

Alternativas de baterías para el modelo de prueba del EPS de un CubeSat

Elyka Abello

Dirección de Investigación e Innovación Espacial
ABAE
Borburata, Venezuela
eabello@abae.gob.ve

Carlos Salinas

Centro de Ingeniería Eléctrica y Sistemas
FIIDT
Caracas, Venezuela
csalinas@fii.gob.ve

Resumen—Esta investigación realizó un estudio del estado del arte de las baterías utilizadas durante los últimos dos años por nano-satélites desarrollados bajo las especificaciones del estándar CubeSat 1U del Politécnico de California. Se identificaron y clasificaron según su tecnología las baterías de cuarenta y cuatro (44) misiones lanzadas desde julio 2012 hasta julio 2014 más tres (3) que están aún en proyecto, consiguiendo información de la capacidad de las celdas de más de veinte (20) de ellas. Se analizaron las características de las baterías más utilizadas entre las misiones estudiadas y se identificaron equivalentes comerciales disponibles en el mercado Venezolano, que presentaran características de desempeño eléctrico similares con el fin de utilizarlas en las pruebas funcionales del prototipo de una tarjeta de alimentación de energía eléctrica de un CubeSat 1U. Luego del análisis de las baterías comerciales identificadas se realizó una propuesta de la más idónea para su aplicación en el modelo de prueba.

Palabras clave— baterías; CubeSat; EPS; nanosatélites; pruebas eléctricas

Abstract— This research studies the state of art of batteries used during the last two years by nano-satellites developed under the Cal Poly's 1U CubeSat design specifications. Forty-four (44) batteries from missions launched between July 2012 and July 2014 were identified and classified according to their technology, as well as three (3) more batteries from projects that are still under development. Information about the cell's capacity was found in more than twenty (20) of those missions. According to the electrical performance of the most commonly used batteries among the ones studied, some commercial equivalents were identified from those available in Venezuelan market, in order to use them in functional testing of a 1U CubeSat power board. A proposal is given for the most appropriate battery cell to be used in the test model.

Keywords—batteries, CubeSat, EPS, electrical test, nanosatellites

I. INTRODUCCIÓN

Los CubeSats son nano-satélites diseñados bajo las especificaciones dadas por la Universidad Politécnica del Estado de California publicadas en el documento "CubeSat Design Specification". El propósito de dicho documento es estandarizar el diseño de los pico-satélites para reducir el costo

y el tiempo de desarrollo de los proyectos y aumentar así el acceso al espacio [1]. La masa y el volumen de los CubeSats están limitados por el adaptador que sirve de interfaz entre el satélite y el vehículo lanzador (P-POD). El estándar de CubeSats contempla varios tamaños (1U, 1,5U, 2U, 3U y 3U+), sin embargo esta investigación se enfoca en los que corresponden a 1U, que deben tener un volumen de 1 litro, una masa máxima de 1,33 kg y estar contenidos en una sección transversal de 10cmX10cm con una altura de 11cm. Los CubeSats son lanzados como cargas secundarias, lo que reduce significativamente el costo del lanzamiento, que se ubica entre 30.000 y 50.000 USD [2], haciendo más accesible el espacio ultraterrestre a instituciones científicas o educativas. El concepto de CubeSat ha adquirido tal popularidad que hoy en día existen nueve interfaces distintas para la puesta en órbita de CubeSats [3].

Los proyectos espaciales, como parte del diseño de la plataforma, previa a la fabricación del modelo de vuelo (aquel que se envía al espacio) contemplan la fabricación de modelos de ingeniería, que sirven para realizar pruebas funcionales que validen el diseño de los diversos subsistemas. En el caso del subsistema de energía eléctrica (EPS), el modelo de prueba utilizado es el modelo eléctrico. La función del modelo de eléctrico es brindar las mismas características técnicas funcionales de los equipos electrónicos que irán en el satélite que se lanzará, pero a un menor costo. Para lograr esto normalmente se sacrifican las características físicas y mecánicas de los componentes; por ejemplo, se utilizan componentes que no estén diseñados para soportar los altos niveles de radiación que existen en el espacio exterior.

En este trabajo de investigación se identificó la tendencia en los últimos dos años (07/2012-07/2014) de los tipos baterías más utilizados en proyectos de Cubesat 1U y sus equivalentes comerciales capaces de emular eléctricamente las baterías que irán al espacio. Además de las características eléctricas, se incluyeron los criterios de costo y disponibilidad en el mercado nacional.

II. CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS

Antes de estudiar los tipos de baterías utilizados en los CubeSats, es importante definir los principales parámetros que caracterizan una batería, mediante los cuales se describen, clasifican y comparan las mismas.

- *Capacidad [Ah]:* es la cantidad total de electricidad producida en la reacción electroquímica y se define en unidades de Ampere-hora.
- *Profundidad de descarga (DOD por sus siglas en inglés) [%]:* es el porcentaje de capacidad descargada (Ah) respecto a la capacidad nominal.
- *Densidad de energía [Wh/unidad]:* es la cantidad de energía eléctrica entregada por unidad de masa (densidad gravimétrica) o de volumen (densidad volumétrica). Viene especificada en unidades de Wh/kg o Wh/l respectivamente.
- *Ciclos de vida o vida útil:* indica cuántos ciclos de carga y descarga puede soportar una batería bajo ciertas condiciones de descarga sin que se vea afectada (disminuya) la capacidad de la misma. Se mide en números de ciclos a una DOD dada.
- *Tensión de corte (Cut-Off) [V]:* es la mínima tensión permisible. Normalmente define el estado de “vacío” de la batería.
- *Máxima corriente de descarga continua [A]:* es la corriente máxima a la cual la batería se puede descargar sin generar daños a la batería o reducir su capacidad.
- *Tensión de carga [V]:* es la tensión de la batería cuando está cargada al 100% de su capacidad.
- *Corriente típica (recomendada) de carga [A]:* es la corriente ideal a la cual debe iniciarse a cargar la batería hasta alcanzar la tensión de carga.
- *Tasa de carga o descarga (C) [A]:* representa la tasa a la cual se carga o descarga la batería en relación a su máxima capacidad. Una tasa de descarga de 1C significa que la batería se descargará completamente en una hora.
- *Impedancia interna máxima [Ω]:* está relacionada con la eficiencia y la estabilidad térmica de la batería. Su valor varía a lo largo de la vida útil y durante la carga y descarga.

III. BATERÍAS UTILIZADAS EN LOS CUBESATS

Las principales restricciones para los CubeSats son las de masa y volumen. Esto hace que la densidad de energía sea el parámetro con mayor peso durante el proceso de selección del tipo de batería. La mayoría de los CubeSats 1U son desarrollados por universidades o instituciones con fines educativos; 79 misiones de 116 que se han lanzado son catalogadas como educativas [4]. Este tipo de misiones por lo general cuentan con presupuestos limitados, haciendo el costo de la batería un criterio importante para su selección. Los ciclos de vida que es capaz de soportar la batería, son un parámetro importante en las misiones espaciales, sin embargo la vida útil de los CubeSats (normalmente menor a 24 meses) es relativamente corta respecto a otro tipo de misiones, y la mayoría de las baterías en el mercado utilizadas para aplicaciones espaciales son capaces de soportarla, por lo que no

resulta un criterio determinante de selección a menos que se piensen utilizar baterías comerciales para el modelo de vuelo.

Además de las características eléctricas y económicas de las baterías, las mismas deben tener características mecánicas que las hagan resistentes al ambiente espacial (condiciones especiales de vacío, altos niveles de vibración, fuertes variaciones de temperatura, etc.). Estas condiciones ambientales dependen de la órbita y del vehículo lanzador, sin embargo [1] contempla que cuando el vehículo lanzador no esté definido, pueden utilizarse los niveles de los estándares GSFC-STD-7000 [5] y MIL-STD-1540 [6] para las pruebas de ambiente espacial. Algunos fabricantes ofrecen baterías certificadas y probadas en el espacio, la TABLA I muestra dichas opciones especializadas para CubeSat. Como puede verse, los precios son bastante elevados, por lo que algunos proyectos prefieren el uso de celdas de baterías convencionales, las cuales son sometidas a distintas pruebas para su aceptación y posterior lanzamiento. La TABLA II muestra las características algunas celdas de baterías convencionales que has sido utilizadas por misiones de CubeSats 1U en los últimos dos años.

Las especificaciones de diseño de CubeSats publicadas por la Universidad Politécnica del Estado de California [1] limitan la cantidad total de energía química almacenada en el satélite a 100 Wh, sin embargo no establecen ningún requerimiento en cuanto a la tecnología de la batería. Por su parte el “NanoRacks CubeSat Deployer (NRCSD) Interface Control Document” [7] define los requisitos de CubeSats para ser lanzados utilizando el servicio de NanoRacks, quienes ofrecen el transporte hasta la Estación Espacial Internacional (ISS) y luego el lanzamiento de los nanosatélites desde ahí. En este caso, se agrega al diseño de las baterías el requisito de que las mismas deben cumplir con los requerimientos de seguridad de las baterías de la NASA. Actualmente la GOM Space ofrece una versión de sus baterías BP4 compatibles con lanzamientos desde la ISS, lo que las hace compatibles con los NanoRacks.

La costo que las de Ni-Cd, bajas corrientes de descarga (entre 0,2 y 0,5C) y un algoritmo de carga más complejo que el de las baterías de Ni-Cd debido a una mayor generación de calor durante este proceso .

TABLA III muestra que de los cuarenta y cuatro (44) CubeSat 1U lanzados desde julio 2012 hasta julio 2014 cuya información estaba disponible, más tres (3) misiones que están por ser lanzadas entre 2014 y 2015, veinticuatro (24) satélites utilizaron baterías de Li-Ion en su diseño, mientras que veintiuno (21) utilizaron Li-Po y dos (2) utilizaron Ni-MH. El resto de tecnologías de baterías que son utilizadas en misiones espaciales, como Ni-H₂ y Ni-Cd, no resultan viables para CubeSat por su relativa baja densidad de energía, ya sea volumétrica o gravimétrica, y este hecho se ve reflejado en que ninguna de las misiones estudiadas las utiliza.

Las baterías de Níquel - Hidruro Metálico (Ni-MH) surgen a raíz de investigaciones comenzadas en la década de 1970 que buscaban almacenar el hidrógeno de las baterías de Ni-H₂ [8]. Este tipo de baterías ofrece varias ventajas sobre sus

predecesoras de Ni-Cd, tales como mayor densidad energética (entre 20% y 30% más), menor efecto memoria y el uso de materiales ecológicamente amigables. Entre las desventajas que presentan se encuentran la alta tasa de autodescarga (aproximadamente 50% mayor que la de las baterías de Ni-

Cd), necesidad de mantenimiento (requiere descargas totales periódicamente para prevenir la formación de cristales), mayor

TABLA I. BATERÍAS OFRECIDAS PARA USO ESPACIAL

Fabricante	Modelo	Capacidad (mAh)	Tensión Nominal (V)	Tecnología	Masa (g)	Precio aprox. (USD)
Clyde Space	CS-SBAT2-10	1 220	8.2	Li-Po		1 800
	CS-SBAT2-20	2 440	8.2	Li-Po		2 850
	CS-SBAT2-30	3 750	8.2	Li-Po	260	3 850
Pumpkin	710-01006	2 700	7.4	Li-Ion		
GOMSpace	NanoPower BP-4	3 600	7.4	Li-Ion	213	
		5 200	8.4	Li-Ion	240	1 980
		2 600	16.8	Li-Ion	240	1 980
	NanoPower BPx (celdas 2600mAh)	7 800	8.4	Li-Ion		7 250
		5 200	12.6	Li-Ion		7 250
		10 400	8.4	Li-Ion		7 250
		5 200	16.8	Li-Ion		7 250
	NanoPower BPx (celdas 1800mAh)	5 400	8.4	Li-Ion		7 250
		3 600	12.6	Li-Ion		7 250
		7 200	8.4	Li-Ion		7 250
		3 600	16.8	Li-Ion		7 250
		3 300	7.2	Li-Ion		7 250
	NanoPower BPx (celdas 1100mAh)	2 200	10.8	Li-Ion		7 250
		4 400	7.2	Li-Ion		7 250
		2 200	14.4	Li-Ion		7 250

TABLA II. BATERÍAS COMERCIALES UTILIZADAS POR PROYECTOS DE CUBESAT

Fabricante	Modelo	Capacidad (mAh)	Tensión Nominal (V)	Tecnología	Densidad de Energía Volumétrica (Wh/l)	Densidad de Energía Gravimétrica (Wh/kg)	Masa (g)	Precio aprox. (USD)
Panasonic	CGR18650HG	1 800	3.6	Li-Ion	380	155	42	2 - 7
	CGA103450	1 800	3.6	Li-Ion	365	165	39	28
Hitachi Maxell	INR18650PB2	1 450	3.7	Li-Ion	315	130	42	6
Kokam	SLPB554374H	1 250	3.7	Li-Po	264	140	33	16
Saft	MP144350	2 600	3.75	Li-Ion	344	143	68	30 - 70
A123 System	18650	1 100	3.3	Li-Ion (LiFePO)	215	88	39	1 - 10

costo que las de Ni-Cd, bajas corrientes de descarga (entre 0,2 y 0,5C) y un algoritmo de carga más complejo que el de las baterías de Ni-Cd debido a una mayor generación de calor durante este proceso [8].

TABLA III. TENDENCIA DE USO DE BATERÍAS EN CUBESAT

Parámetro	Muestra	Li-Ion	Li-Po	Ni-MH
Baterías utilizadas	47	24	21	2

El litio es el metal más liviano en condiciones estándares que cuenta además con el mayor potencial electroquímico, lo que resulta en la mayor densidad de energía gravimétrica. Los trabajos para desarrollar las baterías de litio comenzaron en

1912, pero no fue sino hasta 1991 que se comercializó la primera batería recargable de Li-Ion. En la industria espacial comenzaron a utilizarse en el año 1999 con una misión EVA (Extra Vehicular Activity) en la ISS [9], seguidas por los satélites STRV-1c y STRV-1d, de investigación tecnológica, lanzados en noviembre 2000. Hoy en día las baterías de Li-Ion son consideradas una tecnología madura para aplicaciones espaciales, siendo ampliamente utilizadas en satélites que van desde pico-satélites para misiones educativas o experimentales, hasta grandes plataformas de satélites GEO e incluso misiones interplanetarias. Entre las ventajas que ofrecen las baterías de Li-Ion destacan su elevada densidad de energía (cerca del doble de las de Ni-Cd), la uniformidad de la curva de descarga, la elevada tensión de las celdas (equivalente al triple de las de Ni-Cd), su baja tasa de autodescarga, no presentan efecto

memoria por lo que no necesitan descargas de mantenimiento y son menos sensibles a las diferencias de temperatura, permitiendo la conexión de celdas en paralelo para aumentar la capacidad de la batería. Sin embargo, estas celdas son frágiles y vulnerables ante la sobrecarga, los golpes que pongan en riesgo la integridad física de la celda, el sobrecalentamiento y los cortocircuitos, todos ellos factores que podrían desencadenar situaciones de riesgo no deseadas, por lo que se necesitan circuitos de protección y monitoreo dedicados a cada una de las celdas dentro de la batería. El método de carga típico de las celdas de Li-Iones conocido como corriente constante – tensión constante (CC-CV) que consiste en una primera etapa de carga con una corriente que se mantiene constante en el valor recomendado por el fabricante hasta alcanzar la tensión máxima de carga, entre 3,9V y 4,2V dependiendo del óxido metálico del cátodo, luego para a la segunda etapa donde se mantiene esa tensión constante y la corriente disminuye hasta un valor de C/50 o C/100 dependiendo del fabricante.

Las baterías de Litio-Polímero se diferencian del resto de las baterías por el tipo de electrolito que utilizan. El diseño original que data de los años 1970 utilizaba un electrolito sólido de polímero. Este tipo de electrolito no es conductor eléctrico pero permite el intercambio de iones, reemplazando el tradicional separador poroso que está inmerso en un líquido electrolítico. El electrolito seco de polímero ofrece simplificaciones con respecto a la fabricación, robustez, seguridad y geometría delgada de las baterías, sin embargo posee baja conductividad eléctrica, lo que aumenta la resistencia interna y limita la magnitud de los pulsos de corriente que pueden ser entregados por la batería. Para aumentar la conductividad del electrolito de polímero, se le agrega un elemento de consistencia gelatinosa, obteniendo así los GPEs (Gel Polymer Electrolytes). La mayoría de las baterías denominadas como Li-Po son en realidad un sistema híbrido cuyo nombre correcto es Li-Ion Polímero. Los GPEs se sintetizan mediante la incorporación del electrolito líquido en las membranas a base de polímeros mediante la inmersión de membranas en electrolitos orgánicos a base de litio. Este tipo de baterías pueden llegar a presentar un ligero aumento en la densidad de energía respecto a las baterías de Li-Ion que se fabrican hoy en día, así como también una mejoría en el factor seguridad, siendo más resistentes a la sobrecarga y menos vulnerables a fugas del electrolito [8]; sin embargo no presentan ventajas en cuanto a capacidad, tensión nominal o costo. El método de carga de las baterías de Li-Po es también CC-CV como el de las de Li-Ion. La mayor ventaja que presentan respecto a las baterías de Li-Ion es el factor de forma, permitiendo la fabricación de celdas muy delgadas.

La TABLA IV muestra la comparación de las principales características entre celdas típicas de Li-Ion, Li-Po y Ni-MH de acuerdo a la bibliografía consultada [8] [10]. Estos datos son consistentes con los rangos obtenidos en las baterías estudiadas durante la investigación (TABLA V).

TABLA IV. COMPARACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS CELDAS

Parámetro	Li-Ion	Li-Po	Ni-MH
Densidad de energía (Wh/kg)	100 ~ 200	130~250	30 ~ 80
Densidad de energía (Wh/l)	150 ~ 250	150 ~ 300	140 ~ 200

Tensión nominal (V)	3,7	3,7	1,25
Tensión final de carga (V)	4,2	4,2	1,55
Tensión final de descarga (V)	2,8	2,8	1,0
Temperatura de operación (°C)	-20 ~ 60	-20 ~ 60	-10 ~ 50
Autodescarga (por mes)	10%	10%	30%
Resistencia interna (mΩ)	9-120 (celdas de 1 a 3 Ah) 0,8 (celdas de 190 Ah)	20-60 (celdas de 0,5 a 15 Ah)	-
Sensibilidad a la sobrecarga	Muy alta	Muy alta	Alta

TABLA V. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS ESTUDIADAS

Parámetro	Li-Ion	Li-Po
Densidad de energía (Wh/kg)	60-187	140
Densidad de energía (Wh/l)	150-517	264
Tensión de celda (V)	3,3-3,75	3,6
Tensión EoC (V)	3,0	3,0
Resistencia interna (mΩ)	25-80	17

En la costo que las de Ni-Cd, bajas corrientes de descarga (entre 0,2 y 0,5C) y un algoritmo de carga más complejo que el de las baterías de Ni-Cd debido a una mayor generación de calor durante este proceso .

TABLA III se observa que dos (2) misiones seleccionaron baterías de Ni-MH en lugar de las populares baterías a base de litio. La información disponible acerca de esas misiones no incluye la razón por la cual seleccionaron este inusual tipo de batería, sin embargo misiones desarrolladas en años anteriores (2007-2008) que seleccionaron el mismo tipo de batería [11] [12], argumentaron su selección con cuatro razones principales: mayor facilidad de carga (respecto a Li-Ion); mayor vida útil (respecto a Li-Ion) y mayor densidad energética (respecto a Ni-Cd). No obstante, de la TABLA IV se puede observar que las celdas a base de litio presentan un mejor desempeño que las de Ni-MH y de la TABLA II se observa que hoy en día el mercado ofrece baterías de litio a precios bastante económicos, por lo que no se encuentra justificación para el uso de las celdas de Ni-MH más allá de la facilidad de carga.

Pese a que durante la investigación sólo se encontró un fabricante de baterías de Li-Po especializadas para CubeSats y dos fabricantes de celdas genéricas que han sido utilizadas en proyectos de CubeSat de 1U, se observa que la cantidad de misiones que utilizan Li-Po es casi la misma que la de misiones que utilizan Li-Ion. De hecho, de las 21 misiones que se estudiaron que utilizan baterías de Li-Po, 10 utilizaron las baterías comercializadas por Clyde-Space Ltd. y sólo tres (3) misiones utilizaron celdas comunes de otros fabricantes, el resto de las misiones no especifican las celdas utilizadas. La Fig. 1 muestra la fuerte tendencia a utilizar celdas o baterías de los fabricantes especializados en tecnología para CubeSats, pese a sus elevados costos. De las 26 misiones cuya

información de la celda estaba disponible, 16 eran de celdas especializadas para CubeSats y una (MoliCell) tenía aprobación de seguridad para vuelos en la ISS, dominando el mercado Clyde Space Ltd. Una característica importante de las baterías más utilizadas (Clyde Space Ltd. y GOM Space) es que ofrecen la integración de resistencias eléctricas para regular la temperatura de las mismas [13] [14].

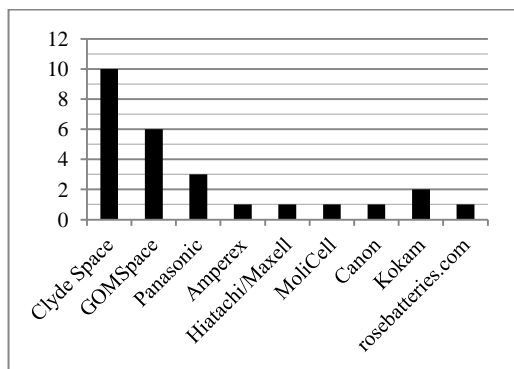


Fig. 1 Tendencia de fabricantes de celdas de baterías utilizadas en los CubeSat

Durante la investigación, además de clasificar las tecnologías de baterías utilizadas por misiones específicas, se hizo una comparación de las tecnologías de baterías usadas por plataformas comerciales que venden tarjetas de alimentación de energía eléctrica para CubeSat 1U. Los resultados se muestran en la TABLA VI. Seis (6) de las ocho (8) plataformas estudiadas están diseñadas para utilizar baterías de Li-Ion, mientras que sólo tres (3) de ellas pueden utilizar baterías de Li-Po y una el resto de las tecnologías. Estos resultados son consistentes con los de la TABLA II en donde la mayor variedad de celdas se encuentra para baterías de Li-Ion, pero no con los de la costo que las de Ni-Cd, bajas corrientes de descarga (entre 0,2 y 0,5C) y un algoritmo de carga más complejo que el de las baterías de Ni-Cd debido a una mayor generación de calor durante este proceso .

TABLA III, que indica que casi la mitad de los satélites lanzados en los últimos dos años utilizan baterías de Li-Po. Esto indica que pese a que la tendencia de los fabricantes es hacia el uso de baterías de Li-Ion, sigue existiendo una fuerte influencia de Clyde Space Ltd. en el mercado, probablemente debido a su amplia trayectoria en el área, ya que fueron los pioneros en la venta de plataformas de CubeSat por internet y 40% de las misiones utilizan la usan [15].

TABLA VI. BATERÍAS UTILIZADAS POR PLATAFORMAS COMERCIALES DE CUBESAT 1U

Fabricante	LiIon	LiPo	NiCd	NiMH	Otras
G.A.U.S.S. [16]	X	X			
Interorbital [17]	X				
Tiger Innovations [18]	X				
BCT [19]	X				
Clyde Space [15]		X			
GOMSpace [20]	X				
CubeSat kit [21]		X	X	X	X
Tyvak [22]	X				

La Fig. 2 muestra las capacidades de las celdas de batería utilizadas en las 33 misiones de las estudiadas cuya información de la capacidad estaba disponible. Se observa una fuerte tendencia hacia las celdas de 1.250 mAh y 2.600 mAh, las cuales coinciden con misiones que utilizan baterías para CubeSats de los proveedores Clyde Space Ltd. y GOM Space, respectivamente.

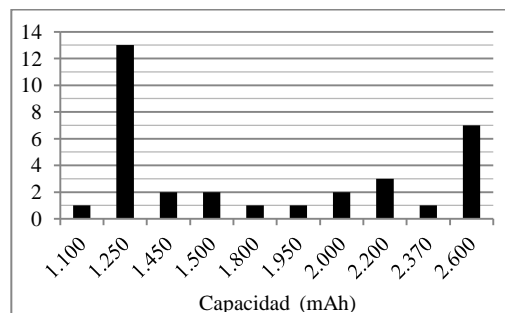


Fig. 2 Capacidades de las baterías utilizadas en los CubeSat

IV. OPCIONES DE BATERÍAS COMERCIALES

Las baterías que se buscaron en el mercado local fueron de 1.250 mAh y 2.600 mAh tomando en cuenta la tendencia observada en la Fig. 2. Los resultados se muestran en las TABLA VII y TABLA VIII; los precios ahí reflejados son referenciales. Los precios en USD se obtuvieron de páginas web que ofrecían el producto, en ningún momento reflejan ningún tipo de cambio de la moneda local, fueron colocados para poder hacer una comparación respecto a las celdas y baterías mencionadas en la Sección III.

Las características que se tomaron en cuenta, para la selección preliminar de baterías viables para el modelo de pruebas eléctricas del EPS (TABLA VII y TABLA VIII) fueron: capacidad nominal, tensión nominal y química de la batería. Por tratarse de un modelo eléctrico, no se tomaron en cuenta las características físicas, tales como densidad de energía, masa, volumen o capacidad de soportar vibraciones o impactos físicos.

Las celdas más utilizadas por los CubeSats estudiados fueron las ofrecidas por Clyde Space Ltd., cuyas características se muestran en la

TABLA IX [23]. En la TABLA VII se observan tres celdas que cumplen con las características de las celdas utilizadas por Clyde Space Ltd.: la Cameron Sino Technology CS-IQN160SL, la Garmin 361-000-19-50, la Casio NP-40 y la Sony Energy Devices Corp. US374169. Las dos primeras son baterías de GPS y su disponibilidad en el mercado nacional es limitada; se consiguió un solo proveedor en cada caso, por lo que no fueron consideradas como opciones confiables, ya que en caso de querer utilizarlas se dependerá de la existencia en almacén del producto en un solo proveedor. De las otras dos baterías sólo la US374169 es de Li-Po. Pese a que ésta última tiene la capacidad nominal menor a la capacidad nominal de las celdas de Clyde Space Ltd., están dentro del rango esperado; McLaren, Clark, Simon y Hendel [24] concluyeron que la capacidad mínima de las celdas era de 1220 mAh mientras que Patel y Jeevarajan en un estudio más reciente [25] caracteriza las celdas con una capacidad de 1210 mAh. La

TABLA IX muestra la comparación de ambas celdas. Las especificaciones técnicas disponibles para la batería comercial son limitadas, por lo que no se puede asegurar que la misma puede reemplazar al modelo con calificación espacial durante las pruebas eléctricas. Deben realizarse pruebas funcionales a

la batería comercial para caracterizarla y verificar su rendimiento con los requerimientos técnicos de diseño.

TABLA VII. OPCIONES DE BATERÍAS COMERCIALES PARA REEMPLAZAR LAS CELDAS DE 1250 MAH

Marca	Modelo	Capacidad (mAh)	Tensión Nominal (V)	Tecnología	Precio aprox. (Bs.)	Precio aprox. (USD)	Uso Comercial
Sony Energy Devices Corp.	US374169	1 220	3,7	Li-Po	370 ~ 1 200	3 ~ 6	iPhone 3G
UltraFire	TR 14500	1 200	3,7	Li-Ion	270	4 ~ 9	General
	LC 14500	1 200	3,7	Li-Ion	320	2	General
Cameron Sino Technology	CS-IQN160SL	1 250	3,7	Li-Po	1 200 ~ 1 500	12 ~ 55	GPS
Garmin	361-000-19-50	1 250	3,7	Li-Ion	950	13 ~ 21	GPS
Nokia	BL-4D	1 200	3,7	Li-Ion	320 ~ 720	6	Celular
Lenmar	DLSR1	1 220	3,6	Li-Ion	420	14 ~ 30	Cámaras fotográficas
SONY	NP-FR1	1 220	3,6	Li-Ion	450	60	Cámaras fotográficas
Casio	NP-40	1 230	3,7	Li-Ion	1 250 ~ 2 000	9 ~ 32	Cámaras fotográficas

TABLA VIII. OPCIONES DE BATERÍAS COMERCIALES PARA REEMPLAZAR LAS CELDAS DE 2600 MAH

Marca	Modelo	Capacidad (mAh)	Tensión Nominal (V)	Tecnología	Precio aprox. (Bs.)	Precio aprox. (USD)	Uso Comercial
UpStart	GA-GSPMAP	2 600	8,4	Li-Ion	2 590	14 ~ 40	GPS
Samsung	B600BC	2 600	3,8	Li-Ion	600 ~ 700	35 ~ 40	Galaxy S4
	ICR16850-26F	2 600	3,7	Li-Ion	1 300	2 ~ 10	General

TABLA IX. COMPARACIÓN DE CELDAS DE 1250 MAH

Marca	Clyde Space	Sony Energy Devices Corp.
Modelo	-	US374169
Capacidad	1 250 mAh	1 220 mAh
Tensión nominal	3,70 V	-
Tipo	Li-Po	Li-Po
I carga (max.)	1 250 mA	1 950 mA
I carga (típica)	625 mA	-
V carga (max.)	4,20 V	4,30 V
I descarga (max.)	1 250 mA	-
I descarga (típica)	625 mA	-
V Cut-Off	3,0 V	-

Las celdas de 2600 mAh utilizadas en las misiones de CubeSat estudiadas fueron las fabricadas por GOM Space, cuya tensión nominal es de 3,7 V. De las tres baterías comerciales disponibles con capacidad de 2600 mAh (ver TABLA VIII), la única que cumple con la tensión nominal es la Samsung ICR16850-26F. La batería UpStart GA-GSPMAP podría utilizarse para reemplazar la GOM Space que utilizan celdas de 2600 mAh, cuya tensión nominal es de 8,4V o 16,8V, en este último caso se colocarían dos baterías comerciales para lograr el nivel de tensión deseado y en caso de necesitar una sola celda, debe abrirse el empaque original poniendo en riesgo la integridad física de las celdas, por lo que ante la opción de la compra de celdas por separado, la batería GA-GSPMAP se descartó.

La TABLA X muestra la comparación de las principales características de la celda Samsung ICR16850-26F con la GOM Space. Se observa la batería comercial Samsung ICR16850-26F es capaz de soportar los valores de corriente máxima de carga y descarga ofrecidos por la celda GOM Space, así como la tensión máxima de carga y la corriente típica de carga, sin embargo el valor de corriente de descarga típico para la celda Samsung es casi la mitad de el de la GOM Space. Esto significa que la batería Samsung se puede utilizar para reemplazar a la GOM Space en pruebas muy puntuales, si la corriente requerida por la carga es mayor de 520 mA, ya que la celda tiene la capacidad de suministrar hasta 5200 mA, pero no por periodos de tiempo muy prolongados porque se vería afectada la capacidad de la misma. Para una corriente de descarga de 1300 mA, la capacidad de la batería sería el 95% de su capacidad nominal [26]. El otro valor que no cumple la celda Samsung es la impedancia interna máxima, siendo ésta casi un 43% mayor que la de la celda GOM Space, sin embargo como la celda comercial tiene una variación del valor de la impedancia interna que afecta negativamente el desempeño del EPS, en caso de que las pruebas realizadas satisfagan los resultados esperados, puede igualmente garantizarse que utilizando las celdas para aplicación espacial, el EPS funcionará de acuerdo a lo esperado. Una ventaja que presenta la celda Samsung ICR16850-26F es que tiene el mismo factor de forma 18650 que las GOM Space, lo que implica que pueden utilizar la misma interface. El factor de forma 18650 es hoy en día el que presenta la mejor relación energía/costo para las baterías de Li-Ion [8] y es el más

utilizado para celdas cilíndricas. La denominación viene regida por el estándar CEI/IEC 61960 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) que indica que para las celdas cilíndricas, los dos primeros dígitos se refieren al diámetro de la celda y los siguientes tres a la altura, ambos dados en milímetros. Entonces, las celdas 18650 son aquellas de forma cilíndrica con un diámetro de 18mm y una altura de 65,0 mm [27].

TABLA X. COMPARACIÓN DE CELDAS DE 2600 MAH

Marca	GOM Space	Samsung
Modelo	NanoPower 18650	ICR18650-26F
Capacidad	2 600 mAh	2 600 mAh
Tensión nominal	3,70 V	3,70 V
Tipo	Li-Ion	Li-Ion
I carga (max.)	2 500 mA	2 600 mA
I carga (típica)	1 000 mA	1 300 mA
V carga (max.)	4,20 V	4,25 V
I descarga (max.)	3 750 mA	5 200 mA
I descarga (típica)	1 000 mA	520 mA
Impedancia interna (max.)	70 mΩ	100 mΩ
Temperatura de carga	-5°C ~ +45°C	0°C ~ +45°C
Temperatura de descarga	-20°C ~ +60°C	-20°C ~ +60°C
Temperatura de almacenamiento	-20°C ~ +20°C	-20°C ~ +25°C

V. CONCLUSIONES

Algunos CubeSats hoy en día utilizan baterías comerciales que no necesariamente están fabricadas o probadas para aplicaciones espaciales. Este tipo de baterías son económicos y pueden ser utilizados para modelos de prueba. Sin embargo, la mayoría utilizan baterías especializadas para CubeSats, que traen como beneficio una alta confiabilidad pero a un precio mucho mayor.

En el mercado Venezolano no se encuentran disponibles ninguna de las baterías que han sido probadas en CubeSats, ni las comerciales ni las especializadas. Esto conlleva a costos de envío que elevan el limitado presupuesto de los proyectos de CubeSat, además de incluir un pesado factor de riesgo en el cumplimiento del cronograma al depender de los tiempos administrativos de aprobación y adquisición de divisas, así como de transporte. En estos casos pueden utilizarse baterías comerciales disponibles en el mercado local, que tengan las mismas características eléctricas para reemplazar las baterías que serán lanzadas con el satélite y poder realizar así las pruebas eléctricas en el tiempo estipulado y a un bajo costo.

De las baterías comerciales estudiadas, las que mejor se adaptan a las características eléctricas de las celdas más utilizadas por CubeSats 1U, en los últimos dos años, son la Sony Energy Devices Corp. US374169 (1220 mAh) y la Samsung ICR18650-26F (2600 mAh).

Los proveedores de baterías comerciales disponibles en el mercado Venezolano no suministran información detallada de su desempeño eléctrico, por lo que deben realizarse pruebas funcionales para caracterizarlas y asegurarse de que tengan un

comportamiento eléctrico equivalente a las que se utilizarán en el modelo de vuelo del satélite.

RECONOCIMIENTOS

E.A. agradece a sus compañeros de trabajo Diego Pérez y Tomás Alarcón por la ayuda y el apoyo brindado durante la investigación.

REFERENCIAS

- [1] The CubeSat Program, *CubeSat Design Specification*, 13 ed., Cal Poly SLO, 2014.
- [2] A. E. Kalman, «Small Spacecraft Missions – How About Flying a CubeSat?», de *CubeSat Mission Overview*, 2007.
- [3] Earth Observation Portal, «CubeSat Concept and the Provision of Deployer Services», eoPortal Directory, [En línea]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cubesat-concept#deployers>. [Último acceso: 05 09 2014].
- [4] M. Buscher, «TUB Small Satellite Database - TU Berlin», Agosto 2014. [En línea]. Available: https://www.raumfahrttechnik.tu-berlin.de/menue/publikationen/small_satellite_database/. [Último acceso: Agosto 2014].
- [5] NASA Goddard Space Flight Center, *General Environmental Verification Standard*, Maryland, 2013.
- [6] Department of Defense Standard Practice, *Product Verification Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicles*, Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, 1999.
- [7] NanoRacks, LLC, *NanoRacks CubeSat Deployer (NRCSD) Interface Control Document*, 0.36 ed., Huston, TX, 2013.
- [8] Battery University, «What's the Best Battery?», [En línea]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery. [Último acceso: 03 Septiembre 2014].
- [9] SAFT, *Saft batteries... powering outer space for half a century*, Bagnolet, Francia, 2013.
- [10] N. Navarathinam, R. Lee y HughChesser, «Characterization of Lithium-Polymer batteries for CubeSat applications», *Acta Astronautica*, vol. 68, n° 11-12, pp. 1752-1760, Junio-Julio 2011.
- [11] P. Anderson, J. Brady, T. Munro, J. Koeln, R. Barnett, C. Smith y E. Monzon, «MRT CubeSat Development», Utah State University, 2008.
- [12] «Technical Discussion», *CubeSat Team SJSU*, vol. 1, n° 1, Noviembre 2008.
- [13] Clyde Space Ltd., *Space Qualified Batteries*, 2011.
- [14] GOM Space, *NanoPower Battery Datasheet*, Aalborg, 2012.
- [15] «Clyde Space Ltd.», [En línea]. Available: <http://www.clyde-space.com/>. [Último acceso: Agosto 2014].
- [16] «Group of Astrodynamics for the Use of Space Systems», [En línea]. Available: <http://www.gaussteam.com/>. [Último acceso: Agosto 2014].
- [17] «Interorbital Systems», [En línea]. Available: <http://www.interorbital.com/>. [Último acceso: Agosto 2014].
- [18] «Tiger Innovations Inc.», [En línea]. Available: <http://server2.tigerinnovations.com/homepage/index.php>. [Último acceso: Agosto 2014].
- [19] «Blue Canyon Technologies», [En línea]. Available: <http://bluecanyontech.com/>. [Último acceso: Agosto 2014].
- [20] «GOMSpace», [En línea]. Available: www.gomspace.com. [Último acceso: Agosto 2014].
- [21] «CubeSat kit», [En línea]. Available: www.cubesatkit.com. [Último acceso: Agosto 2014].
- [22] «Tyvak Nano-satellite System Inc.», [En línea]. Available: www.tyvak.com. [Último acceso: Agosto 2014].

- [23] V. McLaren, *User Manual: Standalone 30Wh Battery*, C. S. Ltd., Ed., Glasgow, 2010.
- [24] V. McLaren, C. Clark, E. Simon y B. Hendel, «Lithium ion polymer cell for small satellites,» de *NASA Aerospace Battery Workshop*, 2008.
- [25] P. P. y. J. Jeevarajan, «Performance and Safety Testing of Varta,» de *NASA Battery Workshop*, 2009.
- [26] Samsung SDI Co.,Ltd. Energy Business Division, *SPECIFICATION OF PRODUCT for Lithium-ion Rechargeable Cell Model : ICR18650-26F*, 2009.
- [27] M. Kahn, K. White y R. T. Long, *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*, Springer Science & Business Media, 2012.