

DISEÑO DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (Li) Y SISTEMAS DE CONTROL PARA BOMBA ELÉCTRICA PARA UN MOTOR COHETE

G. Garaventa^{a,b}, A. Patanella^a, M. Actis^a

guillermo.garaventa@ing.unlp.edu.ar, ajpatane@ing.unlp.edu.ar, mactis@ing.unlp.edu.ar

^aCTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Universidad Nacional de La Plata Calle 116 e/47 y 48 (1900) La Plata, Argentina. <http://www.cta.ing.unlp.edu.ar>. cta@ing.unlp.edu.ar, ^b Investigador Independiente: CIC (Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Bs.As.)

RESUMEN

El avance continuo de las tecnologías de almacenamiento de iones de litio ha demostrado al mundo que es factible movilizar vehículos terrestres y aéreos puramente eléctricos. A su vez, los actuales motores Brushless (BLDC) de alta eficiencia, sin mantenimiento y bajo peso, nos dan mayor confiabilidad en este desafío. En este trabajo se analizan los requerimientos necesarios para poder utilizar energía eléctrica almacenada en baterías, con el objeto de energizar una bomba eléctrica de aplicación para motores cohete del tipo pump-fed. Se analizan fundamentalmente los aspectos involucrados en el diseño, construcción y operación de las unidades de almacenamiento de energía eléctrica, en particular utilizando celdas de litio de tecnología LiFePo₄. Se hace la comparación de pesos a partir de la utilización de otras tecnologías de almacenamiento. La primera tarea que se realiza es determinar qué potencia eléctrica se requiere en el motor eléctrico COTs para ajustarse a los parámetros de funcionamiento de la bomba. Luego se describirán los pasos necesarios para construir una batería asociada a tal aplicación, detallando y mostrando aspectos funcionales de las celdas individuales, perfiles de temperatura, así como también la forma de carga y de interconexión entre celdas. Se explicará el por qué se ha seleccionado la tecnología de LiFePo₄, comparándola con las de litio cobalto o litio manganeso. Con la utilización de celdas de iones de litio, es necesario contar con un sistema de control BMS (Battery Management System) que evalúe el estado de carga de las celdas individuales. Con adecuadas estrategias de selección de pilas se puede lograr obtener los parámetros óptimos para una operación segura.

1. INTRODUCCIÓN

A comienzos de la década de 1830 y con el control de la fabricación de motores eléctricos y de baterías afianzado, el hombre diseña su primer vehículo eléctrico mucho antes que aquellos que funcionarían a combustión interna [1].

Si bien los motores eléctricos fueron evolucionando muy rápidamente hacia eficiencias mayores, las baterías no lograban alcanzar densidades de energía acordes al desafío de fabricar vehículos

puramente eléctricos. Es decir, las densidades de energía (Wh/kg) eran tan bajas que no permitían pensar en la propulsión eléctrica pura más allá de una prueba de validación tecnológica. Si bien las investigaciones sobre posibilidades de almacenamiento siempre fueron en busca de maximizar la energía específica, no fue sino hasta que surgieron las tecnologías de litio que ese número creció de manera sustancial.

A partir de nuevos desarrollos de motores eléctricos y de los primeros

desarrollos de pilas de litio llevados a cabo por la empresa Sony en 1991, se comenzó a vislumbrar la factibilidad concreta del desarrollo de vehículos puramente eléctricos. Estas nuevas tecnologías de litio mostraban una sustancial mejora con respecto a otras posibilidades de almacenamiento tales como baterías de plomo-ácido (*lead-acid*), níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel metal-hidruro (NMHi), etc. [2].

La **Figura 1**, obtenida de la página oficial de Incell International [3], muestra la evolución práctica que fueron teniendo las distintas baterías para almacenamiento electroquímico de energía y su notable incremento en las diferentes tecnologías de litio.

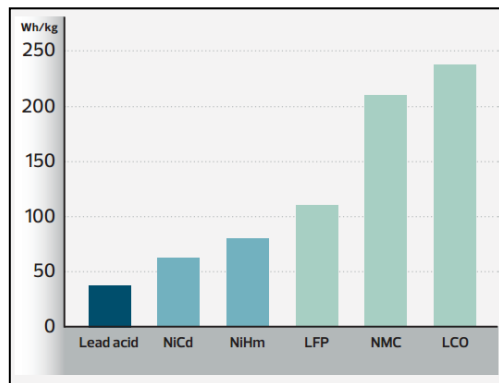


Figura 1: Evolución de la densidad de energía en baterías

Con el advenimiento de las tecnologías de litio-ion, tanto la densidad de energía como la seguridad operativa aumentaron a tal punto que actualmente se observan distintos desarrollos de vehículos puramente eléctricos, tales como autos, lanchas, máquinas herramientas de uso industrial y aviones, todos ellos movilizadas desde una batería construida en base a pilas de iones de litio.

El propósito de este trabajo es explicar cuál es la tecnología de iones de litio más adecuada para una aplicación en una aeronave, basándonos en los resultados obtenidos en distintos desarrollos y aplicaciones concretas realizadas desde el Grupo Ensayos Mecánicos Aplicados primero, y luego en el Centro Tecnológico

Aeroespacial de la UNLP durante los últimos 10 años.

Para comenzar con el desarrollo del propósito de esta publicación, es necesario definir primero cuáles entre todas pilas de iones de litio comercialmente disponibles debemos utilizar. Primero haremos una breve mención de cada una de las tecnologías disponibles en el mercado de pilas de iones de litio, luego una descripción que contemple: su energía específica, sus posibilidades de drenaje de corriente y la seguridad operativa. Posteriormente justificaremos y seleccionaremos una de esas tecnologías, para luego, y en base al cálculo de energía eléctrica requerida en la aplicación, calcular y diseñar la batería.

2. BATERÍAS DE LITIO

2.1 Tecnologías de iones de litio

Existen varias tecnologías de pilas de iones de litio comercialmente disponibles [2,4], las más prometedoras se presentan a continuación:

- LCO (litio-óxido de cobalto)
- NCM (litio-níquel-cobalto manganeso)
- NCA (Litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio)
- LFP (litio-hierro-fosfato)
- LTO (litio-óxido de titanio).

Cada una de ellas presenta ventajas y desventajas. La **Tabla 1** resume brevemente las características sobresalientes de cada una de ellas. Esta tabla fue completada desde datos de ciclado realizados en laboratorio y de hojas de datos extraídos de distintos fabricantes, como *Headway*, *Optimum*, *Sony*, *LG* y *Al23*. La abreviatura C representa la carga en Ampere-horas de la batería.

Conociendo la aplicación deseada, uno debería basarse en los siguientes criterios para la selección de la tecnología:

1. Energía específica
2. Potencia específica
3. Seguridad operativa
4. Complejidad de ensamble
5. Electrónica de medición y control (BMS).

Es muy difícil encontrar actualmente una tecnología que maximice estos cinco criterios. Esto es, alta densidad de energía, alta densidad de potencia, gran seguridad intrínseca de las celdas en operación y baja complejidad en el BMS y el ensamble.

Si bien existen celdas de hasta 350Wh/kg, que serían óptimas para aplicaciones aeroespaciales en cuanto a densidad de energía, no lo son tanto respecto de la seguridad operativa y drenajes de alta corriente [5].

De la experiencia recolectada en nuestro grupo de trabajo, en el Centro Tecnológico Aeroespacial de la UNLP, en ciclados de laboratorio en distintas celdas desarrolladas para distintas aplicaciones, la tecnología de LFP demostró ser la más segura en operación, soportando agresiones de sobretensión y corrientes, tales como accesos a 5V por celda, sin deterioro visible, y ciclado en corrientes de carga y de descarga de 20 C hasta 2V sin deterioro aparente en 200 ciclos ejecutados. Obviamente, estos excesos quitan vida útil a las celdas pero no ponen en riesgo al sistema desde el punto de vista de una explosión o incendio. La menor energía de esta tecnología se ve compensada por la disminución o anulación de electrónica de control sobre las celdas individuales.

La experiencia nos ha demostrado que haciendo una adecuada selección de celdas es posible interconectar pilas en serie y paralelo, sin más que un sistema de medición sobre las celdas individuales. Esto permite que el BMS sea solamente un sistema de medición de tensiones, corrientes y temperaturas, que además calcula el estado de carga (SOC, por sus

siglas en inglés) a partir de la integral de la corriente de carga y descarga.

Parámetro	Tecnologías de litio				
	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Fabricación	1991	1996	2008	1999	1996
Voltaje nominal(V)	3.6	3.7	3.6-3.7	3.6	3.2-3.3
Voltaje de operación (V)	3.0 a 4.2	3.0 a 4.2	3.0 a 4.2	3.0 a 4.2	2.5 a 3.65
Energía específica (kW-h/kg)	100-200 (max 240)	100-150	150-220	200-260 (max 300)	90-140
Carga (en términos de C) (A)	0.7C a 1C típico	0.7 a 1C típico, 3C máximo	0.7 a 1C	0.7C	1C
Descarga (en términos de C) (A)	1C hasta 2.5V	1C, 10C y 30C en pulsos	1C, 2C hasta 2.5V	1C	1C, 25C y 40C en pulsos
Ciclos de vida	300 a 500. Depende del DOD, la corriente y la temperatura.	300 a 700. Dependen del DOD y de la temperatura	1000-2000. depende del DOD y la temperatura	500 dependiendo del DOD y la temperatura	1000-2000
Respuesta térmica (°C)	150°C en sobrecarga	250°C en sobrecarga	210°C en sobrecarga	150°C en sobrecarga	120°C muy seguras
Autodescarga %/mes	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10	5 a 10
Aplicaciones	Celulares, tablets, laptops, cámaras.	Herramientas eléctricas, equipos médicos, trenes eléctricos	Bicicletas eléctricas, equipos médicos, Vehículos Eléctricos, uso industrial	Equipos médicos, aplicaciones industriales, trenes eléctricos (Tesla)	Vehículos eléctricos, lanzadores, bicicletas eléctricas
Observaciones	Cargas y descargas mayores a C deterioran sus ciclos de vida. El cobalto es caro y contaminante. Baja densidad de potencia	Mayor potencias con menos capacidad. Más seguras que las litio cobalto	Alta capacidad y alta potencia. Mayor seguridad operativa que la anteriores.	Similar a LCO pero con mayor energía específica	Tensiones menores a 2.5V causan daño. Potencial de descarga muy plano. La más segura de las tecnologías actuales.

Tabla 1: Características de las distintas baterías de litio

El proceso de selección se basa en evaluar los resultados de aplicar varios ciclos de carga y descarga para establecer la capacidad de la celda, mediciones de impedancia, ensayos a altos niveles de corriente de carga y descarga, y ensayos de estabilidad del estado de carga en reposo.

2.2 Tipos de conexión y sus características

La interconexión entre celdas puede realizarse de diferentes formas, cada una con ventajas y desventajas.

Es inevitable el tener que conectar celdas en serie para alcanzar las tensiones de alimentación requeridas. Para la tecnología LiFePO_4 la tensión nominal de operación ronda los 3.3V (desde un estado del 100% de SOC), con lo cual se necesitan 16 celdas en serie para tensiones de salida del orden, por ejemplo, de los 50V.

La conexión en paralelo es necesaria cuando se requiere el almacenamiento de grandes cantidades de energía o el suministro de altas potencias. Esto podría no ser necesario para verificar los requerimientos de desempeño con celdas de alta capacidad y/o potencia, pero es el único recurso para contar con tolerancia a fallas simples.

Hay dos formas de interconectar celdas para conformar una batería, ilustradas en la **Figura 2**:

- Paralelos de series
- Series de paralelos

Para una supervisión completa del estado de la batería se requiere conocer la tensión de cada celda, su temperatura y la corriente que circula por ella. En el caso de conectar paralelos de celdas en serie se requiere un sensor de tensión para cada paralelo, pero un sensor de corriente por cada celda. Esto último en general es prohibitivo, dada la complejidad de la instrumentación si se pretende una medición no invasiva. Por este motivo resulta más atractivo conectar series de celdas en paralelo.

Con celdas de 130 Wh/kg, disponibles en el mercado, se pueden alcanzar densidades de energía efectivas en baterías de más de 70 Wh/kg y densidades de potencia de pico del orden de los 1,5kW/kg.

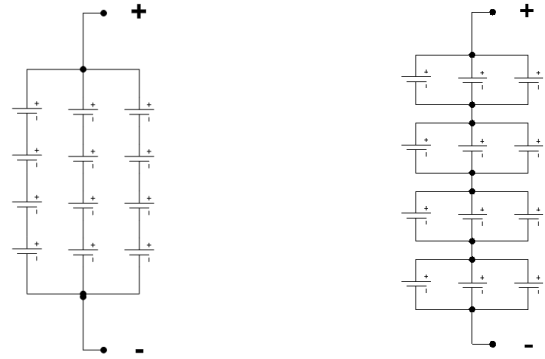


Figura 2: Configuraciones de conexión. Izquierda: paralelos de series, derecha: series de paralelos.

Otro punto a considerar se refiere a la modularización de la batería cuando se requiere alcanzar elevadas tensiones en el bus de potencia. Debe tenerse en cuenta el riesgo por choque eléctrico que implica la manipulación de elementos con tensiones elevadas. La corriente que circula por un cuerpo humano en contacto con una fuente de tensión depende del camino conductivo en el cuerpo, humedad y estado de la piel en la zona de contacto, y además varía entre individuos. Más allá de todos estos factores se considera que el riesgo comienza para tensiones por encima de los 60V. Esta clase de problemas puede reducirse cuando se requieren altas tensiones utilizando una interconexión en serie de módulos diseñados de hasta 60V.

Para tensiones de salida por encima de los 200V surgen problemas adicionales a la hora de diseñar los sistemas de sensado de tensiones de celda, por los elevados “voltajes de modo común” que deben ser rechazados en la electrónica de sensado; y por la susceptibilidad al efecto corona para vehículos estratosféricos, particularmente al atravesar la ionósfera [6]. Esto último también impacta en el diseño del sistema electrónico de control de motores eléctricos, pero en última instancia todo se reduce a un tema de aislación, buenas técnicas de diseños de impresos y de diseños mecánicos que no generen concentraciones de campo eléctrico (superficies redondeadas y sin

ángulos rectos cerca de potenciales elevados).

Para celdas de litio es crítico evitar la sobre-descarga, tanto o más que evitar la sobrecarga. La tecnología de LiFePO_4 es tolerante a sobrecargas de hasta 5V. Pero en sobre-descarga, esto es, bajando la tensión por debajo de 2V, se entra en una “zona de no retorno” que culmina con su rotura, lo que implica un estado de impedancia cercana a 1Ω (contra una impedancia normal de $2\text{m}\Omega$), perdiendo la capacidad de almacenar energía [4]. Esto impone ciertos factores de seguridad en cuanto al dimensionado de la capacidad de almacenamiento si se pretende tolerar un cierto nivel de desbalance entre las capacidades de las diferentes celdas que componen la batería.

Finalmente debemos mencionar que tanto el esquema de interconexión interno como el externo de las unidades de almacenamiento deben diseñarse con ciertos cuidados si se pretende contar con tolerancia a falla simple. Como puntos de falla debemos considerar la desconexión de un conector, falla en la soldadura de algún pin, posibilidad de cortocircuito de las líneas potencia entre sí o con la estructura, etc. Esto implica disponer de protecciones eléctricas independientes para cada línea de suministro de potencia, tanto dentro de la unidad como en la carga, a fin de no propagar la falla de una línea a las demás. De preferencia deberían recibirse las líneas en la carga con sumas diódicas, pero para alta potencia esto no resulta aceptable por lo cual recaemos en el uso de fusibles.

Como parte del esquema de distribución eléctrica interna de la unidad se debe disponer de un mecanismo de armado (llave de seguridad) que permita desvincular las celdas de las conexiones externas para almacenamiento y transporte.

3. DISEÑO DE LA BATERÍA PARA UNA TURBOBOMBA

3.1 Estimación de potencia

El uso de una electrobomba simplifica el sistema turbo-bomba reduciendo el peso del conjunto en casi un 30% para motores de etapas superiores. Estos sistemas no son viables para motores de alto empuje donde la turbobomba permite lograr los requerimientos de alta presión y alto caudal a peso menor. El sistema de electrobomba se propone utilizar en un motor con las siguientes características [12]

Parámetros para el diseño del motor	
Tipo de propelentes	Oxidante: LOX. Combustible: CH ₄ .
Sistema de alimentación	Mediante electrobombas
Presión absoluta en cámara de combustión	35 kg/cm ²
Empuje a tobera adaptada	3000 kgf
Altura de adaptación de tobera	85 km
Relación de mezcla másica R=O/F	3,2
Tiempo de quema nominal	400 seg
Diseño de cámara de empuje	Refrigerada + Radiativa

Tabla 2: Parámetros básicos para diseño del motor.

Para lograr estas características en el motor es necesario contar con un sistema de electrobombas con la siguiente performance, [13]

PARAMETROS	VALOR		UNIDAD
	CH4	LOX	
BOMBAS			
Caudal másico impulsado	1,92	6,1	Kg/s
Caudal volumétrico impulsado	0,00449	0,0053	m³/s
Presión de descarga	60	47	Kg/cm2
Numero de revoluciones	15000		rpm
Potencia consumida	51,1	47,3	HP
Torque consumido	244,1	225,9	kgcm
PROPELENTES DE LA ETAPA			
Masa de propelente consumida	771,4	2468,6	kg
Volumen de propelente ocupado	1796,6	2122,7	litros

Tabla 3: Parámetros del sistema mediante electrobombas.

3.2 Cálculo de la corriente y capacidad de las baterías

En primer lugar seleccionamos un bus de tensión de valor lo más alto posible. Es por eso que seleccionamos uno que se encuentre en el entorno de los 300V. Esto nos garantiza que la corriente será menor que si utilizáramos un bus de menor tensión. Para eso, considerando 80 celdas en serie y de tecnología LIFEP04, obtenemos una tensión media de 264V (a 3,3V/celda), luego verificamos si las corrientes circulantes cumplen con los requisitos para que en el vuelo la corriente se mantenga en un valor $< C$ Amperes, donde C es la capacidad de la batería.

Considerando una potencia requerida por cada turbo bomba de 50Hp (37Kw), la corriente será:

$$\frac{\text{Corriente de despegue} = \frac{\text{Potencia en despegue}}{\text{Tensión de Bus}} = \frac{37 \text{ kW}}{264 \text{ V}} = 140 \text{ A}}$$

Esta corriente acota la selección de la celda debido al valor de este requerimiento. Un criterio sería apuntar a conseguir un tipo de celda que puedan drenar picos de este nivel de corriente a pesar que, desde el punto de vista de la confiabilidad, no sea la mejor opción.

Para calcular la capacidad de la batería debemos considerar el tiempo de uso en vuelo. En este caso el uso queda definido en 400 segundos.

$$\text{Capacidad de la batería (Ah)} = I \text{ en vuelo} * \left(\frac{400}{3600}\right) h = 140A * 0,12h = 16,8Ah$$

En resumen se requiere una batería de al menos 264voltios de tensión de bus y una capacidad mínima de 16,8Ah

3.3 Selección de celdas

Hay un gran abanico de fabricantes de celdas de LiFePO_4 , tanto en formato cilíndrico como prismáticas. Por razones obvias, las prismáticas dan mejor relación de energía vs volumen de empaquetado, por lo que son las de ese formato las que

utilizaremos. Por otro lado las celdas con empaquetado polimérico son aquellas que presentan la mejor relación energía/peso, por lo que son estas las que seleccionaremos.

Existen numerosos proveedores que brindan este tipo de celdas. El problema es la gran dispersión de fabricación que presentan sus productos. Por tal motivo, para garantizar homogeneidad en la capacidad de las pilas en un ensamble balanceado de la batería, es necesario comprar un lote mayor, de al menos cuatro veces el valor requerido, y seleccionar de este lote las pilas que permitan obtener una batería de óptima performance. Otra posibilidad es adquirir celdas de fabricantes reconocidos, que con un costo mayor por unidad, garantizan una performance individual muy buena. En la experiencia del grupo de trabajo un ejemplo de esta calidad lo ofrece la empresa *A123*, que fabrica este tipo de celdas con una tecnología de nanofosfatos, lo que además maximiza las corrientes de descarga. La Figura 3 muestra un resumen de características de una celda de la empresa *A123 System* [8].

AMP20 Cell Specifications	
Cell Dimensions (mm)	7.25 x 160 x 227
Cell Weight (g)	496
Cell Capacity (minimum, Ah)	19.5
Energy Content (nominal, Wh)	65
Discharge Power (nominal, W)	1200
Voltage (nominal, V)	3.3
Specific Power (nominal, W/kg)	2400
Specific Energy (nominal, Wh/kg)	131
Energy Density (nominal, Wh/L)	247
Operating Temperature	-30°C to 55°C
Storage Temperature	-40°C to 60°C



Figura 3: Datasheet de la celda Modelo AMP20 de A123.

Como puede verse, esta celda presenta una capacidad de al menos 19,5Ah, una densidad de energía de 131Wh/kg, una tensión nominal de 3,3V y puede entregar

1200W, es decir 360A en una descarga continua.

La Figura 4 [9] muestra la performance de la celda *A123 modelo AMP20M1HD-A*, a 40A (2C), 100A (5C) y 200A (10C). Puede verse que otra característica importante de estas celdas es la horizontalidad de su perfil de potencial, además de mostrar que, independientemente de la corriente de descarga que circule, entrega más de 20Ah.

Cabe acotar que estas celdas no soportan vacío por lo que debe construirse un contenedor que contenga al ensamble y garantice la operación en vacío.

Por estas prestaciones y por haberla utilizado en distintas pruebas de laboratorio, es que se selecciona esta celda para construir la batería.

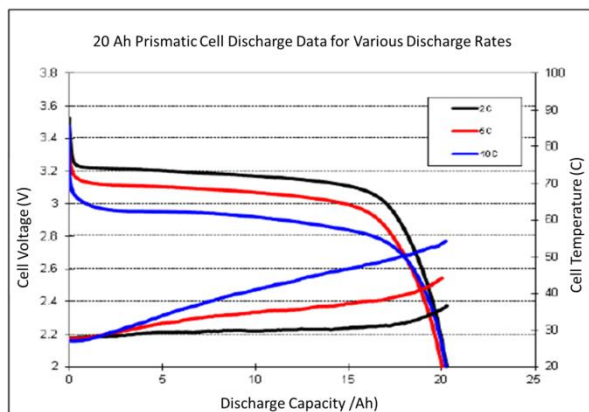


Figura 4: Performance de la celda *A123 modelo AMP20M1HD-A*

3.4 Conformación y topología de la batería

En función de la experiencia recolectada en aplicaciones realizadas, se ha visto que la topología de serie de paralelos (Figura 2), ofrece dos ventajas importantes:

- Minimiza el impacto de la dispersión en las celdas
- Minimiza la cantidad de canales de medición de variables de batería

Por otro lado debemos considerar la modularidad de la batería en secciones de menor tensión que permitan su manipulación segura e instalación rápida.

La capacidad mínima de la celda elegida garantizada en la hoja de datos es de 19,5Ah. En ensayos de laboratorio realizados por nuestro grupo, se verificó esto con los resultados obtenidos durante el ciclado de más de 400 celdas. En esos casos el valor mínimo de capacidad obtenido no fue menor a 20,5 Ah.

Para obtener la capacidad inicial calculada de 16,8Ah no se requiere más que una celda.

Por otro lado, para llegar a una tensión nominal de 264V y considerando una tensión de celda nominal de 3,3V podemos calcular la cantidad mínima de celdas en serie:

$$\text{Cantidad de celdas en serie} = \frac{\text{tensión de bus mínimo}}{\text{tensión de nominal de celda}} = \frac{264V}{3,3V} = 80$$

Dado que resultó un número par, podemos diseñar 5 módulos de 16 celdas en serie, con tensión máxima por módulo inferior a los 60V (máxima tensión soportada por el cuerpo humano). De esta manera, cada módulo quedará compuesto por una serie de 16.

Los módulos así conformados quedarán con las siguientes especificaciones.

- Tensión nominal del módulo=52,8V
- Tensión máxima del módulo=58,4V
- Capacidad del módulo= 20,5Ah
- Cantidad de celdas por módulo=16
- Peso del módulo (solo celdas)=8kg
- Peso contenedor y cables estimado=8 kg
- Peso total del módulo=16 kg
- Corriente máxima de descarga continua =360A

Para integrar exitosamente una gran cantidad de celdas, debe considerarse el hecho de que estas deben estar inicialmente en un estado de carga lo más homogéneo posible. Esto, que parece algo menor, hace una gran diferencia a la hora de garantizar la seguridad operativa y la vida útil de los módulos.

Este módulo así construido, permite conformar una batería con las siguientes características:

- Cantidad de módulos = 5
- Tensión nominal = 264V
- Tensión máxima = 292V
- Capacidad de la batería = 20,5Ah
- Peso de la batería completa = $5 \times 16\text{Kg} = 80\text{Kg}$
- Corriente máxima de descarga continua = 360A
- Energía específica real = 67,7Wh/kg.

Esta batería cumple exactamente con los requerimientos, y además posee un margen de capacidad de 3,7Ah (20,5Ah-16,8Ah).

Cuando se diseña la batería, se está considerando que durante el proceso de carga todas las celdas llegan al 100% SOC en el mismo instante y además cuando se descarga, todas llegan a 2V al mismo tiempo.

La realidad es que esto no ocurre así. Asumiendo que todas las celdas fueron incorporadas a los módulos con el mismo estado de carga (SOC) durante la fase de integración, con solo considerar la dispersión de fabricación, ya no puede cumplirse lo anteriormente dicho. Por tal motivo la sobredimensión en capacidad es la alternativa que cubre este problema manteniendo el criterio de no aumentar la complejidad del BMS. Este margen de 3,7Ah da esa cobertura adicional necesaria para garantizar la aplicación en al menos 400 segundos.

Esta batería así conformada puede ser cargada hasta el 95% de SOC y descargada hasta el 100% de DOD

("depth of discharge"). Esto da una utilidad neta de capacidad del 90% real de la instalada. Esto significa que la capacidad real de uso será de:

$$\text{Capacidad Util (Ah)} = 0.95 * 20,5\text{Ah} = 19,5\text{Ah}$$

No debemos olvidar que además la eficiencia de conversión del motor y de su controlador no es del 100%. Este es otro motivo para sostener la capacidad real por encima del cálculo teórico. Por otro lado es necesario reservar energía para los consumos de los sistemas de control. Por tal motivo la diferencia de capacidad entre los 19,5Ah y los 16,8Ah iniciales (2,7 Ah de exceso) permite cubrir todas las alternativas de consumo.

3.5 Sistema de medición de parámetros de batería (BMS)

Con una selección adecuada de celdas, ya sea a partir de ensayos de ciclado que permitan discriminar las mejores desde un lote superior, o a partir de la compra de celdas de alta calidad, es posible sostener una gran cantidad de ciclos de carga-descarga sin ningún tipo de electrónica de equalización.

Cabe destacar que utilizando celdas de tecnología como las de NCA, se obtienen energías específicas del orden de los 300Wh/kg. Las baterías construidas desde estas celdas exigen una mayor complejidad en el BMS, teniendo que incorporar sistemas de equalización, lo que deteriora drásticamente tanto la confiabilidad como así también el valor de la energía específica del conjunto. El caso del avión Solar Impulse es un ejemplo de ello. Este avión utilizó celdas experimentales con una densidad de energía de más de 250Wh/kg. No se pudo completar la hazaña de realizar la vuelta al mundo con el pack de baterías original, ya que después de cruzar el Océano Pacífico todas las baterías llegaron a su límite de vida útil por lo que debieron ser reemplazadas, lo que produjo demoras

considerables para la finalización de la epopeya [10].



Figura 5: Sistema de medición de parámetros de batería (BMS)

La experiencia recopilada durante estos últimos 6 años, nos ha permitido desarrollar baterías LiFePO_4 para su instalación y prueba en vehículos (moto, triciclo, colectivos, etc.), donde, con solo medir tensión, corriente y temperatura, y calculando la capacidad residual, no se presentaron inconvenientes ni necesidad de cambio de celdas individuales.

La Figura 5 muestra un desarrollo realizado para monitorear 16 tensiones, ocho temperaturas, dos corrientes, aceleración en tres ejes y dos puertos de comunicaciones RS-422. Este sistema se conecta a una computadora vía RS-422 transfiriendo información que se utiliza para generar un diagnóstico de estado de carga y salud de cada módulo.

3.6 Cambio de tecnología de celdas

A modo de ejemplo, consideremos el cambio de tecnología a las de NCA.

En este caso podemos encontrar celdas de formato 18650 cilíndricas con las siguientes características

Proveedor	AWT
Tecnología	NMC
Formato	cilíndrica
Modelo	18650
Consumidor	N/D
Tensión nominal (V)	3,7
Tensión máxima en carga (V)	4,2
Tensión mínima en descarga (V)	2,5
Energía específica Gravimétrica (Wh/kg)	192,4
Energía específica volumétrica (Wh/l)	N/D
Potencia específica gravimétrica (W/kg)	no informada
Peso celda (gr)	50
Capacidad (Ah)	2,6
Imax descarga continua (A) (25C)	35
Carga CC-CV: C/2 hasta 4,2V luego CV a 65mA (aprox 4hs) (A)	2
Ciclos de vida (CC-1C hasta 2,5V cut-off at 25°C) al 80% de SOC eol	>500
Dimensiones celda (mm)	18*650
Resistencia interna (milliohms)	40 a 50

Estas pilas son utilizadas en aplicaciones tales como: Car, Bus, UPS, Electric Power, Lighting, Electric Bicycle, Boat, Vapor, Flashlight, Power Tool.

Considerando la fabricación de un solo módulo de batería de 72 pilas en serie y con 6 en paralelo. Utilizando la configuración de serie de paralelos, se obtiene la siguiente batería:

Conformación del Módulo	
El módulo tendrá una configuración	6p72s
Cantidad de celdas en el módulo	432
Peso en celdas (Kg)	21600
Peso caja, harness, etc considerando un 30% (gr)	6480
Peso total módulo (gr)	28080

Con esta batería de 28,1Kg se obtiene un tiempo de vuelo de 407 segundos.

Si bien el peso de esta batería comparada con los 80Kg de LiFePO_4 resulta muy inferior, no se debe perder de vista que la confiabilidad se deteriora producto de que estas celdas son mucho menos tolerantes a exigencias de uso. Por eso requieren de BMSs muy complejos que deben monitorear gran cantidad de celdas.

De lo contrario, si el BMS no se utiliza, es necesario una sobredimensión en la capacidad de al menos un 100%, con lo cual la batería rondaría los 56Kg.

Si bien el número del peso sigue siendo inferior al de LiFePO_4 , aumenta considerablemente la complejidad del ensamble de las más de 860 celdas cilíndricas. Este juego de ensamblar baterías que contemplen diferentes confiabilidades y pesos es un juego que debe establecerse en la realidad dado que del uso real se extraen los conocimientos del uso de baterías con gran cantidad de pilas.

Como dato adicional, el automóvil eléctrico de TESLA utiliza más de 7000 celdas de este formato con un peso superior a los 600Kg y logran tener una confiabilidad muy alta utilizando el concepto de sobredimensión de la batería.

4. CONCLUSIONES

Si bien existen actualmente celdas con energías específicas superiores a las de LiFePO_4 , la tolerancia de estas últimas a sobretensiones y corrientes elevadas, tanto en carga como en descarga, las hace una de las tecnologías más seguras (en este momento) para una operación como la pensada en este trabajo. Por otro lado, es actualmente la más amigable con el medio ambiente y la más barata con respecto a tecnologías de mayor energía específica.

Si bien la tentación de utilizar tecnologías con mayor densidad de energía es muy alta para aplicaciones aeronáuticas específicas, la complicación del BMS requerido y la disminución de la confiabilidad hacen que no constituyan la mejor opción para esta aplicación. Tanto el ejemplo mencionado del Solar Impulse, como el caso ocurrido con las baterías del Boeing 787-8, JA829J, Japan Airlines del 13 de junio de 2013 [11] son ejemplos de ello.

La República Argentina cuenta en su territorio con reservas de litio de muy alta pureza y costos de extracción de los más bajos del mundo. Es imperiosa la necesidad de procesar ese mineral en origen para generar valor agregado y fuentes de trabajo calificado. Dentro de las numerosas aplicaciones de las baterías de litio, la aeronáutica surge como una posibilidad para desarrollos de tecnologías de punta.

Los números presentados en este trabajo permiten afirmar que, utilizando una de las tecnologías más seguras actualmente (LFP) de disponibilidad en el mercado y producida a partir de materia prima obtenida en nuestro país, la construcción nacional de un avión no tripulado a propulsión eléctrica es absolutamente factible.

AGRADECIMIENTOS

El ingeniero Garaventa agradece a la Comisión de Investigaciones Científica de la Provincia de Buenos Aires por el apoyo

recibido, y al Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) de la Universidad Nacional de La Plata por el financiamiento y acompañamiento en los distintos trabajos realizados.

REFERENCIAS

- [1] C. C. Chan, "The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: lessons learned", *Proc. IEEE*, vol. 101, No. 1, pp. 206–212 Jan. 2013.
- [2] N. Nita, F. Wu, J. T. Lee, and G. Yushin, "Li-ion battery materials: present and future". *Materials Today*, vol 18, June 2015.
- [3] Incell Int. AB: "Comparison of Common Lithium Technologies". [Online] Available: http://incellint.com/wp-content/uploads/2016/06/Comparison_Common-Lithium-Technologies_.pdf
- [4] A. Chagnes and J. Swiatowska, *Lithium Process Chemistry*. Ed. Elsevier, 2015.
- [5] F. Fusalba, "Batteries", Documento del Comisariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, Francia, 2012 [Online]. Available : <http://www.leti.fr/en/content/download/2019/25895/file/131106%20Batteries.pdf>.
- [6] A. Whittlesey, "MISR Corona Issues", JPL IOM 5215-94-75 (MISR DFM # 380), March 17, 1994.
- [7] "Solar Impulse", 2016 [Online]. Available: <https://www.solarimpulse.com/adventure#zero-fuel-aircraft>.
- [8] A123 Systems Datasheet "Nanophosphate® Lithium Ion Prismatic Pouch Cell AMP20m1HD-A", 2014.
- [9] A123 Energy Solutions, "Battery Pack Design, Validation, and Assembly Guide Using A123", Feb. 2014.
- [10] "Solar Impulse Around the World". Press release June 2015 [Online]. Available: <http://info.solarimpulse.com>
- [11] National Transportation Safety Board, Interim Factual Report NTSB Case Number DCA13IA037, January 7th 2013.
- [12] A. Patanella, M. Actis, "DISEÑO DE UN MOTOR COHETE PARA ETAPA SUPERIOR CON PROPELENTES LOX/CH₄", Noveno Congreso Argentino de Tecnología Espacial (CATE), 26-29 Abril de 2017
- [13] A. Patanella, G. Garaventa, M. Actis, "TURBO-BOMBAS VS. BOMBAS ELÉCTRICAS", Noveno Congreso Argentino de Tecnología Espacial (CATE), 26-29 Abril de 2017