eficiencia.
- 7) Mantenimiento.
- 8) Vida cíclica.
- 9) Densidad energética (volumen adecuado) [w/l].
- 10) Energía específica (peso adecuado) [w/kg].
- 11) Curva de carga y descarga.
- 12) Porcentualmente un menor voltaje máximo, respecto a su voltaje nominal.
- 13) Carga rápida.
- 14) Resistencia ante sobrecargas o sobre descargas accidentales.
- 15) Robustez y fiabilidad.
- 16) Tolerancia a altas o bajas temperaturas.
- 17) Problemas de equalización.

1.8.2. Análisis de los parámetros principales.

Se va a comparar cada uno de estos parámetros o característica entre los principales tipos de baterías, presentes hoy en día:

1) Tensión por celda.

La tensión por celda es uno de los parámetros más importantes a la hora de decantarse por un tipo de química, una tensión más alta por celda permitirá conseguir voltajes más elevados con un menor número de celdas.

La química dominante en esta característica es la del litio, que maneja valores desde 3.3v a 3.7v.

En el NiMH y NiCd el voltaje nominal por celda únicamente alcanza 1.2v, por lo que se necesitaría más de tres celdas en serie para alcanzar un valor similar a una celda de polímero de litio.

En el caso del plomo. El voltaje nominal por celda es de 2v. Este voltaje sigue siendo notablemente inferior al proporcionado por las celdas de litio [1][6][7][9][10][11][12].

2) Tasa de auto-descarga.

Como se muestra en la tabla anterior, la tasa más baja de auto descarga pertenece al litio, en concreto al polímero de litio con un valor que ronda el 5%, le sigue el ion de litio y el NiCd con un 10%, a continuación el plomo tomando su peor porcentaje de auto descarga con un 20% y en último lugar NiMH con un 30% [1][6][7][9][10][11][12].

3) Capacidad de descarga en continua.

La capacidad de descarga es uno de los puntos más fuertes del polímero de litio y de LiFePO_4 .

Como se muestra en la tabla anterior, el valor más alto lo entrega el polímero de litio con valores que rondan los 45 C's, seguido del LiFePO_4 con 26 C's de descarga en continua, el resto de tecnologías tienen valores muy inferiores a estos tal y como se muestra en la tabla. Esta junto con otra característica, es una de las mayores aportaciones al mundo de las baterías que ha proporcionado la tecnología del litio.

A de mencionarse que la tecnología con menos descarga de todas corresponde a las baterías de iones de litio, esto es debido a que su diseño, el cual está enfocado a equipos electrónicos en los que priman la autonomía y no necesitan soportar grandes demandas de corriente, como ocurre en los casos de herramientas o vehículos eléctricos.

El plomo posee una buena capacidad de descarga, pero es incapaz de proporcionarla de manera constante durante algo más que un breve periodo de tiempo [1][6][7][9][10][11][12].

4) Capacidad de descarga por picos.

La descarga por picos solo está presente en el polímero de litio y el LiFePO_4 , los propios fabricantes limitan la capacidad de descarga máxima de las batería a un periodo de tiempo, que ronda los diez milisegundos para garantizar la seguridad y la vida útil de las baterías, proporcionando un mayor rendimiento por parte de la batería durante un pequeño periodo de tiempo.

Pueden llegar a alcanzarse descargas de 90C's en el caso del polímero de litio y de 52C's en el caso de LiFePO_4 [14].

En el resto de tecnologías este parámetro es directamente inexistente.

Queda patente el salto tecnológico existente entre 90C's que puede llegar a dar una celda de polímero de litio durante 10 ms frente a las 8C's que puede dar el NiMH o los poco más de 10C's del NiCd en continua, sin posibilidad de proporcionar una corriente de pico [1][6][7][9][10][11][12][13].

5) Seguridad.

En tema de seguridad la tecnología del litio es la más peligrosa, pudiendo llegar a ser explosiva si se ve sometida a una sobrecarga, cortocircuito o al ser atravesada por un elemento punzante.

Los fabricantes cada vez ofrecen baterías más seguras, pero estas siguen siendo en comparación con el resto de tecnologías, las baterías menos seguras del mercado [1][6][7][9][10][11][12].

6) Eficiencia.

En el parámetro de eficiencia energética la tecnología del litio es claramente la vencedora, pues sus porcentajes de eficiencia superan el 90% en el peor de los casos, mientras que en otras tecnologías como el NiMH, NiCd y el plomo, sus porcentajes rondan un rango de valores entre el 66 y 90% en el mejor de los casos [1][6][7][9][10][11][12].

7) Mantenimiento.

Este es otro punto a favor de la tecnología del litio, pues no necesita ningún mantenimiento periódico como ocurre en el caso del NiMH, NiCd y acumulador de plomo.

En el caso del NiMH y del NiCd es necesario realizar varios ciclos completos de carga y descarga, para eliminar el efecto memoria que se producen en este tipo de químicas, especialmente en el caso del NiCd.

En el caso de Pb es necesario rellenar con agua destilada el electrolito evaporado, para poder permitir una recarga óptima por parte del alternador [1][6][7][9][10][11][12].

8) Vida cíclica.

En este caso es el LiFePO₄ supera al resto de tecnologías con una gran diferencia. Según la compañía A123, sus baterías de LiFePO₄ están preparadas para superar los 10.000 ciclos de carga manteniendo tras ellos el 80% de su capacidad inicial, ninguna otra tecnología se aproxima a estos valores. El resto de fabricantes de LiFePO₄ garantizan un mínimo de 2000 ciclos de vida.

Después del LiFePO₄ nos encontramos con el NiCd con capacidad para más de 1500 ciclos de vida, seguida del polímero de litio con más 1000 ciclos, en la parte más baja de la tabla aparece el Pb con 800 ciclos y el NiMH con 500 ciclos en último lugar [1][6][7][9][10][11][12][13].

9) Densidad energética [w/l].

Como se puede ver en la tabla es el ion de litio la tecnología que posee la mejor densidad energética de todas las tecnologías con 360 Wh/l, seguida del polímero de litio y LiFePO₄, el resto de químicas está bastante atrás en este aspecto [1][6][7][9][10][11][13].

10) Energía específica [w/kg].

Al igual que en el apartado anterior, el ion de litio es la química a destacar, seguida del polímero de litio y del ion de litio con cátodo de LiFePO_4 , el resto de químicas también están muy atrás [1][6][7][9][10][11][12].

11) Curva de carga y descarga.

Las mejores curvas de descarga son entregadas por el polímero de litio y por LiFePO_4 , sus curvas apenas poseen pendientes y su funcionamiento es prácticamente lineal durante todo su uso.

El resto de químicas a medida que van agotando su capacidad, van disminuyendo su voltaje de manera progresiva, reduciendo así la potencia entregada, lo que supone una disminución de las prestaciones a medida que la batería se va agotando [1][6][7][9][10][11][12][13][14].

12) Porcentualmente menor voltaje máximo, respecto a su voltaje nominal.

Las baterías con tecnología basada en el litio, poseen una menor diferencia entre voltaje nominal y voltaje máximo. Esto es beneficioso, pues no obliga al sistema electrónico a trabajar con valores de tensiones máximos tan altos.

Por lo tanto cuanto menor sea la diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje nominal, menor voltaje máximo tendrán que soportar los elementos electrónicos.

Se van a comparar la suma de celdas de polímero de litio y de NiMH hasta conseguir un voltaje de 60 voltios.

Atendiendo a sus voltajes nominales y voltajes máximos, se compara cuanto voltaje extra tendrá que soportar un equipo electrónico con distintas tecnologías, preparado para funcionar a un voltaje nominal de 60v con ambas tecnologías [1][6][7][9][10][11][12].

(El voltaje máximo irá cayendo hasta que cada batería descienda a su voltaje nominal, en un periodo breve de tiempo).

	V. NOMINAL	V. MAXIMO
NiMH	$50 \times 1,2 = 60 \text{ v}$	$50 \times 1,6 = 80\text{v}$
LIPO	$16 \times 3,7 = 59.2\text{v}$	$16 \times 4.2 = 67,2\text{v}$

Tecnología	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ión	LiFePO ₄	LI-PO
Voltajes						
Voltaje Nominal [v]	2	1.2	1.2	3.6/3.7	3.3	3.7
Voltaje mínimo [v]	1.75	0.85	0.85	2.5	2	3
Voltaje máximo [v]	2.46	1.6	1.6	4.1	3.6	4.23

Tabla 2. Voltajes máximos, mínimos y nominales [1][6][7][9][10][11][12][13][14]

13) Carga rápida.

La química con el tiempo de carga más rápido, corresponde a LiFePO₄, pudiendo ser cargada en 15 min (4C's), la siguiente más rápida corresponde al polímero de litio, con un tiempo de carga de 30 min (2C's). El resto de tecnologías está muy por detrás en carga rápida.

El NiCd y el NiMH pueden llegar a ser cargadas en un tiempo mínimo de 30 min, pero provocando una notable reducción en la vida útil de la celda, una sobrecarga química y un aumento de la temperatura y la presión. Todo esto se traduce en una reducción de la vida útil de dichas celdas [1][6][7][9][10][11][12].

14) Resistencia ante sobrecargas o cortocircuitos.

La tecnología con mayor capacidad para soportar sobrecargas y cortocircuitos, es la tecnología del NiCd, es tal su capacidad para soportar descargas en profundidad que puede llegar a invertir su polaridad, sin reducir la vida útil de la batería.

Muy diferente es el caso de las baterías de litio, que si bajan su voltaje por debajo del valor mínimo establecido por celda, pueden con una única descarga acabar con la vida de la batería o reducir notablemente sus prestaciones [1][6][7][9][10][11][12].

15) Robustez y fiabilidad.

Para estas características la tecnología más competente es el NiCd como en el caso anterior. Poseen una gran robustez a los abusos mecánicos, seguida de los acumuladores de Pb, el NiMH y en último lugar la tecnología del litio. Dentro de la tecnología del litio las celdas de LiFePO_4 son las más robustas y fiables [1][6][7][9][10][11][12][14].

16) Tolerancia a altas y bajas temperaturas.

Una vez más en los casos que se refieren a fiabilidad y seguridad, la tecnología del NiCd es la mejor, pudiendo trabajar en un rango de temperaturas de -20 a 50 °C, y en casos más extremos entre -20 y 70 °C [1][6][7][9][10][11][12].

17) Problemas de ecualización.

Todas las tecnologías poseen problemas de ecualización entre sus celdas, este problema es solventado manteniendo el voltaje de carga durante más tiempo, hasta que las celdas más rezagadas se cargan por completo, mientras las celdas ya cargadas, transforman el exceso de carga en calor o en un aumento de la presión en el interior de las celdas. Este método de carga no ofrece problemas para las tecnologías como el NiMH, NiCd, Pb.

A diferencia de estas tecnologías, las baterías que pertenecen a la familia del litio, una vez que alcanzan su voltaje máximo, no pueden seguir siendo cargadas, pues sino acabarían provocando un daño en la propia batería.

La tecnología del litio es la única que tiene problemas con la ecualización de sus celdas, y requieren de un dispositivo electrónico que compense esos desequilibrios. Por lo tanto es la única tecnología que requiere obligatoriamente este tipo de atención para su uso [1][6][7][9][10][11][12].

1.8.3. Conclusiones.

Tras comparar todas las características se obtienen las siguientes conclusiones:

Polímero de litio:

El polímero de litio es el que mejores prestaciones aporta a vehículos eléctricos de competición, pues proporciona el mayor voltaje por celda, junto a la mayor capacidad de descarga.

A continuación se citan las mejores características del polímero de litio:

- *Mayor voltaje por celda.*
- *Mayor capacidad de descarga.*
- *Gran densidad energética.*
- *Gran energía específica.*
- *Una de las mejores capacidades de carga.*
- *Carga rápida y gran número de ciclos de vida.*
- *Muy económicas.*

Por contra son las baterías más delicadas, además de necesitar un sistema de equalización para su funcionamiento, pudiendo llegar a ser inseguras [1][6][7][9][10][11][12].

LiFePO₄

Si el objetivo es buscar buenas prestaciones, destinadas tanto a herramientas como a vehículos eléctricos, pero dando prioridad a la seguridad al rendimiento y sobre todo durabilidad el tipo de química a destacar es el LiFePO₄ [1][6][7][9][10][11][12].

Ion de litio

Posee los valores más altos en energía específica y densidad energética, lo que la hace la mejor opción a la hora de proporcionar autonomía a los dispositivos. Su punto débil es su escasa capacidad de descarga, por lo tanto inadecuada por el momento para su uso en vehículos eléctricos [1][6][7][9][10][11][12].

NiMH

Es el punto intermedio entre la moderna tecnología del litio y las tecnologías más antiguas como el Pb y el NiCd. Posee una energía específica y densidad energética aceptable, y una seguridad superior a cualquier tecnología de Litio, aunque el resto de sus características son bastante mediocres [1][6][7][9][10][11][12].

NiCd

Aunque la mayoría de sus características están por debajo del resto de químicas, es la tecnología que mayor durabilidad ofrece ante abusos físicos y electrónicos, también es la que mejor soporta sobrecargas y cortocircuitos, además de poder trabajar en un amplio rango de temperaturas con un gran número de ciclos de vida, por lo que se puede decir que es la más “resistente” [1][6][7][9][10][11][12].

Acumuladores de Plomo

A pesar de las mejoras importantes que se han venido realizando en esta tecnología, actualmente no responden a las exigencias de funcionamiento requeridas para vehículos eléctricos, debido a su baja densidad energética y energía específica. Su mantenimiento en el mercado actual, está avalado fundamentalmente por su precio bajo y por la gran infraestructura que se ha desarrollado para esta tecnología a lo largo de los años. Esta es la principal justificación de que se sigan utilizando en la actualidad [1][6][7][9][10][11][12].



2. BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)

2. BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM).

2.1. INTRODUCCIÓN.

Este sistema, es comúnmente conocido como BMS (de las siglas en inglés *Battery Management System*). Un BMS es cualquier dispositivo electrónico que gestiona una batería o celda recargable. Se hace especialmente importante en baterías formadas por un elevado número de células, e indispensable en baterías de litio.

Hay tres objetivos principales y comunes a todos los Sistemas de Gestión de la batería (BMS) [16].

- Proteger las celdas o pack de batería de daños.
- Prolongar la vida de la batería.
- Mantener la batería en un estado en el que pueda cumplir, con los requisitos para la que se ha especificado.

2.2. PROTECCIÓN DE CELDAS.

El funcionamiento de una batería, fuera de sus límites de diseño especificados, conducirá inevitablemente al fracaso de la batería. Aparte de las molestias y el costo de reemplazar la batería, pudiendo llegar a ser prohibitivo.

Esto es particularmente importante en baterías de alto voltaje y alta potencia en automóviles, que deben operar en ambientes hostiles y al mismo tiempo son objeto de abusos por parte del usuario.

Los métodos de protección de baterías varían según que celdas se usen y el tipo de química correspondiente a esas celdas. Esto hará variar los parámetros con los que se traten [16]. La protección de las celdas debe abordar los siguientes parámetros y condiciones:

- Exceso de corriente durante la carga o descarga.
- Cortocircuito.
- Sobrepasar valores máximos de tensión durante la carga.
- Sobrepasar valores mínimos de tensión durante la descarga (DOD).
- Temperatura ambiente alta.
- Temperatura ambiente baja.
- Sobrecalentamiento.
- La acumulación de presión dentro de la célula
- Sistema de aislamiento en el caso de un accidente

2.2.1. Protección en temperatura.

La protección de temperatura es una de las partes más importante de un BMS, un exceso de temperatura al igual que un defecto, significará la posibilidad de una muerte prematura a la vez que una progresiva pérdida de sus prestaciones, además de un aumento de su resistencia interna.

Para el análisis y estudio de la temperatura mediante BMS se utilizan termistores. Un termistor es un sensor resistivo de temperatura, cuyo funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. Existen dos tipos de termistor:

- **PTC (Positive Temperature Coefficient)** su resistencia aumenta con el aumento de temperatura.
- **NTC (Negative Temperature Coefficient)** su resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Pueden ser utilizados para:

- Terminar la carga.
- Desconectar la batería del cargador en una condición de exceso de temperatura.
- Para encender los ventiladores.

Los termistores también pueden ser utilizados por el cargador, para determinar las condiciones de partida del medio ambiente y evitar la carga si la temperatura de la batería es demasiado baja o demasiado alta.

Además la mayoría de circuitos de protección incorporan un fusible térmico, que se apagará permanentemente si la batería sobrepasa un límite predeterminado [17].

2.2.2. Protecciones contra cortocircuitos.

La protección contra cortocircuitos debe ser un tema prioritario a la hora de proteger las celdas. Esto es particularmente importante en baterías de alto voltaje, donde un cortocircuito supondría la posibilidad de dañar la batería por completo y la situación de peligro que esto conlleva. Aun más en las nuevas tecnologías, que poseen elevadas capacidades de descarga [17].

Circuitos de protección contra cortocircuitos:

Fusible:

Es un dispositivo, constituido por un soporte adecuado, un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión, que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que se funda, por *Efecto Joule*, cuando la intensidad de corriente se supere por un cortocircuito o un exceso de carga. [18]

Aunque los fusibles convencionales pueden llegar a ser utilizados para proteger la batería de sobrecargas, no son la opción más recomendable, pues no pueden actuar con la suficiente rapidez en caso de un cortocircuito.

Relé:

Es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico, en el que por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos, que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. [19].

Son de bajo costo y pueden trabajar con corrientes altas y proporcionan un buen aislamiento en caso de fallo, pero son demasiado lentos para operar con la adecuada eficacia.

FETS:

Es un transistor de efecto campo, que se basan en el campo eléctrico para controlar la conductividad de un "canal" en un material semiconductor.

Son utilizados normalmente para proporcionar una protección de acción rápida, pero están limitados en su capacidad de carga actual, además de ser muy costosos para aplicaciones de alta potencia [20].

Diodo Zener:

El diodo Zener es un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en las zonas de rupturas. El diodo Zener es la parte esencial de los reguladores de tensión casi constantes con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red, de la resistencia de carga y temperatura [44].

Proporcionan una excelente opción para fijar o limitar la corriente de cada celda de manera individual con un tiempo de actuación bastante alto. A continuación se va plantear una propuesta para cubrir esta problemática. El esquema eléctrico resultante sería el siguiente:

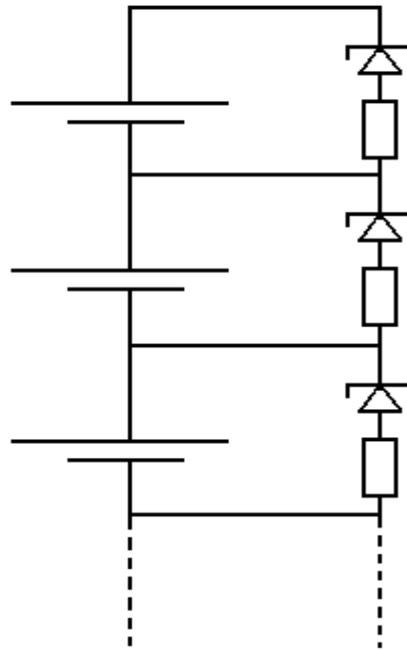


Figura 7. Esquema de conexión de celdas y diodos Zener.

El objetivo es utilizar un diodo Zener con cada una de las celdas que forman el pack de baterías, obteniéndose así un limitador de tensión por celda. Este efecto se debe a las propiedades de funcionamiento del diodo Zener.

En este caso van a ser polarizados en inversa en el momento que aparezca en su cátodo una tensión positiva superior a la especificada por las características del diodo utilizado. Esto significa que el diodo fijará una tensión entre sus nodos igual a la especificada por el valor de polarización inversa del diodo empleado.

Debido a este efecto y sabiendo que la celda se encuentra en paralelo al diodo, la celda deberá tener el mismo voltaje que el elemento que encuentre en paralelo (el diodo).

Así se asegura un valor límite de tensión por celda.

En el caso del polímero de litio en particular, se conoce que el voltaje nominal por celda es de 3.7v y el voltaje máximo por celda que nunca se debe sobrepasar para esta química es 4.2v. Por lo tanto se debe seleccionar un diodo cuya polarización inversa sea lo más cercana posible a 4.2v, pero superando ligeramente este valor para crear un margen de funcionamiento.

Otra característica necesaria para la selección del diodo es conocer su potencia máxima a la hora de disipar energía. Para ello es necesario conocer el voltaje máximo al que se quiere trabajar (V_z) y la intensidad máxima a la que se podría enfrentar (I_z).

$$P_z = V_z \cdot I_z \quad (2.1)$$

Donde:

V_z = Voltaje del diodo Zener (valor similar al voltaje máximo por celda)

I_z = Corriente que pasa por el diodo Zener (se iguala al valor máximo de corriente que puede entregar la batería).

P_z = Potencia del diodo Zener (dato del fabricante)

Además, se debe colocar una resistencia limitadora en serie con el diodo Zener, de no ser así, conduciría de manera descontrolada hasta llegar al punto de su destrucción. Por lo tanto debe calcularse también el valor mínimo de la resistencia limitadora que permite conseguir una corriente en diodo que no supere la corriente máxima (I_{zmax}) tal y como se muestra en la gráfica.

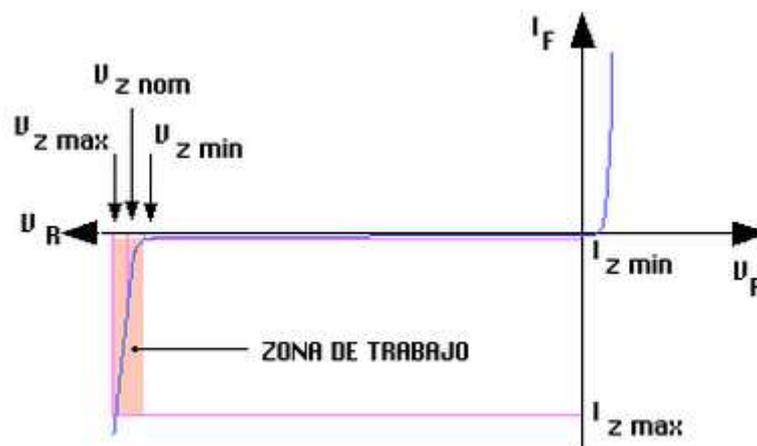


Figura 8. Grafica de funcionamiento de un diodo Zener

Para realizar el cálculo se tomaría la expresión:

$$R_{min} = V_z / I_{zmax} \quad (2.2)$$

Con esta expresión se obtiene el valor de la resistencia mínima que se debe colocar en serie para asegurar que el diodo pueda estar dentro de su zona de trabajo (se considera despreciable la impedancia interna del diodo). Si el valor de la resistencia hallado es alto sería interesante volver a calcular la potencia que necesitaría soportar el diodo.

2.2.3. Aplicaciones con multi-celdas.

Las aplicaciones con multi-celdas resultan más complejas que las aplicación de celda única, por eso se va a tratar de una manera más específica.

En estas aplicaciones, cada celda debe tener su propio dispositivo de detección de exceso de voltaje. Serán necesarios varios sensores de temperatura, ya que el paquete no poseerá una temperatura uniforme en cada una de sus células.

Esta complicación es por desgracia necesaria, en baterías de alta tensión que contienen largas cadenas de celdas. Esto es provocado por celdas individuales que puedan ser agotadas de manera prematura frente al resto y provocar un fallo en el conjunto de la batería [17].

2.2.3.1. Probabilidad de fallo en las cadenas de celdas.

Cuanto mayor es el número de celdas que forman la batería, mayor será la oportunidad de fallar y peor será la fiabilidad del conjunto.

Una batería formada a partir de n celdas, posee una tasa de fallo n veces la tasa de fallo del número de celdas que compone la batería [21].

2.2.4. Gestión de la demanda.

Si bien no están directamente relacionados con el funcionamiento de la propia batería, la gestión de la demanda se centra en reducir al mínimo el consumo de energía de la batería, mediante técnicas de ahorro de energía para así prolongar el tiempo de uso.

Reduciendo la actividad de la batería, cuando el usuario no haga un uso activo de ella.

Esta es una característica especialmente importante en sistemas electrónicos que deben estar en funcionamiento constante y donde una mayor autonomía siempre será un factor positivo (telefonía móvil) [22].

2.2.5. ESTADO DE CARGA (State of charge) (Soc).

La indicación del SOC también se usa para determinar el final de la carga y descarga, el exceso de carga y descarga es la principal causa del fracaso de una batería.

Es una de las funciones más importantes de un BMS. El SOC es necesario no sólo para conocer el tiempo de autonomía, también analiza el estado individual de cada celda para comprobar si se cargan o descarga de manera uniforme, a fin de verificar que las células no realicen esfuerzos excesivos de manera individual.

Muchas aplicaciones requieren un conocimiento del estado de carga de la batería o de las células individuales que forman la batería. Esto puede ser simplemente para proporcionar al usuario una indicación de la capacidad restante en la batería, o podría ser necesaria en un circuito de control para garantizar un control óptimo del proceso de carga.

El SOC es particularmente importante para las baterías de litio. Son las únicas que necesitan obligatoriamente un sistema electrónico de gestión de baterías (BMS) para mantener la batería dentro de un marco de seguridad y garantizar un ciclo de vida largo.

2.2.5.1. CÓMO SE DETERMINA EL SOC.

El SOC es definido normalmente de dos maneras:

- La capacidad disponible, es expresada como un porcentaje de la capacidad que poseía la batería originalmente.
- La capacidad disponible, es expresada como un porcentaje de la capacidad actual.

Aunque habitualmente se suele utilizar la primera opción, es más útil la segunda, pues la capacidad de la batería se reduce gradualmente a medida que esta envejece. Se estima que la capacidad de una batería o celda se reduce hasta el 80% de su capacidad al final de la vida, debido a los efectos de las temperaturas y a las altas tasas de descarga, reduciendo la capacidad efectiva de las celdas [23].

2.2.6. ESTADO DE SALUD (SOH).

El estado de salud es una "medida" que refleja la condición general de una batería, para ofrecer las prestaciones previstas en comparación con una batería nueva. Tiene en cuenta factores como la aceptación de la carga, la resistencia interna, el voltaje y la auto-descarga.

Durante la vida útil de una batería, su rendimiento o "salud" tiende a deteriorarse progresivamente, debido a los irreversibles cambios físicos y químicos que tienen lugar con el uso y con la edad, hasta que finalmente la batería ya no es utilizable.

A diferencia del SOC que se puede determinar mediante la capacidad de la batería, no hay una definición absoluta para el SOH.

Se trata de una medida subjetiva de los diferentes parámetros mensurables del rendimiento de una batería, siendo el SOH una estimación y no una medida [24].

2.2.6.1. CÓMO SE DETERMINA EL SOH.

Cualquier parámetro que cambia de manera significativa con la edad, como la impedancia de células o conductividad, se puede utilizar como base para proporcionar una estimación del SOH de las celdas. Debido a que la indicación del SOH es relativa a la condición de una batería nueva, el sistema de medición debe tener un registro de las condiciones iniciales o por lo menos una serie de condiciones estándar. Las mediciones más aplicadas en SOH, son:

- Número de ciclos de carga.
- Auto-descarga.
- Edad de la batería.
- Aceptación de la carga.
- Impedancia interna.
- Capacidad de descarga.

En la práctica algunas mediciones del SOH se basan únicamente en la impedancia interna, pues este es el valor más importante en cuanto al deterioro de la batería o celda se refiere.

En búsqueda de precisión, otros abogan por la medición de varios parámetros celulares, los cuales varía con la edad de la batería y hacer una estimación del SOH, mediante una combinación de estos factores.

Para el tratamiento de estas medidas complejas es necesaria la ayuda de un microprocesador para entregar los resultados. La sentencia de las celdas como aptas o no aptas, se basa en un límite arbitrario basado en la experiencia con estas aplicaciones [24].

2.2.6.2. Cuál es la utilización del SOH.

Proporcionar una indicación del rendimiento que se puede esperar de una batería en su estado actual y proporcionar una estimación del tiempo de vida útil de la batería. En aplicaciones tales como el modo en espera y plantas de energía de emergencia, el SOH indica si la batería será capaz de soportar la demanda [24].

2.2.7. Equilibrio de las celdas.

Para el correcto funcionamiento de una batería de más de un elemento, se hace necesario que exista un equilibrio entre todas las celdas que forman una batería, este equilibrio consiste en tener todas las celdas con la misma carga, para conseguir esto es necesario que todas ellas tengan un mismo voltaje.

En la tecnología del litio como en cualquier otra se producen desequilibrios entre celdas y para conseguir equilibrarlas se hace necesario e indispensable el uso de un BMS.

En el caso del NiCd y el NiMH también se producen desequilibrios, pero no es necesario un dispositivo específico para su equilibrado, pues cuando estas baterías son cargadas, las celdas de menor capacidad, transforman la energía que no pueden absorber en un aumento de la presión y un aumento de la temperatura.

A continuación se van tratar distintos aspectos sobre el equilibrio entre celdas, que aun siendo aplicables a cualquier tipo de baterías, se centran en la química del litio, que es a la única que le es indispensable [21].

2.2.7.1. Origen de los desequilibrios.

Durante el ciclo de carga, si hay alguna celda degradada con capacidad disminuida, existe el peligro de que una vez que alcance su carga completa, esté sujeta a una sobrecarga hasta que el resto de las células de la cadena, alcancen su carga completa. El resultado es el aumento de temperatura, la acumulación de presión y el posible daño a la célula. Con los sucesivos ciclos de cargas y descargas las células débiles se vuelven aún más débiles hasta que la batería falla.

Durante la descarga, la celda más débil tendrá una descarga más profunda, incluso llegando a ser posible que el voltaje en las células más débiles, se invierta a medida que estén completamente descargadas [1][14].

“No importa qué tipo de técnicas de gestión de baterías se utilice, la tasa de fracaso o el tiempo de vida de una batería multicelular, siempre será peor que la tasa de fracaso o tiempo de vida de celdas individuales” [21].

2.2.7.2. Todas las celdas no son iguales.

En baterías formadas por más de una celda, existen pequeñas diferencias entre las celdas que forman la batería, debido a las tolerancias de producción o las condiciones

de funcionamiento, esta diferencia tiende a magnificarse con cada ciclo de carga y descarga. El equilibrio de la célula, es una forma de compensar las células más débiles, mediante la nivelación de la carga en cada una de las celdas, con el consecuente aumento de la vida de la batería [21].

2.2.7.3. Equilibrado de la célula.

El BMS puede incorporar un sistema de equilibrio, que evita que algunas celdas realicen esfuerzos excesivos de forma individual y por consiguiente equilibrar la carga de todas las celdas que forman la batería. Para ofrecer una solución dinámica, el BMS tiene en cuenta condiciones de funcionamiento y el envejecimiento de las células [21].

Esquemas de equilibrio de celdas más utilizados:

Límite fijo de carga

Este es el método más sencillo para evitar desequilibrios entre células, consiste en configurar el cargador de manera que cuando la primera célula alcance el voltaje máximo de carga, se detenga la carga de la batería.

De igual manera se configura el BMS integrado en la batería, para que cuando detecte el valor de tensión mínima durante la descarga de la batería, se detenga el consumo (el límite inferior solo es necesario en tecnologías basadas en el litio).

Mediante este método la carga se terminará antes de que todas las células hayan alcanzado su carga completa y en la descarga se deja parte de capacidad no utilizada en las células de mayor capacidad. Por lo tanto, se reduce la capacidad efectiva de la batería.

Este método utiliza el voltaje de la célula como una indicación del estado de carga. La principal ventaja es que evita la sobrecarga de las células individualmente, sin embargo puede ser propenso a errores.

Una célula puede llegar a su corte de tensión antes que los demás de la cadena, no porque esté completamente cargada, sino porque su impedancia interna es más alta que las de otras células.

Este sistema es especialmente útil en aplicaciones en las que solo hay una celda, para sistemas formados por más de una celda, será obligatorio cada cierto número de cargas, equilibrar las celdas que forman el pack [21].

Igualar capacidad desde la carga

Otro sistemas de equilibrio consiste en detener la carga de la primera celda cargada completamente, permitiendo que el resto de las celdas se carguen por completo.

A continuación se descargan las celdas más cargadas hasta conseguir un nivel igual al de las celdas más débiles [21].

Equilibrio activo

El método de equilibrio activo consiste en quitar carga de una o más celdas con mayor carga que el resto y entregársela a una o más células con un nivel de cargar inferior al resto, así las células más débiles consiguen una carga completa, maximizando así la capacidad de la carga de la batería. Este sistema no tiene en cuenta que algunas celdas con capacidad de carga inferior, no puedan absorber mas carga, lo que lleve a la celda a aumentar su temperatura empeorando aún más su situación [21].

Pasiva de equilibrio

Consiste en encontrar las celdas con la mayor carga, (indicado por el voltaje) y retirar el exceso de carga a través de un puente de resistencias, para cederlo a las celdas con menor carga [21].

2.3 BATERÍAS INTELIGENTES.

Muchas aplicaciones requieren una comunicación entre batería y otros dispositivos del sistema. Estas son a menudo llamadas baterías inteligente.

Esta comunicación se realiza mediante un enlace de datos, utilizado para la supervisión del rendimiento, registro de datos, diagnóstico o para establecer los parámetros del sistema. Esta comunicación se realiza a través del SMBus [16].

2.3.1. Objetivos de las baterías inteligentes.

La vida de baterías utilizadas en herramientas eléctricas, vehículos etc. puede ser prorrogada por el uso de un sistema de carga inteligente, que facilita la comunicación entre la batería y el cargador. La batería proporciona información sobre su tipo de química, su condición actual y su historial de uso, que es utilizada por el cargador para determinar el perfil óptimo de carga.

El objetivo principal de la interacción entre cargador y batería es evitar la sobrecarga o daños a la batería, prolongar su vida útil así como proporcionar información en tiempo real a su usuario [16].

“El control de la carga (BMS) puede formar parte de la batería del cargador o de ambos”

2.3.2. Funciones del chip de memoria en la batería inteligente.

La batería inteligente también puede poseer un chip de memoria, el cual es programado por el fabricante con información sobre las especificaciones de la batería, tales como:

- Fabricación de datos (Nombre, fecha, número de serie, etc.).
- La química de la célula.
- La capacidad de la célula.
- Límites superior e inferior de tensión.
- Límites de la temperatura.

Una vez que la batería se empieza a usar, la memoria también puede registrar:

- ¿Cuántas veces la batería se ha cargado y descargado?
- Tiempo transcurrido.
- Variaciones de la impedancia interna de la batería.
- El perfil de temperatura al que ha sido sometida.
- Con que temperatura deben actuar los circuitos de refrigeración forzada.
- Cualquier caso en que los límites se hayan superado.

Los dispositivos pueden estar en la batería, en el cargador o en ambos, pudiendo interrumpir o modificar la aplicación, de acuerdo con los valores prefijados que rigen el funcionamiento de la batería.

La batería inteligente también necesita un cargador inteligente, que pueda hablar y un lenguaje en el que puedan comunicarse. El cargador está programado para responder ante la batería, para optimizar el perfil de carga respetando la temperatura prefijada, ralentizando o deteniendo la carga, existe la opción de encender un ventilador de refrigeración, a fin de no sobrepasar el límite de temperatura y evitar así un daño permanente a la batería.

Debido a que la batería contiene información acerca de sus propias características y que estas pueden ser leídas por el cargador, es posible construir Cargadores Universal, que puedan adaptarse automáticamente al perfil de carga de distintas químicas de baterías y capacidades [16].

2.4. AUTENTIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN.

El BMS permite la posibilidad de identificar información sobre la batería o celda, indicando:

- El fabricante.
- Química de las celdas.
- Lote o número de serie.
- Fecha de fabricación.

Se emplean sistemas de autenticación para evitar el uso de baterías no aprobadas o evitar problemas de compatibilidad con el sistema de protección.

También podría ser utilizado para controlar el mercado de baterías de repuesto mediante la prevención de los llamados "knock-off" o la falsificación de baterías.

Hemos de destacar la importancia de factores como fecha y calidad de fabricación, en lo referente a baterías de litio.

Hay que recordar que las baterías de litio deben estar bajo rigurosas medidas de seguridad, tanto durante, como después de su fabricación, para poder conseguir un nivel de seguridad adecuado.

Además de tener en cuenta que la edad afecta directamente al rendimiento de estas, hayan sido o no usadas [25].

2.4.1. Identificación mediante código numérico.

Consiste en un código que identifica a cada batería y que es guardado por la memoria que posee esta. El BMS es el encargado de interrogar a la batería, para identificar el código como correcto. Si por alguna razón, el código no se encuentra o es incorrecto no se permitirá conectar a la batería con el resto del circuito [25].

2.4.2. Identificación mediante radiofrecuencia.

Los sistemas más empleados son Am (modulado en amplitud) y Fm (modulación en frecuencia). Las últimas tecnologías ofrecen la posibilidad de trabajar cada vez con mayores frecuencias, reduciendo prácticamente a cero la posibilidad de interferencias [25].

2.4.3. Identificación mediante hologramas.

Los hologramas proporcionan un método alternativo y más económico para la identificación de las baterías. Son fáciles de leer y muy difíciles de copiar [25].

2.4.4. Identificación mediante código de barras.

Es el método más simple y económico para proporcionar información. Son útiles para la identificación y gestión de inventario, pero no son fáciles de leer por el usuario [25].

2.4.5. Comunicación.

La mayoría de los sistemas BMS incorporar algún sistema de comunicación entre la batería y el cargador. Los interfaces de comunicación también son necesarios para permitir al usuario acceder al BMS, para modificar los parámetros de control o para el diagnóstico y prueba.

Muchas aplicaciones requieren que la batería este comunicada con otros dispositivos del sistema o con equipos externos. Estos son a menudo llamadas baterías inteligentes. Estos pueden ser:

- Un enlace de datos utilizado para la supervisión del rendimiento.
- Un registro de datos.
- Diagnosticar y establecer los parámetros del sistema.
- La elección del protocolo de comunicaciones no está determinado por la batería, sino por la aplicación en la que se va a utilizar [25].

2.5. BMS PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO O HÍBRIDO.

Hasta ahora se ha tratado el BMS como un elemento empleado para tratar distintos tipos de químicas y distinto número de celdas pero sin un fin concreto, ahora se centra su uso en el campo de la automoción.

2.5.1. Funciones de un BMS para un vehículo eléctrico o híbrido.

- Monitoreo de las condiciones de las células que componen la batería.
- Mantenimiento de todas las células dentro de los límites de funcionamiento.
- Protección de las células según sus condiciones de tolerancia.
- Proporcionar un sistema "Fail Safe". Mecanismo que en caso de condiciones no controladas bloquea el sistema eléctrico de forma parcial o total.
- Aislamiento de la batería en caso de emergencia.
- La compensación de desequilibrios en los parámetros de cada celda.
- Proporcionar información sobre el estado de carga (SOC) de la batería.
- Proporcionar información sobre el Estado de la Salud (SOH) de la batería.
- Predicción de la autonomía con la carga restante en la batería.
- Proporcionar el algoritmo de carga óptimo, para la carga de las células, en función de sus características y del tipo de química que se trate.
- Proporcionar medios de acceso para la carga de las células individualmente.
- Grabación de los usos de la batería.

Modo en "rendimiento reducido" en caso de fallo de las células o una vez por debajo del voltaje mínimo [16].

2.5.2. Sistema del control automático.

Un sistema de control automático, es aquel en el que la batería proporciona información sobre su situación real al cargador, el cual compara la situación real con la condición deseada y genera una señal que se utiliza para iniciar acciones de control, con el objetivo de conseguir, que la situación real coincida con la situación deseada. No requiere intervención del usuario [16].

2.5.3. Monitoreo de la batería.

Además de comunicarse con el cargador, la batería inteligente también puede comunicarse con el usuario o con otros sistemas de los cuales la batería puede ser parte. Las señales proporcionadas pueden ser utilizadas para encender las luces de

advertencia o informar al usuario sobre el estado de la batería y la cantidad de carga restante [16].

2.5.4. Protección de celda.

Una de las funciones principales de un BMS es proporcionar la supervisión y el control necesario para proteger las células, manteniéndolas dentro del estado de tolerancia y de las condiciones de funcionamiento. Esto es particularmente importante en aplicaciones de automoción, debido a las duras condiciones de trabajo. Además de la protección de células individuales, el sistema del automóvil también debe estar diseñado para responder a las condiciones de fallo externo, mediante el aislamiento de la batería. Por ejemplo pudiendo ser activado con ventiladores de refrigeración si se recalienta la batería. Si el recalentamiento es excesivo entonces la batería se puede desconectar [16].

2.6. APLICACIÓN PRÁCTICA BMS.

2.6.1. Topología Estrella.

El maestro y los esclavos en una topología estrella, organizan las células en bloques o módulos con un esclavo para la gestión de cada módulo.

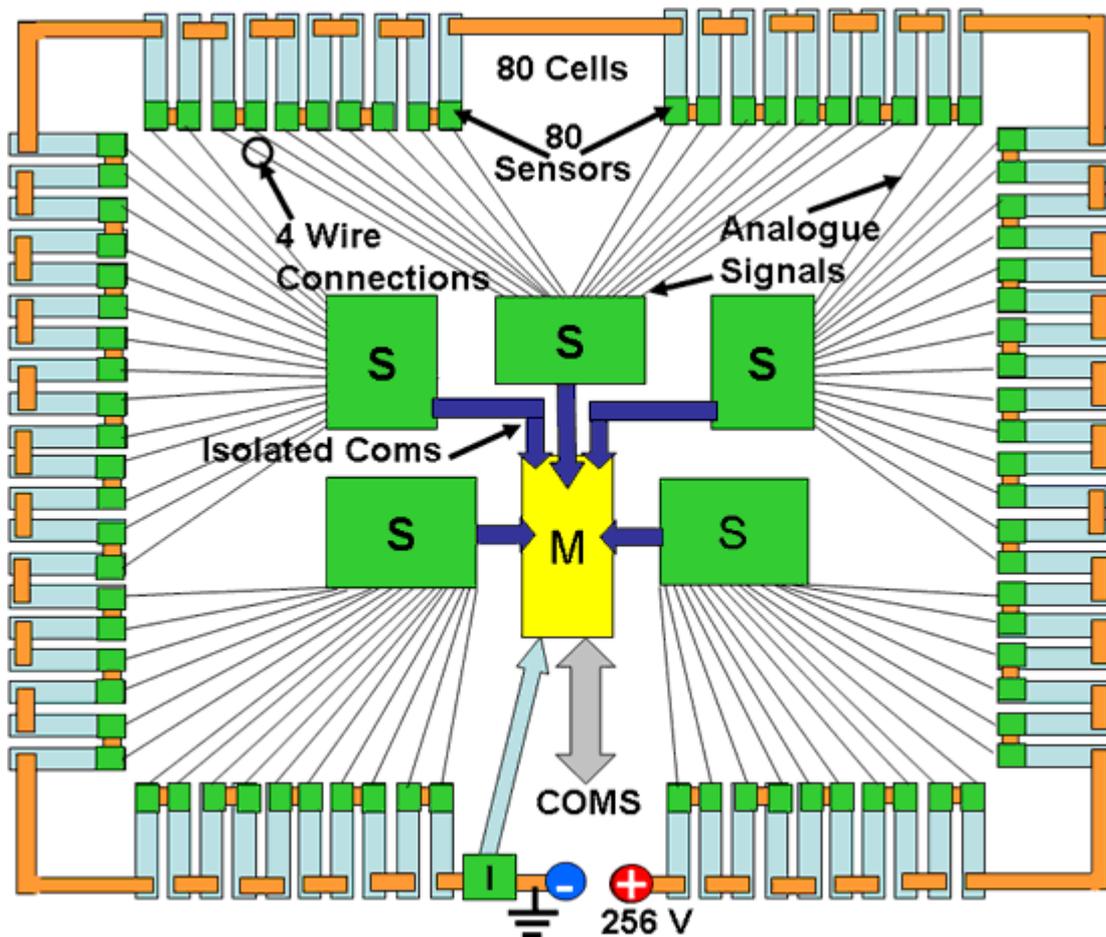


Figura 9. Conexión topología estrella [16]

- **Los esclavos** - Cada célula tiene un sensor de temperatura, así como las conexiones para medir la tensión, todos los esclavos están conectados con el maestro que vigila el estado de la célula y ejecuta el equilibrio celular.
- **El maestro** - Esclavos múltiples son conectados al maestro que controla la corriente y los datos de temperatura y voltaje de los esclavos para el cálculo de la batería del SOC.

El maestro controla el contactor de aislamiento que es el encargado de iniciar la protección de la batería, en respuesta a los datos del sensor de corriente de voltaje y de temperatura. El maestro también es el encargado del sistema de comunicaciones.

Esta configuración tiene la ventaja de no necesitar circuitos impresos en cada una de las células.

Las desventajas son que las comunicaciones entre los sensores y los esclavos se encuentran en forma analógica, y por lo tanto susceptible al ruido, y al gran número de cables provenientes de los sensores [16].

2.6.2. Topología Anillo.

Topología de anillo o cadena, utiliza un esclavo por cada una de las célula. Cada uno de los esclavos está compuesto por un circuito integrado que proporciona información, además de un interruptor de puente de corriente que permitir realizar un equilibrado de corriente entre las distintas celdas.

El esclavo se alimenta de la célula que vigila y un solo RS_458 de tres cables de bus de datos conecta los nodos de todos los esclavos.

El maestro es el encargado de realizar la conversión analógica digital durante sus funciones de vigilancia, protección y comunicación.

Las principales ventajas de esta topología son un diseño más simple y una mayor fiabilidad.

Las desventajas son el gran número de circuitos impresos que se necesitan y la dificultad de su montaje en algunos tipos de células.

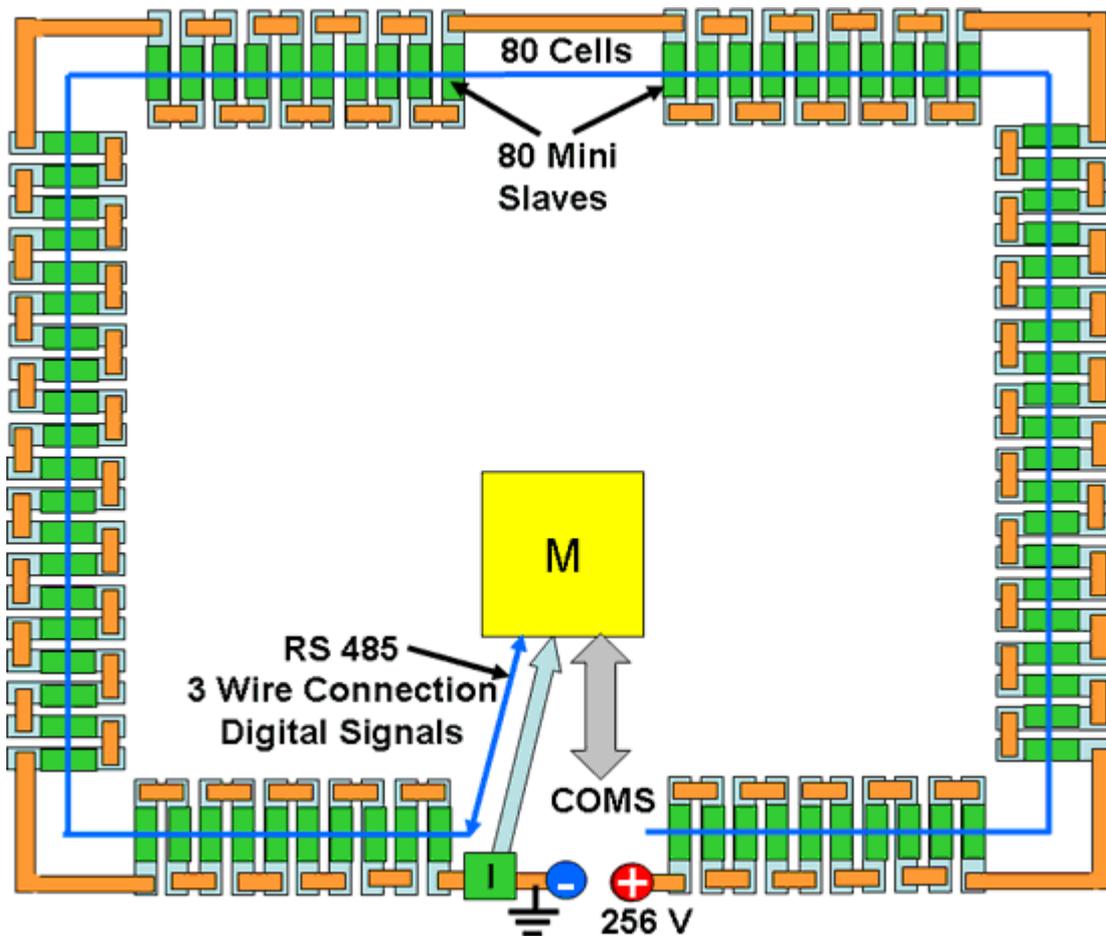


Figura 10. Conexión topología anillo [16]

- La gestión centralizada es la más económica, pero la menos ampliable, y se ven afectadas por una multitud de cables (espaguete).
- Los BMS distribuidos son los más caros, más simples de instalar, y ofrecen el ensamblaje más limpio.

La topología modular ofrece un compromiso de las características y los problemas de las otras dos topologías [16].



3. CONSTRUCCIÓN DE BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO

3. CONSTRUCCIÓN DE BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Tras haber realizado una comparación entre las distintas tecnologías, se va a profundizar en los detalles de la construcción del polímero de litio, para conocer las partes que lo componen y los sistemas de fabricación.

3.2. CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.

Este tipo de baterías utiliza una configuración compuesta por un ánodo de litio metálico, un polímero compuesto por polietileno, oxido de vanadio y una sal de litio (LiTFSI) [31].

3.3. ELEMENTOS DE UNA CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.

Para ver porque esta configuración electroquímica aporta tan buenos resultados a las baterías se va a concretar más su funcionamiento:

- Como ya se ha comentado la batería se forma de celdas, cada celda debe tener un ánodo, un cátodo y un electrolito.
- El ánodo es una ultra delgada lámina de litio metálico que hace la función de fuente de iones de litio (descarga) o como colector (carga).
- El cátodo es un material compuesto con capas intercaladas de oxido de vanadio, sal de litio y polímeros, todo ello laminado sobre una hoja de aluminio que sirve de colector.
- El aspecto que hace únicas a las baterías de polímero de litio, es el electrolito confeccionado a partir de una membrana que sirve de separador entre las láminas de ánodo y cátodo. Es un sólido de textura gomosa, que puede estar constituido por diversos compuestos según fabricante.
- La actual tendencia a la hora de diseñar baterías de ion de litio, consiste en añadir al electrolito un gel que mejora las propiedades térmicas y disminuye la impedancia interna de la batería, mejorando su capacidad de descarga.

- Al introducir un gel es necesario encapsularla de forma estanca la celda, para evitar pérdidas de sus elementos internos.
- El comportamiento elástico del polímero permite que la superficie de contacto con los electrodos sea la adecuada.

Para evitar la degradación de la batería se incluyen algunas capas intermedias, como por ejemplo un film de pocas micras de espesor entre el litio y el electrolito, que evita la oxidación del litio con la sal del electrolito. De no aplicar esta protección se generaría una capa autopasivante de formación dendrítica que aumentaría en cada ciclo de carga-descarga y que podría dejar aisladas eléctricamente a zonas del ánodo reduciendo la capacidad efectiva de la batería [31].



Figura 11. Celda de polímero de litio [31]

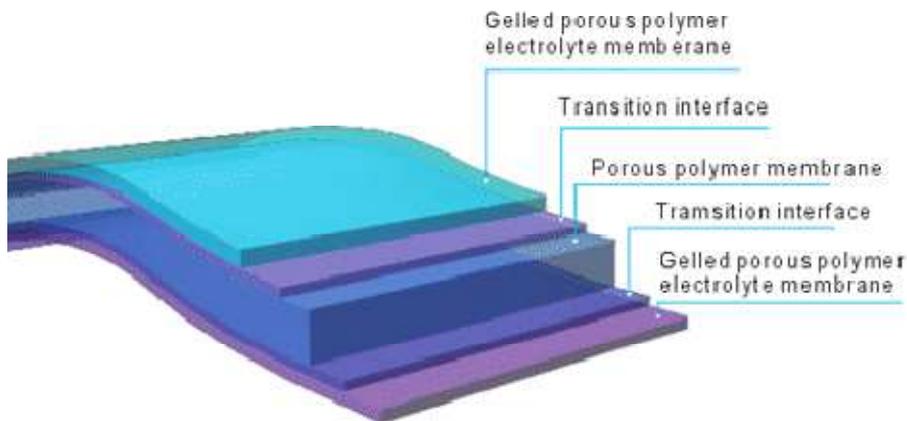


Figura 12. Capas pertenecientes a una celda de polímero de litio [31]

3.4. TEMPERATURA Y DISEÑO.

Cuando se diseña una celda de polímero de litio existe la necesidad de laminar las capas de reactivos, hasta el orden de micras, con el objetivo de contrarrestar el efecto de una baja conductividad, para esto se hace necesaria una gran superficie de conducción y así poder reducir la resistencia resultante, permitiendo un funcionamiento aceptable.

Además al tener un área mayor, el efecto de condensador paralelo es más considerable permitiendo aumentar ligeramente la capacidad.

La tensión no se ve afectada, pues solo depende de la afinidad química de los materiales.

Otro de los puntos importantes que afecta al diseño, es la variación de esta conductividad con la temperatura.

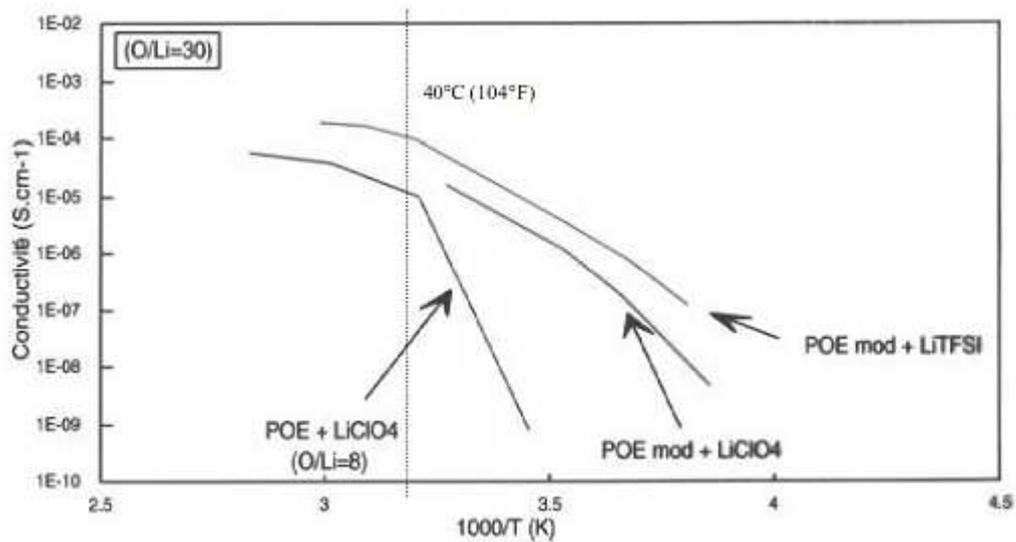


Figura 13. Gráfico de la conductividad del electrolito en función de la temperatura [32]

Como se observa en el gráfico la conductividad del electrolito varía fuertemente con la temperatura. La composición de LiTFSI con aditivos comonomeros en matriz de óxido de polietileno es la que mejor resultado da a temperaturas más bajas (40 °C -60°C).

Según para que aplicación vaya destinada la batería puede ser beneficiosa o perjudicial que su funcionamiento sea aceptable a partir de los 40°C y mejore con la temperatura.



Figura 14. Láminas generadoras de calor [32]

Para asegurar una temperatura de funcionamiento adecuada, es necesario intercalar entre las celdas de reactivos, elementos generadores de calor (láminas rojas de la figura 14) y termómetros que mediante un circuito de protección térmica busquen el punto de funcionamiento más recomendable.

Hay que tener en cuenta que el calentamiento se consigue con energía obtenida de la propia batería, por lo que no podemos calentarla todo lo que deseamos para mejorar la conductividad.

Según el ambiente en el que vaya a trabajar, el tamaño y potencia de la batería puede ser que no sea necesaria la inclusión de estos calentadores, porque ya se genere suficiente calor en su funcionamiento normal.

En estos casos incluso es recomendable utilizar disipadores de calor para evitar la degeneración de otros compuestos de la batería. En el caso de modernas baterías pequeñas se utilizan electrolitos más complejos, en ocasiones menos efectivos, que permiten el funcionamiento a temperatura ambiente.

Las últimas investigaciones están mejorando los electrolitos y han creado un electrolito no inflamable que se vuelve aislante eléctrico cuando la temperatura pasa de los 130°C y pronto entrará en el mercado, principalmente para baterías de coches eléctricos.

El objetivo es que el usuario final no tenga que realizar ningún tipo de control sobre la temperatura [32].

3.5. ELEMENTOS DE PROTECCIÓN INTERNOS A LA CELDA.

Las baterías de polímero de litio pueden generar daños físicos debido a su excesivo calentamiento, para ello incorporan circuitos de protección que regulan diversos aspectos:

- **Protección de corriente:** La corriente admisible que puede circular (en carga o descarga) es bastante limitada para evitar sobrecalentamientos y defectos en los materiales electroquímicos, para ello suelen incorporar una resistencia para disipar el calor generado, de forma que si en carga intentamos sobrepasar la tensión parte de esta se consume en estos radiadores. Igualmente en descarga el sistema no permite sobrepasar cierta corriente [33].
- **Protección de presión:** La tensión interna que sufre el litio en su proceso de carga y descarga, puede producir micro-agrietamientos en elementos internos

de la celda, este fenómeno es reducido mediante un control de la presión de las celdas [33].

- **Protección ante el agua:** el encapsulado debe proteger al litio del agua y la humedad pues podría reaccionar generando calor y estropeando la batería [33].

3.6. ELEMENTOS PARA LA FABRICACIÓN DE UNA CELDA DE POLÍMERO DE LITIO.

El proceso para la fabricación de las baterías de polímero de litio consiste en [4]:

- Aleación del cátodo de litio, a partir de un lingote de litio, extrusión, control, laminación, control y enrollado.
- Aleación del ánodo (aluminio, grafito,...), extrusión, laminación, control y enrollado.
- El electrolito puede ser según tipo, creado en lámina o puede ser pulverizado como una capa sobre el ánodo (proceso de “coating”).
- Fijación y pegado de las láminas, también existen varios métodos como pegado de láminas u horneado al vacío.
- Devanado de la lámina, generando la geometría deseada.
- Montaje de las celdas con el sistema de generación térmica si es necesario.
- Soldadura de los electrodos, varios métodos (soldadura por puntos, ultrasonidos).
- Fabricación de la carcasa por moldeo de plástico. (Puede ser de otros materiales como metal)
- Recubrimientos aislantes y de protección.
- Conexión de los sistemas de protección electrónicos.

3.7. GENERACIÓN ATMÓSFERA PROTECTORA.

Para la fabricación de las baterías de litio es necesaria la preparación de los gases del entorno de trabajo. La línea de fabricación hasta el encapsulado debe estar protegida ante suciedad, humedad y gases reactivos. Para este cometido hay dos opciones principalmente [34].

3.7.1. Sala Acondicionada.

Se controla la entrada y salida de aire de la habitación mediante unos sensores de condensado como los de la figura inferior, que regulan la humedad.

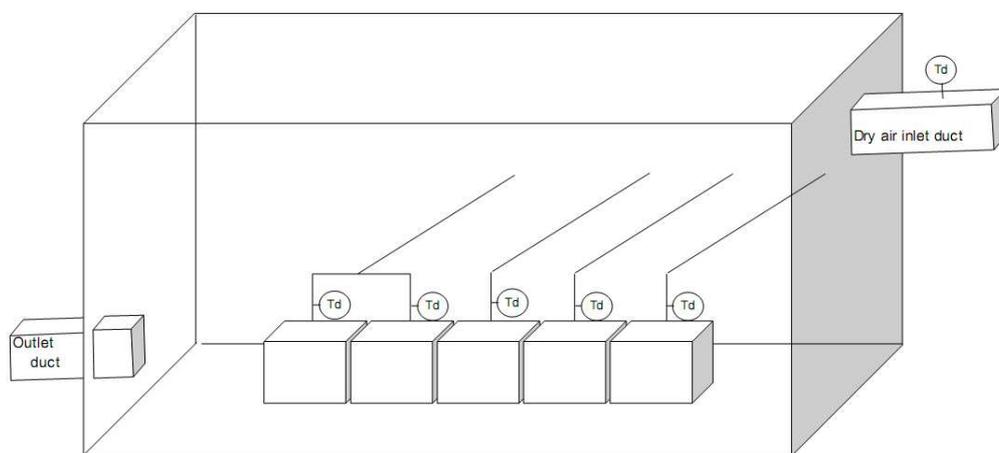


Figura 15. Esquema sobre los conductos de entrada y salida de aire [34]

Además sobre los procesos se expulsa aire en condiciones controladas para asegurar que la atmósfera que rodea al proceso es la adecuada.

El aire se purifica con filtros anti-polvo, y para reducir la humedad se utilizan sistemas de condensado que enfrían el aire forzando la condensación del vapor y lo expulsan más seco [34].

3.7.2. Líneas de producción aisladas.

Otra opción es aislar del ambiente exterior en una cámara cerrada en la que se encierra buena parte de la línea de producción de la batería.

El principal problema de esta disposición es que dificulta el mantenimiento y no permite variar apenas los parámetros de fabricación pues permiten poca modularidad

de maquinaria. Normalmente están bastante automatizadas pero suelen incluir guantes de trabajo herméticos para manipular las piezas del interior sin contaminar el litio [34].



Figura 16. Línea de producción aislada [34]

3.8. FABRICACIÓN.

3.8.1. Fabricación lámina de litio.

Para la laminación de litio se parte de un lingote de litio puro (99%) de alrededor de unos 5Kg de peso. Cuyas propiedades son:

<i>Propiedades Físicas</i>		<i>Propiedades Eléctricas</i>	
Densidad a 20C (g cm ⁻³)	0,534	Fuerza Electromotriz Térmica contra el Platino (mV)	+1,82
Punto de Ebullición (C)	1342	Coefficiente de Temperatura a 0-100C (K ⁻¹)	0,00435
Punto de Fusión (C)	180,5	Resistividad Eléctrica a 20C (μOhmcm)	9,29

<i>Propiedades Mecánicas</i>		<i>Propiedades Térmicas</i>	
Estado del Material	Policristalino	Calor Específico a 25C (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	3560
Dureza - Vickers	<5	Calor Latente de Evaporación (J g ⁻¹)	19600
Módulo Volumétrico (GPa)	11,1	Calor Latente de Fusión (J g ⁻¹)	422
Módulo de Tracción (GPa)	4,91	Coefficiente de Expansión Térmica 0-100C (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	56
Relación de Poisson	0,36	Conductividad Térmica a 0-100C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	84,8

Figura 17. Características mecánicas, físicas, eléctricas y térmicas de un lingote de litio [35]

En su tabla de características podemos apreciar que es un elemento muy ligero además de poseer unos puntos de fusión y ebullición muy bajos, junto a unas propiedades mecánicas bastante elásticas que faciliten el mecanizado.

Se quiere obtener una lámina con un grosor de unos pocos micrómetros, para ello primero se realiza la extrusión y seguido de una laminación para reducir más el grosor [35].



Figura 18. Línea de producción de láminas de litio para baterías [35]

3.8.1.1. Extrusión.

Inicialmente se necesita realizar un proceso de extrusión. Debido a las propiedades del litio con una sola extrusión se podrán conseguir espesores de tan solo 0.20 mm.

La extrusión puede realizarse en frío, pero teniendo en cuenta el bajo punto de fusión del litio y una temperatura ambiente elevada, sumado al aumento de la temperatura por las propias tensiones del material, hacen que el lingote sea lo bastante blando como para poder ser tratado con maquinaria de laminado en caliente, pero sin calentadores.

El hecho de que sea tan blando permite que el perfil extruido guarde una relación de área muy grande con respecto al lingote (una relación impensable en otros tipos de materiales).

A pesar de ser blando, como se quiere conseguir una reducción importante de grosor a velocidades medias y tiradas largas, es necesario utilizar prensas con potencias medias. Así es habitual utilizar extrusores horizontales que permiten grandes potencias de empuje y permiten hacer de una tirada láminas de más de 200m.

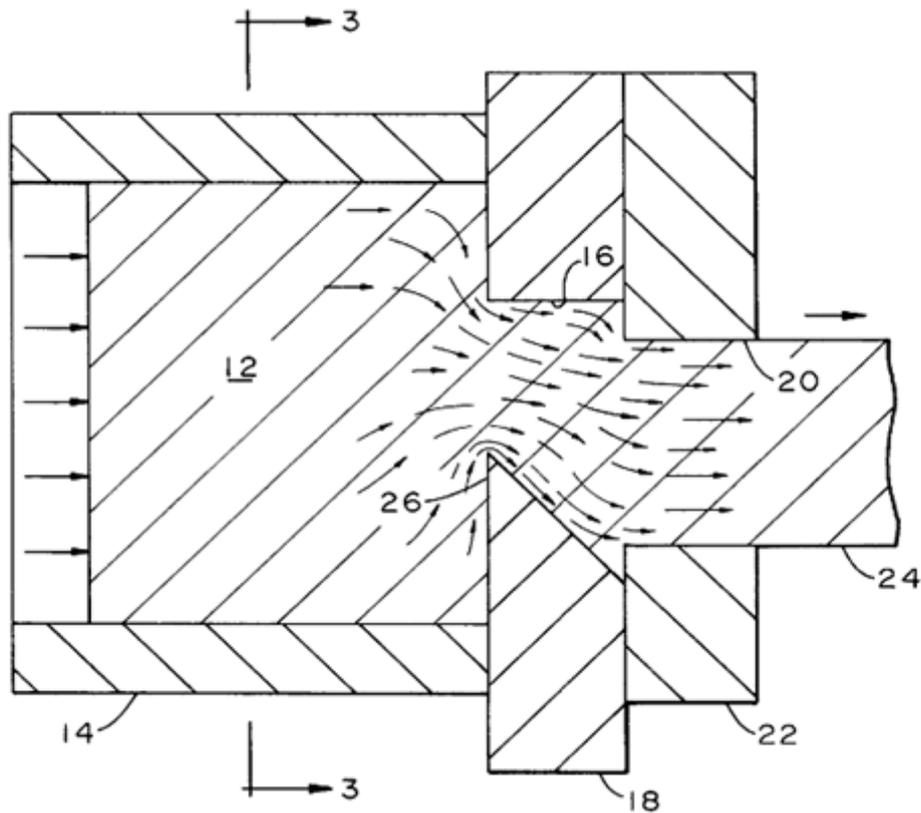


Figura 19. Boquilla para la extrusión del litio [35]

Hay diversas boquillas patentadas para el extrusor, una de ellas es la representada en estos diagramas, que poseen ciertas piezas en ángulo, que forman reflujos para direccionar los granos de cristal de litio lo mas longitudinalmente posible, para obtener las mejores propiedades mecánicas, ya que sino durante la extrema laminación que se le aplicara, podrían romperse.

Los perfiles de salida se pueden cambiar fácilmente para variar el grosor o el ancho de la lámina.

No es habitual el uso de lubricantes. Es lógico por varios motivos ya que es un metal muy blando, de buena fluidez y que además es muy utilizado para producir grasa para lubricar maquinaria, por lo que se hace evidente la poca necesidad de utilizar lubricante [35].

3.8.1.2. Laminación.

El grosor mínimo que nos permite la extrusión es como mínimo del orden de 0.2mm pero si realizásemos una batería de litio con una lámina tan gruesa, a pesar de que la tensión eléctrica sería la misma e incluso la capacidad similar (para un mismo peso), la resistencia interna y la corriente máxima que permitiría no serían admisibles para la mayoría de los usos.

Por ello es necesario reducir aún más el espesor mediante un proceso de laminado. La información de esta etapa no es publicada por la mayoría de los fabricantes, pues se nutre de tecnología más avanzada.

Por los mismos motivos por los que la extrusión se realizaba en frío el laminado también lo será así.

Como se desea una reducción de hasta unos 20 μ m lo más aconsejable es utilizar varias etapas de laminado o laminando en tándem. De esta forma vamos reduciendo progresivamente el grosor de la lámina. Este proceso es complicado y hay que tener en cuenta diversos factores.

La presión que ejerce cada tren de rodillos debe ser calculada meticulosamente ya que es muy importante ajustar las velocidades de la lámina para que se ajuste al siguiente tren.

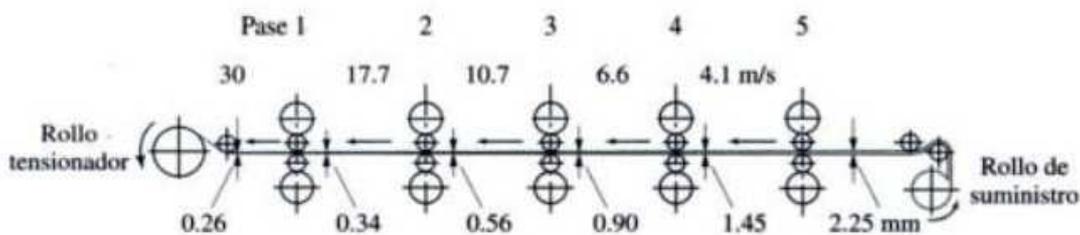


Figura 20. Sistema de laminado mediante rodillos en tándem [36]

La reducción del grosor, produce un alargamiento y un ensanchamiento que hay que controlar para que no se descentre de los rodillos y para que no haya desequilibrios en las velocidades de estos.

Además al tratarse de láminas tan delgadas y de un material blando hay que manejarlas con delicadeza porque pueden aparecer grietas y fisuras que dividan la lámina muy fácilmente, por lo que no pueden aparecer tensiones mecánicas internas considerables.

Con igual cuidado deben por tanto ser calculados los rodillos y su desgaste para que el funcionamiento sea suave.

Estos equipos utilizan rodillos de eje móvil entre trenes, para ajustar la tensión y pequeños cambios en la velocidad, para que la hoja de litio no pierda tensión y se arrugue.

Esto hace que esta laminación sea un proceso caro y controlado por ordenador y sensores de alta precisión [36].

3.8.1.3. Comprobación calidad.

Dada la precisión a la que se ha de trabajar en estas láminas es necesario que se realicen controles de calidad continuos simultáneamente a la salida de los procesos tanto de laminado como de extrusión.

Se sitúan unos medidores de espesor, velocidad, implementados de diversas maneras como puede ser mediante básculas de precisión combinadas con encoders de giro con los cuales a partir del peso, velocidad y densidad del material podemos conocer el espesor de la lámina.

Además se pueden realizar controles de impurezas o de defectos mecánicos que se hayan podido producir en la lámina.

Estos sistemas se encuentran totalmente computarizados de forma que según los resultados de estas medidas controlamos la fuerza y los parámetros de funcionamiento tanto del extrusor como de los trenes de laminado, todo en tiempo real [37].

3.8.1.4. Enrollado.

El proceso final antes de su ensamblado, en una lámina de litio que es enrollada.

Un motor sincronizado con la maquinaria de mecanizado, así como con los elementos de control va recogiendo la lámina, enrollándola en unos carretes para su almacenamiento.

Varias empresas producen este tipo de carretes de litio que muchos fabricantes compran para la fabricación de baterías.

Los venden en distintos grosores, anchos y longitudes, con características mejoradas para su uso en baterías y con diversas características a elegir [38].

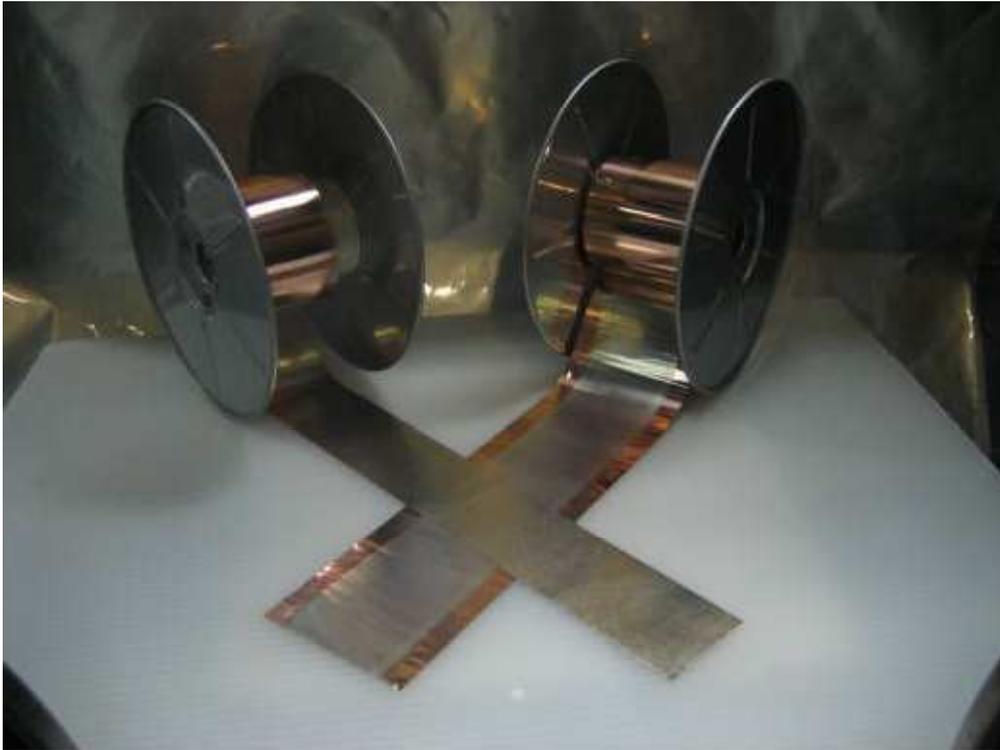


Figura 21. Carrete de litio para la fabricación de baterías [38]

LectroMax 100

Chemical Name	Lithium Foil, electrochemical grade	
Formula	Li	
Appearance	Metallic silver in color	
Product Specifications	Li	99.90 wt%
	Na	100 wppm max
	Ca	150 wppm max
	K	100 wppm max
	Fe	20 wppm max
	Si	100 wppm max
	Cl	60 wppm max
	N	300 wppm max
	Custom made to dimensional requirements within FMC's extensive capabilities.	
Reference Data	Formula weight	6.94
	True density	0.534 g/cc
	Melting point	180.5°C
Packaging	Lectro Max 100 is wound onto spools then dry packed under argon in hermetically sealed aluminized polyester pouches. Spool size is dependent on the dimensions and quantity of foil ordered. Please call for more details on packaging.	

Figura 22. Características de un carrete de litio para la fabricación de baterías [38]

3.8.2. Fabricación del electrolito.

La generación de esta lámina tiene un alto grado de complejidad, debido a lo avanzado de sus componentes, y dependiendo de la tecnología utilizada variarán los procesos técnicos, principalmente químicos, pero desde un punto de vista de mecanizado no conlleva más que una extrusión. Después se pasan los controles de calidad y se enrolla de forma similar al litio.

Como se comentó anteriormente existen varios tipos de separadores electrolíticos. Los más modernos son secos y sólidos [39].

3.8.3. Fabricación de la lámina de aluminio.

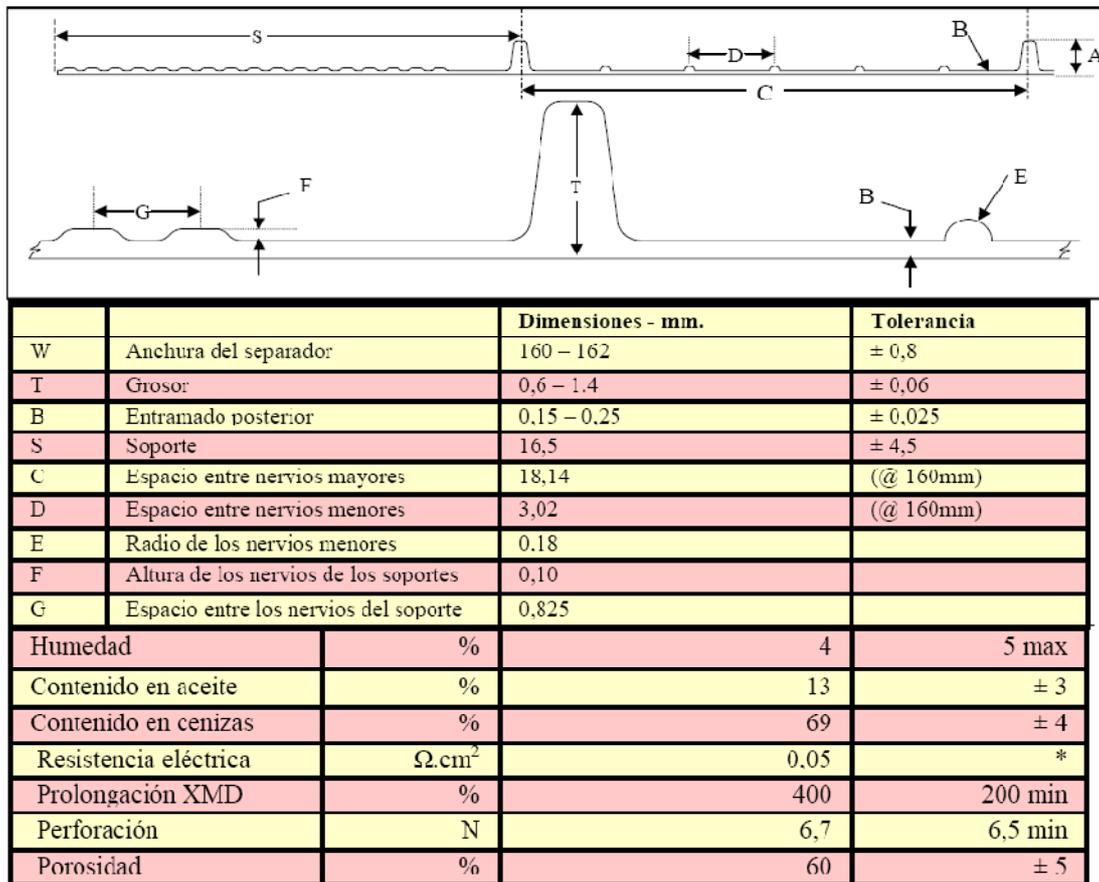


Figura 23. Características del electrolito para baterías de polímero de litio [39]

Es la última lámina de las tres principales que forman la batería. Realmente la lámina de aluminio no reacciona, pero se necesita para adherirla a capas de óxido de vanadio, negro de carbono y sal de litio para que sirva de colector.

Para la fabricación de esta hoja partimos de un aluminio con un alto grado de pureza.

Antes de empezar a laminarlo es necesario que la superficie sea totalmente lisa.

Para ello se le realiza un fresado para un acabado superficial, con una fresa de grandes dimensiones, y por tanto de alta potencia dado que tiene que recortar una capa de poco grosor pero de mucha área. Se utiliza líquido de mecanizado para enfriar las piezas y reducir el coeficiente de rozamiento.

Ahora empieza el proceso de laminado para reducir el grosor. Para ello se realizan dos tipos de laminados.

El primer laminado más grueso se realiza en caliente a una temperatura de unos 500 °C mediante rodillos de grandes dimensiones y un tren de rodillos de empuje que permite la suficiente fuerza para ir aplastando el lingote.

Para evitar calentamientos excesivos y que el rodillo se pegue al lingote se rocía durante todo el proceso con un líquido de mecanizado.

Repetimos el laminado en caliente hasta conseguir una lámina de unos 5 mm.

Alcanzado este grosor se enrolla y pasamos a la laminación en frío.

Esta laminación en frío es muy similar a la del litio, pasando por numerosos rodillos vamos reduciendo la lámina hasta alcanzar los 4 μm de grosor suficiente para adherir a nuestro cátodo.

Los bordes de la lámina se recortan debido a que suelen estar deteriorados y pueden producir fisuras que desgarran la lámina transversalmente [40].



Figura 24. Enrollado de lámina de aluminio [40]

3.9. LÁMINA COMPLETA.

Tras obtener todas las láminas necesarias es necesario unirlas de forma adecuada para que pueda darse la reacción química deseada. Actualmente hay varias tecnologías que incorporan sustancias que rodean el electrolito, para mejorar la duración de la batería. Por lo tanto se necesita crear una lámina formada por múltiples capas de diversos tipos de materiales.

Según los materiales utilizados para el electrolito y capas intermedias, se irán agregando capas en dos fases: los componentes químicos que se puedan aplicar por

espray irán formando capas sobre las láminas de metal y plástico (Coating) hasta que las láminas resultantes tengan que ser unidas por horneado o por adhesión de las propias capas pulverizadas.

Una vez lista la lámina de reactivos completa, hay que amoldarla para dar la geometría deseada según la forma de la batería.

Según los diversos encapsulados posibles utilizaremos una máquina que doble como deseamos la lámina.

Cuando acabe deberá cortar la lámina. Para cortarlo basta con una cuchilla sencilla ya que no posee elementos de gran dureza [41].

3.10. SOLDADURA DE LOS ELECTRODOS

A continuación se muestran los dos posibles métodos de soldadura para celdas de litio.

3.10.1. Soldadura por puntos.

Se suele utilizar para encapsulados cilíndricos. Se utiliza una soldadura por puntos TIG mediante un soldador de control numérico como el de la imagen. Este sistema tiene la ventaja de contar con suministro continuo de material permitiendo una alta productividad.



Figura 25. Soldador por puntos TIG [42]

El principal inconveniente de este tipo de soldadura son los fallos que se pueden ocasionar por la elevada temperatura que se alcanza. Aunque se regule para que la temperatura sea lo más baja posible, el litio y el polímero del electrolito tiene puntos de fusión muy bajos cercanos a 180°C, por lo que son fundidos durante la soldadura.

Si la soldadura es suficientemente rápida el impacto térmico es lo suficientemente pequeño para que la fusión de la lámina reactiva sea de poca penetración y no provoque fallos en su funcionamiento [43].

3.10.2. Soldadura por ultrasonidos.

Es el método más moderno y de mayor implantación en las grandes industrias. Este tipo de soldadura dirige energía ultrasónica de alta frecuencia por la punta del soldador hacia las superficies que se desean soldar.



Figura 26. Soldador por ultrasonidos de varias puntas [42]



La energía deshace los óxidos y la suciedad superficial entre láminas, permitiendo crear una unión metalúrgica real sin necesidad de aporte material.

Además permite soldar múltiples capas a la vez, lo que es muy útil para unir varios electrodos simultáneamente en la batería.

La unión resultante suele ser más dura que la de los propios materiales antes de ser soldados.

Otra ventaja importante es que permite soldar metales muy distintos.

Las herramientas de soldadura no tienen desgaste, de modo que es recomendado para grandes series [43].



4. COMO Y QUE FACTORES AFECTAN A LA VIDA DE LAS BATERÍAS DE LITIO

4. COMO Y QUE FACTORES AFECTAN A LA VIDA DE LAS BATERÍAS DE LITIO.

4.1. CICLOS DE VIDA EN LAS BATERÍAS LITIO.

La vida de una batería está en gran medida influenciada por la velocidad a la que se carga y descarga. Cuanto más rápidas sean las cargas y descargas más sufrirá la batería y más corta será su vida. Lógicamente su vida será mayor cuanto más suaves sean las cargas y descargas [42].

4.2. HINCHAMIENTO DE LAS CELDAS DE LITIO.

El hinchamiento en celdas de litio indica que la celda ha perdido parte de sus propiedades como batería. Además una celda hinchada puede resultar peligrosa pues existe la posibilidad de explosión.

El hinchamiento se produce durante la carga o descarga de la batería (especialmente durante la carga), y puede ser provocado por tres causas:

1. Una mala programación del cargador o el uso de un cargador no adecuado.

Es detectable fácilmente pues se hinchan todos los elementos del pack o batería y su voltaje final está por encima del voltaje máximo por elemento.

2.- Un elemento defectuoso:

Solo un elemento está hinchado, esto es provocado por un fallo de fábrica o un daño físico (por ej. un golpe o perforación). También existe la posibilidad que tal elemento haya sufrido un deterioro de manera más acelerada que el resto.

3.- En baterías que han realizado muchos ciclos de carga y descarga:

El cátodo y ánodo no están en buenas condiciones y los elementos se hinchan durante la carga. Normalmente esto no es peligroso, son baterías que siguen funcionando con sus prestaciones muy mermadas [43].

4.3. COMO AFECTAN LAS CARGAS Y DESCARGAS A LAS BATERÍAS DE LITIO.

Según la arquitectura de una batería los elementos internos se van apilando de la siguiente manera:

Cátodo-Separador-Ánodo-Separador-Cátodo-Separador-Ánodo.

Entre sus las láminas se encuentra el electrolito. En las baterías de ion de Litio este electrolito es líquido y en las baterías de polímero de litio suele ser un gel.

Al descargarse una batería de Litio, esta se oxida liberando energía eléctrica, el óxido de Litio es menos denso que el litio, por lo cual su volumen es mayor y tiende a separar los componentes laminares de la celda. Esto puede provocar una pérdida de contacto entre las láminas haciendo que el electrolito no esté en contacto con cátodo y ánodo.

Además las expansiones y contracciones físicas del elemento van produciendo microgrietas y micro-obturaciones en el cátodo y ánodo lo cual hace que paulatinamente según el paso de ciclos la batería vaya perdiendo propiedades [43].

4.4 COMO AFECTAN LA TEMPERATURA A LA VIDA Y A LAS PRESTACIONES EN BATERÍAS DE LITIO.

La resistencia interna en baterías de alta potencia normalmente es igual o inferior a 10mOhms, variando en función de factores como temperatura, tamaño de la celda, presión externa, etc, (incluso para una misma celda).

Esta resistencia interna como cualquier otra, produce calor cuando es atravesada por una corriente eléctrica, debido al efecto Joule. Por lo que cuanto mayores y más rápida sean las descargas de un elemento, mayor temperatura tomará esta.

Este calor se produce de una manera relativamente uniforme en todo el volumen de la batería, pero se disipa mayormente en la superficie exterior en contacto con el aire. Por lo cual la parte interna de la batería alcanzará mayores temperaturas que el exterior.

A partir de 80-85°C (esto varía según las cualidades de la misma) el electrolito de las baterías de polímero de litio, empieza a vaporizarse y a crear burbujas en el interior de la celda, lo que provoca el hinchamiento de su bolsa de contención.

Estas burbujas (ampollas) separan completamente la arquitectura laminar de la celda, dejando poco o muy poco contacto entre cátodo, ánodo y electrolito, lo cual provoca que la batería pierda casi completamente sus propiedades e incluso llegue a ser peligroso utilizarla, ya que ahora los canales de paso de corriente se han reducido drásticamente por lo cual en descargas o cargas, la corriente debe pasar por puntos de contacto pequeños, esto significará un brusco aumento de la resistencia interna, que se pueden calentarse en extremo y provocar la explosión y posterior ignición de la batería.

Esta vaporización de electrolito no es reversible como en una batería de plomo hermética, en la que el disolvente del electrolito es agua y esta se condensa y vuelve por lo cual el electrolito recupera sus propiedades.

Aunque la temperatura exterior de un pack no llegue nunca a 60°C, en el interior habrá puntos en los que la temperatura supere los 80°C o más, provocados principalmente por picos de corriente entregados durante su funcionamiento, que provocarán estas burbujas (ampollas). Debido a la pérdida de contacto que aparecerá entre las láminas y el electrolito, la batería poco a poco irá perdiendo propiedades [43].



5. SUPERCONDENSADORES

5. SUPERCONDENSADORES.

5.1. SUPERCONDENSADORES.

Los condensadores de doble capa (EDLCs por sus siglas en inglés), también conocidos como supercondensadores, supercapacitores, pseudocapacitores, condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC), ultracondensadores o ultracapacitores, son capacitores electroquímicos, que tienen una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores comunes, generalmente miles de veces mayor que un condensador electrolítico de alta capacidad.

Los EDLCs tienen una variedad de aplicaciones comerciales, especialmente en "suavización de energía" y los dispositivos de carga momentánea.

La vida útil de un supercondensador disminuye conforme aumenta su capacitancia, pero actualmente existen dispositivos que superan una vida útil de veinte años, con pérdidas en la tensión suministrada de alrededor de un voltio.

Debido a estas propiedades de vida útil y manejo de tensión y corriente, los supercondensadores han sido utilizados en diversas aplicaciones [26].

5.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Los supercondensadores poseen varias ventajas y desventajas relativas a las baterías, como se describe a continuación.

Desventajas [27]:

- La cantidad de energía almacenada por unidad de peso, es generalmente menor que la de una batería electroquímica ($3-5 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{kg}$).
- La tensión varía con la energía almacenada.
- Tiene la mayor absorción dieléctrica de cualquier tipo de condensador.
- Alta autodescarga, esta es considerablemente superior a la de una batería electroquímica.
- Poseen bajas tensiones, por lo que a veces se hacen necesarias conexiones en serie para obtener voltajes más altos.
- Si existen más de tres condensadores en serie, se requiere un equilibrado de tensión.

- Debido a la liberación rápida de una gran cantidad de energía, los EDLC tienen el potencial para ser mortal a las personas.

Ventajas [27]:

- Gran período de operación.
- Alto número de ciclos de carga y descarga (>1.000.000).
- Bajo costo *por ciclo*.
- Capacidad de manejar altos valores de corriente.
- Muy alta velocidad de carga y descarga.
- Muy baja resistencia interna.
- Gran rango de temperatura.
- Alta eficiencia (>95%).
- Mejora de la seguridad, al no utilizar un electrolito corrosivo ni materiales de baja toxicidad.
- Métodos sencillos de carga, sin peligro de sobrecarga.

5.3. FRENADO REGENERATIVO ELÉCTRICO.

Un freno regenerativo es aquel dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo, transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es almacenada para un uso futuro.

El freno regenerativo en trenes eléctricos, alimenta la fuente de energía del mismo. En vehículos de baterías y vehículos híbridos, la energía es almacenada en un banco de baterías o un banco de condensadores para un uso posterior.

El freno regenerativo es un tipo de freno dinámico. Otro tipo de freno dinámico es el freno reostático, mediante el cual la energía eléctrica generada en la frenada es disipada en forma de calor [29] [28].

5.3.1. El motor como generador.

Los frenos regenerativos se basan en el principio de que un motor eléctrico, puede ser utilizado como generador. El motor eléctrico de tracción, es reconectado como generador durante el frenado y las terminales de alimentación se convierten en suministradoras de energía [29] [28].

5.3.2. Limitaciones.

El frenado tradicional, basado en la fricción, sigue siendo usado junto con el regenerativo por las siguientes razones [29] [28]:

- El frenado regenerativo reduce de manera efectiva su frenada a bajas velocidades, por lo que el freno de fricción sigue siendo necesario a fin para el vehículo completamente.
- La mayoría de los vehículos de carretera con frenado regenerativo, sólo instalan este sistema en algunas de las ruedas, con el fin de mantener mayor control de frenado en condiciones difíciles (por ejemplo, en carreteras mojadas).
- El freno de fricción es un elemento necesario de apoyo en caso de fallo del freno regenerativo.
- La cantidad de energía a disipar está limitada a la capacidad de absorción de ésta, por parte del sistema de condensadores. Por esta razón, es necesario contar con un freno reostático que absorba el exceso de energía.

5.4. BENEFICIOS DEL USO DE SUPERCONDENSADORES PARA UN MOTOR ELÉCTRICO.

El hecho de utilizar supercondensadores de manera conjunta a un sistema de baterías de litio, proporcionará una serie de ventajas, tanto en autonomía como en rendimiento, las cuales se muestran a continuación [29][28]..

5.4.1. Mejoras en rendimiento.

A diferencia de las baterías, los ultracapacitores no dependen de reacciones químicas para almacenar energía y no se degradan significativamente durante su vida útil.

Los supercondensadores una vez cargados, son capaces de liberar su carga en un periodo extremadamente pequeño de tiempo. Es por esto que pueden cubrir los picos de corrientes demandados por el motor en periodos de aceleración. Consiguiendo así una mejora notable en la aceleración, una demanda de corriente más lineal y no exceder los límites de descarga de la propia batería [29] [28].

Gracias a esto se consiguen mejoras como:

- Prolongar la vida útil de la batería.
- Reducir la necesidad de sobredimensionar las baterías para poder proporcionar grandes descargas (aceleraciones).

- Mejores aceleraciones.
- Asegurar que el vehículo acelere al final de la vida útil de su batería, con una eficiencia similar a la que poseía inicialmente.

5.4.2. Mejoras en autonomía.

El uso de supercondensadores en combinación con las baterías también supone un aumento en la autonomía del vehículo, debido a que el supercondensador absorbe parte de la energía de la frenada, a través del *sistema de frenado regenerativo* y lo almacena en el supercondensador (o batería de supercondensadores).

Gracias a este sistema se reutiliza parte de la energía de la frenada, optimizando el sistema energético.

Sistemas similares a este se están empleando actualmente en autobuses de hidrógeno de la empresa belga De Lijn, los cuales están equipados por un motor eléctrico y una célula de hidrógeno y el exceso de energía eléctrica producida no se pierde, si no que se almacena en unas baterías [28] [29].

5.5. CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE CONDESADORES EN COMBINACION CON BATERIA DE PÓLIMERO DE LITIO.

A continuación se muestra el circuito planteado para el funcionamiento en conjunto de supercondensadores y batería.

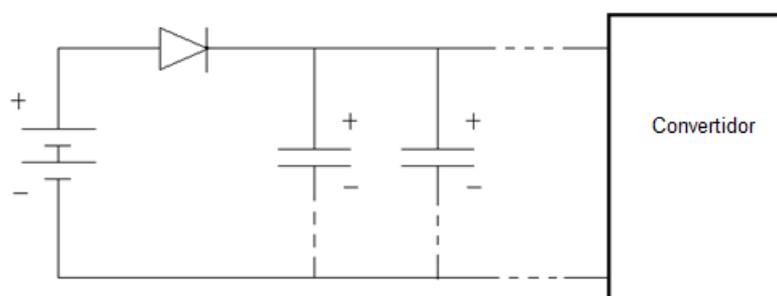


Figura 27. Circuito de batería de condensadores.

Funcionamiento como motor:

En la parte izquierda del circuito eléctrico se observa la representación de la batería de polímero de litio, a continuación conectado en serie se encuentra el diodo que permite el paso de corriente cuando la batería se descarga. En paralelo se disponen condensadores que asociados en serie o en paralelo permiten conseguir la capacidad total que se requiera. Por último en paralelo a todo esto se encuentra el convertidor, encargado de pasar la carga de continua (batería), a trifásica (motor).

Funcionamiento como generador:

Cuando el motor funciona como generador, el convertidor invierte su funcionamiento, pasando de trifásica a continua, para que los condensadores puedan absorber la energía producida por la frenada regenerativa. Los condensadores conectados al convertidor aumentan la diferencia de potencial entre sus bornes, por lo que aumenta la energía eléctrica que almacenan, por último se observa que el conjunto de condensadores esta en paralelo con la batería y el diodo, el cual impide el paso de corriente en el sentido opuesto al de descarga de la batería.

5.6. CÁLCULO PARA EL SISTEMA DE SUPERCONDENSADORES.

Los cálculos necesarios para definir el sistema de supercondensadores, se muestran a continuación.

El condensador almacena carga eléctrica, debido a la presencia de un campo eléctrico en su interior, cuando aumenta la diferencia de potencial en sus terminales. devolviéndola cuando ésta disminuye.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (5.1)$$

La energía almacenada viene determinada por la diferencia de potencial a la que se encuentra el supercondensador. Se asume como energía nominal, aquella que viene fijada por el voltaje nominal de la batería, pues este voltaje impondrá la diferencia de potencial en el sistema de condensadores.

$$E_n = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_n^2$$

Donde:

E_n = Energía nominal del supercondensador fijada por el voltaje de la batería.

C = Capacidad del supercondensador.

V_n = Tensión "nominal" del supercondensador fijada por la batería.

La suma de energía nominal más la energía de la frenada regenerativa, definen el voltaje máximos al que pueden trabajar los supercondensadores.

$$E_n + E_f = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{\max}^2 \quad (5.2)$$

Donde:

E_n = Energía nominal.

E_f = Energía de frenada.

C = Capacidad del sistema de supercondensadores.

Para calcular la energía máxima absorbida mediante el frenado, se desarrolla la siguiente ecuación:

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{\max}^2 - V_n^2) \quad (5.3)$$

Donde:

C = Capacidad del sistema de supercondensadores.

E_f = Energía de frenada.

V_{\max} = Tensión máxima del condensador, resultado de la suma de la tensión entregada por las baterías y el convertidor (durante frenadas regenerativas).

V_n = Tensión "nominal" del supercondensador fijada por la batería.

A continuación se plantean distintas capacidades y tensiones, de distintos condensadores para una misma energía de frenada.

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (V_{MAX1}^2 - V_N^2)$$

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot (V_{MAX2}^2 - V_N^2)$$

Donde:

E_f = Energía de frenada.

C = Capacidad del sistema de supercondensadores.

V_{max} = Tensión máxima del condensador, resultado de la suma de la tensión entregada por las baterías y el convertidor (durante frenadas regenerativas).

V_n = Tensión "nominal" del supercondensador fijada por la batería.

Partiendo de las dos ecuaciones anteriores y suponiendo una misma energía de frenado, se igualan ecuaciones y se deja la expresión en función de C_2 .

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{V_{MAX1}^2 - V_N^2}{V_{MAX2}^2 - V_N^2} \quad (5.4)$$

Donde:

E_f = Energía de frenada.

C = Capacidad del sistema de supercondensadores.

V_{max} = Tensión máxima del condensador, resultado de la suma de la tensión entregada por las baterías y el convertidor (durante frenadas regenerativas).

V_n = Tensión "nominal" del supercondensador fijada por la batería.

Por último se despeja de la ecuación anterior V_{max2} , obteniendo como resultado la siguiente ecuación.

$$V_{MAX2}^2 = V_N^2 + \frac{C_1}{C_2} \cdot (V_{MAX1}^2 - V_N^2)$$



Suponiendo que las capacidades utilizadas para los condensadores guarden la siguiente relación.

$$C_2 = 2 \cdot C_1 \quad (5.5)$$

Y que **Vn** y **Vmax1** valgan 100 y 200v respectivamente. Vmax2 tendría un valor de 158v, como se expone en la siguiente ecuación.

$$V_{MAX2}^2 = 100^2 + \frac{1}{2} \cdot (200^2 - 100^2)$$

$$V_{MAX2}^2 = 158v$$



6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1. CONCLUSION.

Llegado a este punto, se está en disposición de resumir y depurar lo obtenido durante la realización de este documento.

En primer lugar se realizó un trabajo de investigación, con el fin de obtener información general sobre baterías para vehículos eléctricos. Inicialmente se estudiaron los parámetros más importantes con respecto al funcionamiento de las baterías atendiendo exclusivamente un uso en competición:

- Energía Específica
- Potencia Específica
- Densidad de Energía
- Densidad de Potencia
- Capacidad de descarga.
- Voltaje por celda.

A continuación se estudiaron los diferentes tipos de baterías recargables existentes hasta la fecha. Los parámetros anteriores sirvieron para comparar los diferentes tipos de batería y poder elegir lo más adecuada para este propósito.

Actualmente la tecnología reina en el mercado de las baterías es sin lugar a duda la proveniente del litio, pues es el metal más ligero que existe, su peso atómico es muy bajo, además de poseer un gran potencial químico para crear baterías de gran capacidad con poco peso.

El resto de tecnologías han quedado obsoletas, debido a su escaso rendimiento y bajas prestaciones en comparación con las baterías provenientes del litio.

El Ni-Mh sigue usándose por la seguridad de sus celdas, por su facilidad de carga y por ser la tecnología no basada en el litio que más se puede acercar al rendimiento de las baterías de litio.

El Ni-Cd está en desuso por su bajo rendimiento y su alta toxicidad.

Las baterías de plomo están empezando a desaparecer, la única razón por la que actualmente permanecen es por su bajo precio, debido a años de desarrollo en el mercado automovilístico.

Las tecnologías actuales de baterías más adecuadas son:

➤ **Para un vehículo eléctrico de competición:**

El polímero de litio es la mejor opción para un vehículo eléctrico de competición pues posee en conjunto unas excelentes características. Aunque la característica que ha definido a estas baterías como las más adecuadas para la competición, es su extraordinaria capacidad de descarga, muy superior a cualquier otro tipo de química.

➤ **Para un vehículo eléctrico comercial:**

Para un vehículo en el que no se pretenda dar un uso deportivo, la opción más adecuada son las baterías de LiFePO_4 , pues poseen excelentes características como las que se citan a continuación:

Por lo tanto teniendo celdas con unas características similares al polímero de litio pero inferiores principalmente en capacidad de descarga. Se dispone de unas celdas extraordinariamente longevas a la par que resistentes, valores que las harán ideales para el uso en vehículos comerciales. Características que aun no pueden alcanzar las baterías de polímero de litio debido a su relativa fragilidad.

El estado actual de las baterías está en pleno desarrollo, por lo que se espera que en el futuro se consigan las prestaciones superiores a las actuales en periodo breve de tiempo.

Los BMS comerciales actuales poseen multitud de características de control que proporcionan un profundo seguimiento de las características de la batería. Se espera que en el futuro mejoren y aumenten los sistemas de control de los BMS, proporcionando una vasta cantidad de datos sobre la batería que estén tratando.

Los supercondensadores como apoyo a los motores eléctricos y como sistema de frenada regenerativa, proporcionan una notable mejora en el rendimiento del conjunto eléctrico, no solo por el aumento de autonomía que introduce el sistema de frenada regenerativa sino también por la mejora en la aceleración que el motor eléctrico consigue al tener en paralelo un condensador de tales dimensiones.



6.2. TRABAJOS FUTUROS.

La tecnología de baterías está evolucionando de la forma mencionada anteriormente. Por otro lado, el estado de la técnica en cuanto a BMS es el mencionado. Por lo tanto, el principal trabajo a desarrollar tras el presente PFC se basa en dos tareas:

- Desarrollo de propuestas de BMS que permitan cubrir las siguientes necesidades que aún no resuelven las soluciones actuales.
- Seguimiento de las nuevas tecnologías de baterías y supercondensadores que salgan al mercado y adaptación a las mismas de los diseños de los sistemas de almacenamiento (Matriz de Baterías + BMS).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Juan Carlos Viera. Pérez. “Carga rápida de baterías de ni-cd y ni-mh de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos”. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 2003
- [2] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf “A Guide to Understanding Battery Specificationsen” octubre 2010.
- [3] [http://es.wikipedia.org/wiki/Impedancia de salida](http://es.wikipedia.org/wiki/Impedancia_de_salida) “impedancia de salida”en febrero 2011
- [4] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 5, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [5] <http://es.wikipedia.org/wiki/Culombio> “culombio”en marzo 2011
- [6][http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa \(electricidad\)#Acumulador de plomo .28Pb.29](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_(electricidad)#Acumulador_de_plomo_.28Pb.29) “Acumulador de plomo (Pb)” en febrero 2010
- [7] Cristina Torrejón Pérez.: “Diseño de un pack de baterías para una motocicleta eléctrica”, Universidad Carlos III, 2010.
- [8] http://sergipool.blogspot.com/2007_09_01_archive.html “como conservar tus baterías del portátil y otros accesorios” en noviembre 2010
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery “Lithium-ion battery” en noviembre 2010
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery “Lithium iron phosphate battery” en noviembre 2010
- [11] <http://www.a123systems.com> “A123 system” en diciembre 2010
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery “Lithium-ion polymer battery” en diciembre 2010
- [13] A123 System.: “Características técnicas de la celda “26650” Disponible en: http://www.robotcombat.com/products/images/bp_configs/pdf/ANR26650M1.pdf
- [14] Gonzalo Chomón Pérez.: “Manual de uso de Baterías de polímero de litio” Disponible en: <http://www.rcmaterial.com/pdfs/LipoManualES.pdf>

- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_Management_System "Battery management system" [Wikipedia] en octubre 2010.
- [16] <http://www.mpoweruk.com/bms.htm> "Battery Management Systems (BMS) [electropaedia] en octubre 2010.
- [17] <http://www.mpoweruk.com/protection.htm> "Cell Protection" [electropaedia] en octubre 2010.
- [18] <http://es.wikipedia.org/wiki/Fusible> "Fusible" en octubre 2010
- [19] <http://es.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A9> "Rele" en octubre 2010.
- [20] http://es.wikipedia.org/wiki/Transistor_de_efecto_campo "transistor FET" en octubre 2010
- [21] <http://www.mpoweruk.com/balancing.htm> "Cell Balancing" en octubre 2010
- [22] <http://www.mpoweruk.com/demand.htm> "Demand Management" en octubre 2010
- [23] <http://www.mpoweruk.com/soc.htm> "State of Charge (SOC) Determination" en octubre 2010
- [24] <http://www.mpoweruk.com/soh.htm> "State of Health (SOH) Determination" en octubre 2010
- [25] <http://www.mpoweruk.com/authentication.htm> "Authentication and Identification" en octubre de 2010
- [26] http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_de_alta_capacidad "Condensador de alta capacidad" en enero 2010
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor "Electric double-layer capacitor" en enero 2011
- [28] http://es.wikipedia.org/wiki/Freno_regenerativo "Freno regenerativo" en enero 2011
- [29] http://en.wikipedia.org/wiki/Regenerative_brake "Regenerative brake" en enero 2011
- [30] Ismael Simón Carrasco.: "Fabricación de baterías de litio", pp. 9, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>

- [31] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 10, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [32] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 12, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [33] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 14, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [34] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 19, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [35] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 21, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [36] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 24, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [37] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 25, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [38] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 26, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [39] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 27, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [40] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp. 29, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [41] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp.35, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [42] <http://www.miliamperios.com/> “Como y que factores afectan a la vida de las baterías de litio” en noviembre 2010
- [43] Ismael Simón Carrasco.: “Fabricación de baterías de litio”, pp.36, Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/22631266/BATERIAS-DE-LITIO>
- [44] http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo_Zener Diodo Zener, Mayo 2010.



LISTA DE ABREVIATURAS

Ni-Cd	Níquel cadmio.
Ni-MH	Níquel-hidruro metálico
PB	Plomo
LIPO	Batería de iones de polímero de litio
LiCoO ₂	Óxido de cobalto litio
LiFePO ₄	Fosfato de hierro litio
SOH	State Of Health
SOC	State of charge
DOD	Depth of discharge