

Prototipo de un sistema de energía para misiones CubeSats y BalloonSats

Andrés Rambal Vecino

Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia, andres.rambal@correo.usa.edu.co

Jesús González-Llorente

Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, Colombia, jesusd.gonzalez@correo.usa.edu.co

ABSTRACT

We describe the design of an electrical power system prototype for CubeSats and BalloonSats, it uses a lithium-polymer battery as primary energy source and step-up dc-dc converters to get 12 and 5 volts. It also includes a battery charger circuit and power path management, so, this prototype could be used in terrestrial applications as uninterruptible DC power to 5 and 12 volts. We present efficiency measurements of integrated circuit dc-dc converters for different load conditions. The dc-dc converters show efficiency about 80%. This paper includes measurements of the charge and discharge characteristics of the battery. In addition, it shows the transient response of the 5 volts regulator when the primary source varies due to the external source disconnection. The results presented will contribute to the future development of an efficient energy system with solar cells.

Keywords: dc-dc converter, CubeSat, BalloonSats, Battery charger

RESUMEN

Se describe el diseño de un prototipo de un sistema de potencia eléctrica para CubeSats y BalloonSats, el cual usa como fuente primaria una batería de litio-polímero y convertidores dc-dc en configuración elevadora para obtener 5V y 12V a partir de los 3.7V de la batería. Además se incluye un circuito cargador de baterías y distribución de potencia dinámica, lo cual permite que el prototipo sea usado en aplicaciones terrestres como fuente ininterrumpida de potencia en corriente continua para niveles de 5V y 12V. Se presentan mediciones de eficiencia de los convertidores dc-dc basados en circuito integrado para diferentes condiciones de carga. Los convertidores muestran una eficiencia de alrededor del 80%. Se incluyen mediciones de las características de carga y descarga de la batería. También se muestra la respuesta transitoria del regulador de 5V para variaciones en la fuente de alimentación primaria debido a la desconexión de la fuente externa. Los resultados presentados contribuyen para el futuro desarrollo de un sistema eficiente de energía alimentado por celdas solares.

Palabras claves: Convertidor dc-dc, CubeSat, Globo sonda, Cargador de batería

1. INTRODUCCIÓN

Los Cubesats son generalmente clasificados entre picosatélites y nanosatélites por su pequeño tamaño; entre sus principales ventajas están el bajo costo y el corto tiempo de desarrollo, siendo una alternativa a los grandes satélites cuando se requiere redundancia, flexibilidad y misiones rápidas (Shiroma et al., 2011). Por su parte, los BalloonSats son plataformas para experimentar a una altura de alrededor de 30km; generalmente tomando mediciones o para demostraciones y pruebas de componentes usados en Cubesats (Becnel, 2011). Además de las oportunidades de los CubeSats y los BalloonSats en la exploración espacial, estas plataformas fueron concebidas para brindar a los estudiantes la oportunidad de participar en misiones espaciales reales y contribuir a su formación de ingenieros(Heidt, Puig-Suari, Moore, Nakasuka, & Twiggs, 2000).

Tanto los CubeSats como los BalloonSats requieren de un sistema de energía que alimente los diferentes componentes para el desarrollo de las misiones. Generalmente, este sistema de energía es conocido como EPS (del inglés Electrical Power System), y es responsable de proveer, almacenar, acondicionar, controlar y distribuir la potencia requerida por todos los equipos (Patel, 2005). Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo de EPS para misiones de corta duración, considerando como fuente primaria únicamente una batería de tipo Litio-Polímero (Li-Po) de 3.7V para suministrar 5V y 12V. Este diseño corresponde a la primera fase en el desarrollo de una EPS para un CubeSat alimentado por celdas solares. Sin embargo, durante esta etapa se concentran las pruebas en el acondicionamiento de potencia mediante el estudio de eficiencia y las características de los reguladores elevadores de voltaje.

Como elevador de voltaje se usan convertidores dc-dc ; los cuales son circuitos que convierten un nivel de voltaje directo a otro superior, inferior o inverso, sólo algunas topologías de convertidores pueden elevar, reducir o conectar directamente la carga(Erickson & Maksimovic, 2001). La topología usada es conocida como Boost, la cual eleva el voltaje de entrada del convertidor, permitiendo que a partir de los 3.7V de la batería se obtengan los niveles requeridos por los demás componentes del CubeSat o BalloonSat como son 5V y 12V. En la sección de resultados se muestra la eficiencia para distintos niveles de carga y el tiempo de establecimiento para obtener una salida regulada.

El diseño propuesto también carga la batería de Li-Po, usando un circuito integrado que implementa métodos de corriente constante y voltaje constante para prevenir sobrecarga y sobrecalentamiento, así como finalización de la carga cuando la batería alcanza el voltaje máximo permitido (Hussein & Batarseh, 2011). La sección de metodología describe las características del circuito usado (MCP73833) y en la sección de resultados se presenta la curva de carga y descarga de la batería.

También se implementó un circuito de distribución de potencia dinámica; por lo tanto la carga puede ser alimentada de la fuente externa mientras la batería se está cargando o directamente de la batería si el adaptador externo es desconectado. Esta funcionalidad posibilita que el diseño sea usado como fuente de alimentación ininterrumpida en sistemas de aplicación terrestre que requieran 5V y 12V; es decir, si el suministro del adaptador falla o es desconectado, la batería provee la alimentación. La sección de resultados muestra el efecto de conexión y desconexión del adaptador en el nivel de 5V.

2. METODOLOGÍA

A continuación se describe el diseño del prototipo de un sistema de energía para un *CubeSat* y *balloonsat*, este sistema se encargará de regular diferentes voltajes exigidos por las cargas, con un límite de corriente máximo exigido de 175 miliamperios.

2.1. CONVERTIDOR DC-DC

Los voltajes que entrega el sistema de energía son 5V y 12V. Para regular estos voltajes se usaron convertidores dc-dc con topología elevadora. El circuito integrado que se usó para el diseño de los convertidores de 5 y 12 voltios fue el MC34063A de Texas Instruments, el cual permite configurar la topología según las necesidades del sistema (boost-buck-inverting).

El MC34063A soporta de 3 a 40 voltios de entrada y de 1.55 a 40 voltios en la salida, entregando una corriente máxima de 750 miliamperios; esto posibilita su uso con baterías de 3.7 voltios. Tiene una frecuencia de oscilación de hasta 100Khz y un ciclo útil máximo del 90%. El rango de temperatura para su operación es de 0°C a 70°C; para trabajar a temperaturas de ambiente espacial se debe usar el chip MC33063AD de Texas Instruments que tiene un rango de operación de -40°C a 85°C (Texas Instrument Inc., 2011).

En la figura 1 se observa los componentes usados para configurar el chip como elevador a 5 v, donde se puede observar las resistencias R11=3K y R12=1K que son las encargadas de regular el voltaje de salida cumpliendo la

ecuación (1) (Texas Instrument Inc., 2011). Para el regulador de 12 voltios los valores de las resistencias deben ser R11=866K y R12=100K

$$V_{out} = 1.25 * \left(1 + \frac{R11}{R12}\right) \rightarrow 5 = 1.25 * \left(1 + \frac{3k}{1k}\right) \quad (1)$$

En la figura 1, V_LOD es el voltaje de entrada al convertidor, para el sistema diseñado se mantiene un voltaje que varía entre 3.8 y 4.6 voltios que corresponden a la batería y al adaptador de voltaje externo respectivamente, el capacitor C7 es un capacitor de bypass que se usa para reducir el ruido generado por la conmutación. La resistencia R9 es un sensor de corriente, donde la caída de tensión de esta resistencia es monitoreada por el pin 7 (Ipk) del convertidor, este se encarga de limitar la corriente de entrada del convertidor a 1 amperio; este límite es configurable seleccionando la resistencia de acuerdo a la ecuación (2) (Sekander & Harmouch, 2007).

$$I = \frac{330mV}{R_{sc}} \rightarrow 1A = \frac{330mV}{0,33\Omega} \quad (2)$$

El inductor L3 se encarga de almacenar la energía en forma de corriente, el condensador C10 es encarga de minimizar el rizado de la señal de salida, el condensador C8 almacena energía adicional en caso que la corriente de entrada del convertidor supere el límite máximo configurado y así limitar la cantidad de energía almacenada en el inductor, esto es controlado por el limitador de corriente interno que tiene el convertidor por medio del pin 7 Ipk (Sekander & Harmouch, 2007). El filtro compuesto por L4 y C9 es para reducir el rizado de la salida.

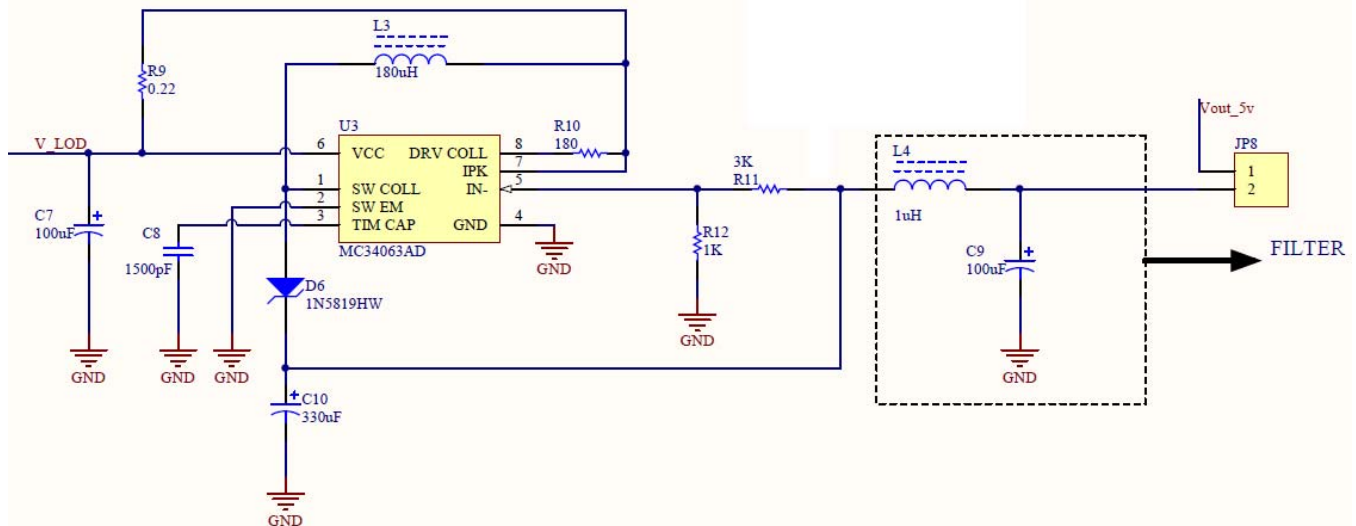


Figura 1 Convertidor DC/DC configurado como elevador con un voltaje de salida de 5V

2.2 DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA DINÁMICA

La distribución de potencia dinámica, conocida también como gestión de la ruta de potencia, se encarga de la conmutación entre la batería y el adaptador de voltaje conectado para alimentar el sistema, funciona de la siguiente forma:

Si la batería y el adaptador son conectados, el sistema se alimentará con el adaptador como fuente principal de energía y la batería pasara a un estado de carga a través de un chip que se encarga de cargarla aprovechando el adaptador como fuente de alimentación, si la batería ya está cargada el chip deja de cargar la batería y esta pasa a un estado de desconexión; es decir no es fuente de alimentación de ningún sistema. En el momento en que es desconectado el adaptador, automáticamente el sistema pasa a ser alimentado por la batería.

En la figura 2 se muestra el circuito para la distribución de potencia dinámica, C1 es un capacitor de bypass, Rpull es una resistencia de pull down, esto evita que la compuerta del Mosfet Q2 quede en el aire cuando se desconecta el adaptador, Q2 es un P-Mosfet, encargado de realizar la conmutación entre las fuentes de alimentación y el diodo D1 es el camino que toma la corriente cuando la fuente de alimentación es el adaptador de voltaje. En este prototipo el diodo (D1) usado presenta una caída de tensión de 0.4 voltios, como consecuencia el voltaje máximo entregado a los convertidores es de 4.6 voltios, teniendo en cuenta que el adaptador externo proporciona 5 voltios.

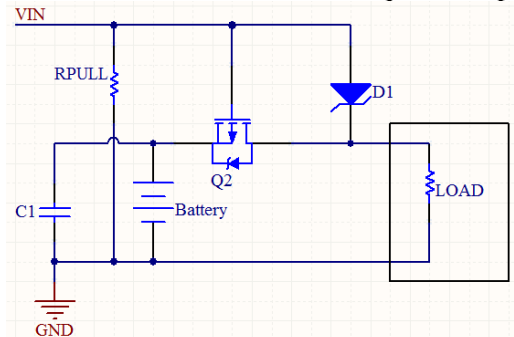


Figura 2. Distribución de potencia dinámica

2.3 CARGADOR DE BATERÍA

Los circuitos cargadores de baterías son aquellos que proporcionan una corriente de carga constante hasta que la batería llegue a su punto de carga, a partir de ese momento el circuito cortará el suministro de corriente hacia la batería.

En este prototipo se usó el chip MCP73833 de Microchip para cargar la batería, este chip suministra corriente constante hacia la batería con regulación térmica para evitar daños durante la carga. La corriente de carga se puede configurar por medio de la resistencia R4 que se muestra en la figura 3, para este caso fue configurada para entregar 1 amperio, lo anterior se demuestra en la ecuación (3) (Microchip Technology Inc, 2006)

$$I_{REG} = \frac{1000V}{K} \quad (3)$$

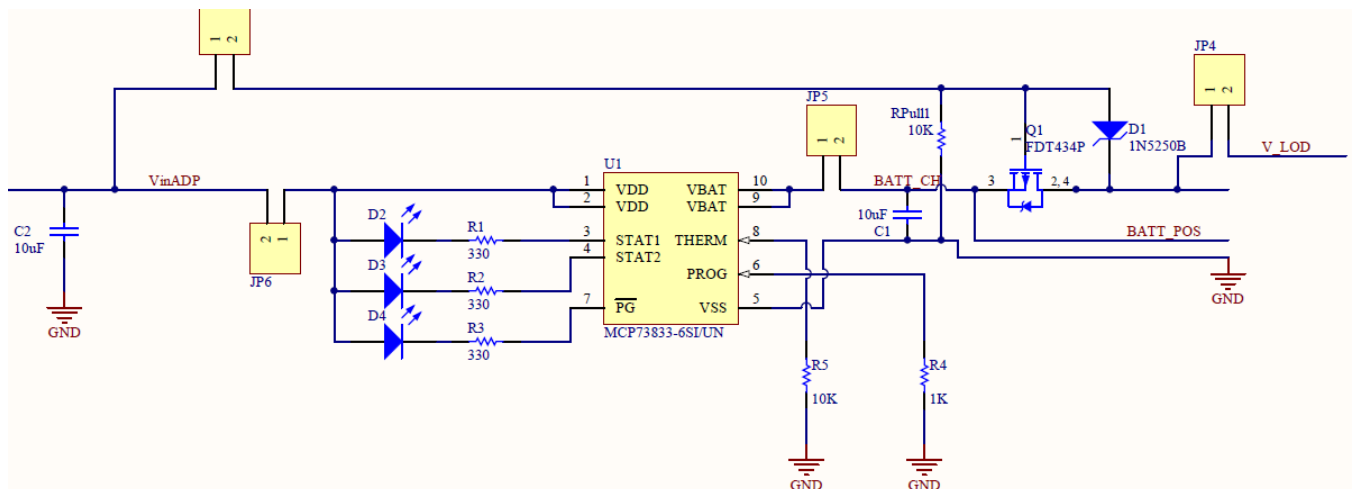


Figura 3. Circuito cargador de batería usando el chip MCP73833 de Microchip con distribución dinámica de potencia.

3. RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA DINÁMICA

En la figura 4 se muestra la respuesta del sistema durante la conexión y desconexión del adaptador de voltaje para el convertidor elevador de 5 voltios, se puede observar que en la entrada del convertidor (gráfica roja) hay una caída del voltaje que se produce por desconectar el adaptador, durante esta conmutación la salida del convertidor (gráfica azul) no presenta cambios significativos que puedan alterar el funcionamiento de la carga. Cuando se Conecta nuevamente el adaptador, observamos un aumento de voltaje en la entrada del convertidor (gráfica roja), y la salida del convertidor (gráfica azul) permanece estable en 5 voltios aproximadamente.

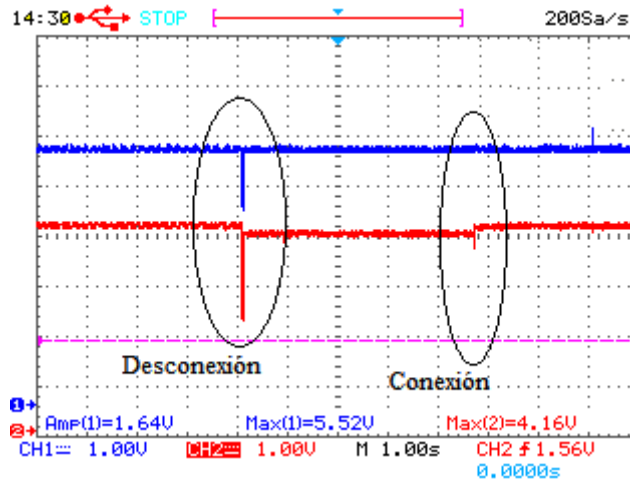


Figura 4. Acción de durante la conexión y desconexión del adaptador de voltaje.

La figura 5-a representa el tiempo que tarda el voltaje de salida del convertidor (gráfica azul) en estabilizarse debido a la conmutación de la fuente de alimentación. Según la figura 5-a este tiempo es de 29,6 milisegundos que es relativamente corto y no afecta significativamente a la carga que se va a alimentar.

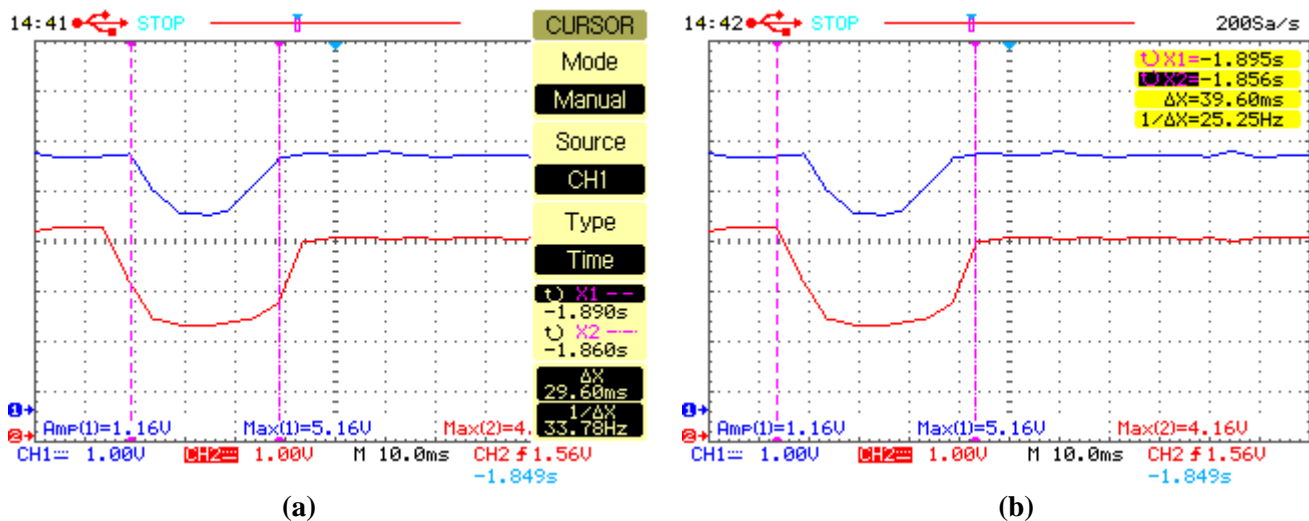


Figura 5. (a) Tiempo que tarda en estabilizarse el voltaje en la salida del convertidor. (b) Tiempo que tarda en estabilizarse el voltaje de entrada del convertidor.

La figura 5-b muestra el tiempo que tarda la fuente de alimentación (gráfica roja) en estabilizarse cuando ha ocurrido un cambio de fuente de alimentación del adaptador de voltaje a la batería. Según la gráfica este tiempo es de 39.6 milisegundos, este tiempo es mayor al obtenido en la figura 5-a, debido a que el convertidor tiene capacitores de bypass que disminuyen el ruido generado durante la conmutación. La figura 6 muestra la reacción en la entrada (gráfica roja) y salida (gráfica azul) del convertidor, cuando hay una conmutación en el voltaje de alimentación de la batería al adaptador. El voltaje mínimo en la entrada del convertidor durante la conmutación es de 3.64 voltios, mientras que el voltaje en la salida del convertidor se mantiene constante a 5.08 voltios. En esta grafica también observamos que cuando conmutamos la fuente de alimentación de la batería al adaptador de voltaje, la salida del convertidor se mantiene estable.

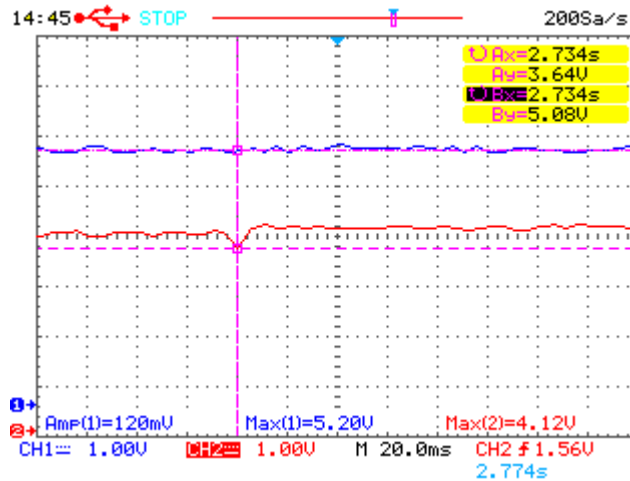


Figura 6. Conmutación de la fuente de alimentación de la batería al adaptador de voltaje.

3.2 RESULTADOS CONVERTIDOR DC-DC DE 5 VOLTIOS

La figura 7-a muestra el voltaje de salida del convertidor cuando la fuente de alimentación es conectada. Los dos cursores indican los voltajes máximo y mínimo que se generan, observamos que el cursor que está en la parte inferior tiene un voltaje de 0 voltios, en ese momento la fuente de alimentación se encuentra apagada, cuando se conecta dicha fuente, el voltaje en la salida del convertidor llega a un voltaje máximo de 5.52 voltios. La figura 7-b muestra el tiempo que tarda la señal en pasar de su nivel más bajo a su nivel máximo de voltaje, este tiempo es de 12.8 milisegundos y el tiempo de estabilización de la señal es aproximadamente 55 milisegundos.

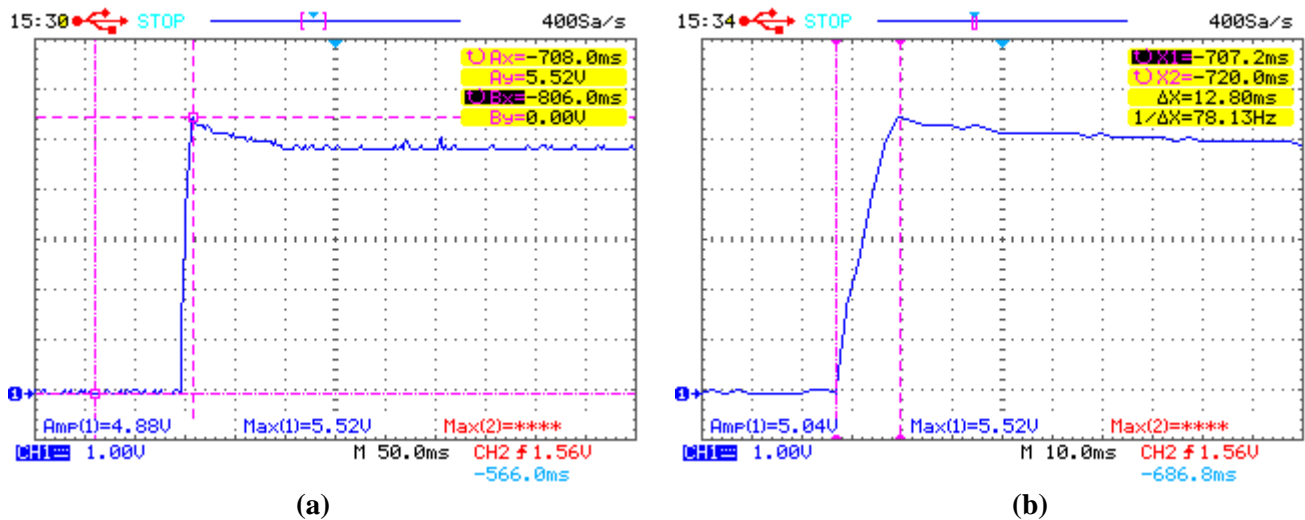


Figura 7. (a) Salida convertidor elevador 5V. (b) Tiempo que tarda la señal en pasar de 0 a 5.52V

En la tabla 1, la primera columna indica la carga puesta a la salida del convertidor, la segunda columna (I_{in}) indica la corriente entregada por la batería, la tercera columna (V_{in}) es el voltaje en la entrada del convertidor, que corresponde al mismo voltaje que entrega la batería, la cuarta columna es el voltaje de salida del convertidor y la última columna indica la eficiencia del convertidor. Hay que tener en cuenta que el convertidor diseñado fue para una carga que exija máximo 175 miliamperios, pero se tomó una medición para una carga de hasta 300 miliamperios para observar la reacción del convertidor.

Tabla 1: Eficiencia convertidor elevador de 5 voltios con la batería como fuente de alimentación.

Convertidor 5 voltios				
Carga	I_{in} (A)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	Eficiencia (%)
100mA	0,155	4	4,99	80,5
200mA	0,308	3,88	4,96	83
300mA	0,493	3,72	4,91	80,3

En la tabla 2 observamos la eficiencia del convertidor cuando la fuente de alimentación es el adaptador, la eficiencia no varía demasiado respecto de la tabla 1, observamos que para cada nivel de carga la corriente y voltaje entregados al convertidor son casi los mismos, los valores de eficiencia salvo en la carga de 100 miliamperios son muy parecidos.

Tabla 2: Eficiencia convertidor elevador de 5 voltios con el adaptador de voltaje como fuente de alimentación.

Convertidor 5 voltios				
Carga	I_{in} (A)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	Eficiencia (%)
100mA	0,15	3,96	4,96	83,5
200mA	0,31	3,85	4,94	82,8
300mA	0,49	3,7	4,8	79,4

3.3 RESULTADOS CONVERTIDOR DC-DC DE 12 VOLTIOS

En la figura 8-a se muestra el voltaje en la salida del convertidor elevador de 12 voltios, esta presenta una diferencia notable respecto de la figura 7-a en cuanto al impulso generado, ya que presenta un impulso menor que el convertidor dc-dc de 5 voltios. También observamos los voltajes máximos y mínimos de 12.6 y 0 voltios respectivamente, con un voltaje promedio de 12.3 voltios.

En la figura 8-b tenemos el tiempo que tarda la señal en pasar de un nivel bajo a un nivel alto de voltaje, este tiempo según la gráfica es de 31.2 milisegundos, mayor al obtenido en el convertidor de 5 voltios, esto se debe a que el convertidor tiene que llegar a un nivel superior de voltaje y por tal motivo tiende a tardar más tiempo. El tiempo de estabilización de la señal es de 75 milisegundos aproximadamente.

Las tablas 3 y 4 muestran la eficiencia del convertidor dc-dc de 12 voltios cuando la fuente de alimentación es la batería y adaptador de voltaje respectivamente. En la tabla 4 se muestra que la eficiencia disminuye notablemente cuando la carga exige más de 200 miliamperios, esto se debe a que el diseño del convertidor fue para una carga que exija máximo 175 miliamperios.

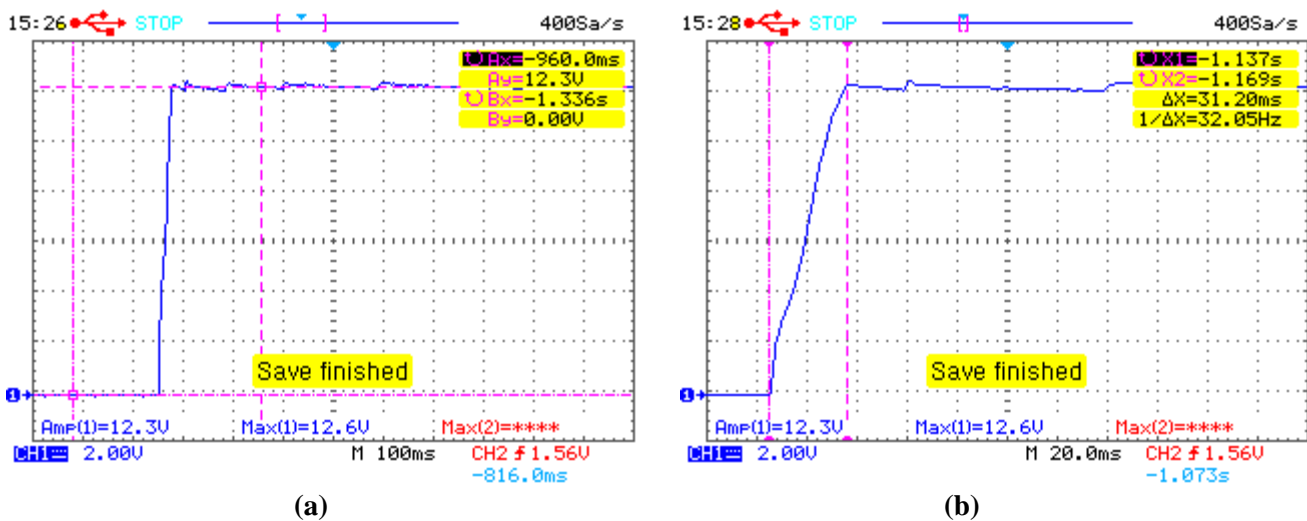


Figura 8. (a) Salida convertidor elevador 12 voltios. (b) Tiempo que tarda la señal en pasar de 0 voltios a 12.3 voltios

Tabla 3. Eficiencia del convertidor elevador de 12 voltios con la batería como fuente de alimentación

Convertor DC/DC 12v				
Carga	I _{in} (A)	V _{in} (V)	V _{out} (V)	Eficiencia (%)
100mA	0,403	3,73	12,27	81,6
130mA	0,566	3,58	12,27	78,72
140mA	0,65	3,5	12,27	75,51

Tabla 4: Eficiencia convertidor elevador de 12 voltios con el adaptador de voltaje como fuente de alimentación.

Convertidor 12v-elevador				
Carga	I _{in} (A)	V _{in} (V)	V _{out} (V)	Eficiencia (%)
100mA	0,39	3,76	12,24	81,8
200mA	1	3,3	8,96	53,9
300mA	1,02	3,3	5,68	50,5

3.3 RESULTADOS CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA

La figura 9-a muestra la curva de descarga de la batería cuando se le exige 1 amperio durante una hora, se observa que durante los primeros 5 minutos el voltaje cae rápidamente de 4.1 a 3.7 voltios aproximadamente; luego la caída de voltaje tiende a ser lineal hasta los 52 minutos aproximadamente; a partir de ese punto el voltaje cae rápidamente a 2.88, que es el voltaje mínimo que la batería puede entregar para evitar daños. En el momento que el voltaje fue de 2.88 se desconectó la carga de la batería para evitar que esta sufriera daños; este voltaje mínimo ocurre a los 58 minutos. Observamos que el tiempo de operación de la batería fue de 52 minutos, el cual concuerda con la hoja de dato de la batería usada (batería Li-polímero modelo 063450 1000mAh)

La figura 9-b muestra la curva de carga de la batería usando el cargador mencionado anteriormente, es importante resaltar que la batería está totalmente descargada en condiciones iniciales. El voltaje mínimo de carga es de 3.72 voltios y el voltaje máximo de carga es de 4,1 voltios aproximadamente a los 60 minutos.

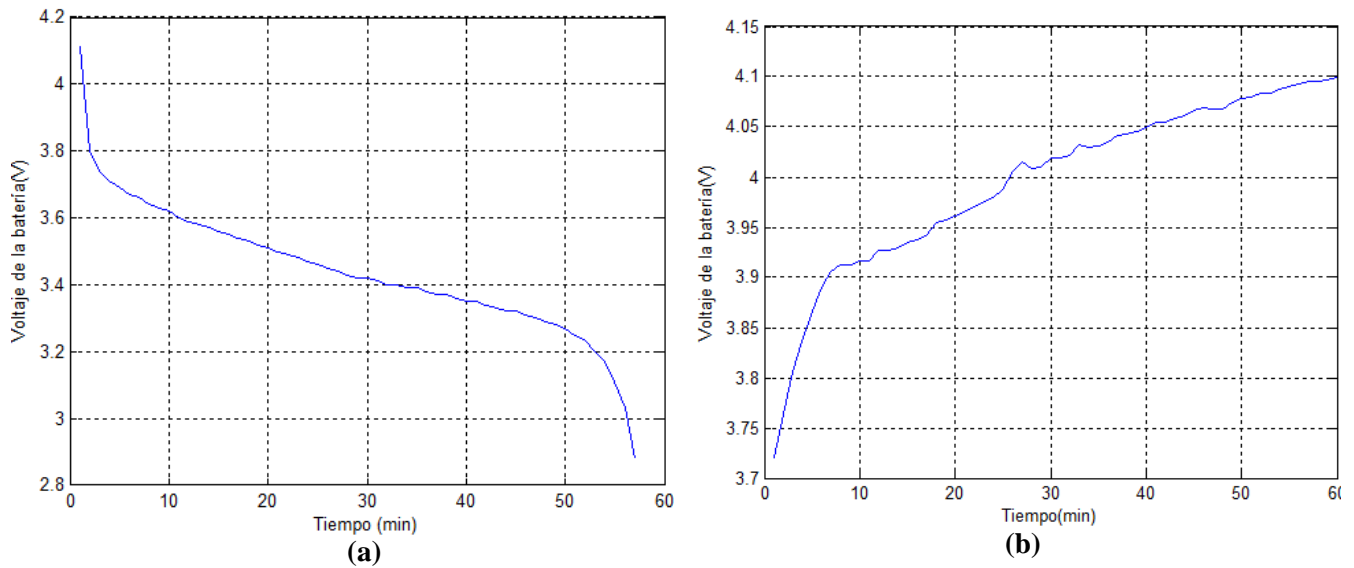


Figura 9. (a) Estado de descarga de la batería a 1 amperio (b) estado de carga de la batería a 1 amperio

La figura 10-a muestra la vista superior del prototipo implementado, se puede observar el conector pc-104 usado en las misiones de CubeSats, el adaptador de voltaje y los circuitos integrados con sus respectivos elementos para su funcionamiento como el convertidor dc-dc y el cargador de batería. La figura 10-b muestra la vista inferior del prototipo donde se tienen algunos elementos como la distribución de potencia dinámica.

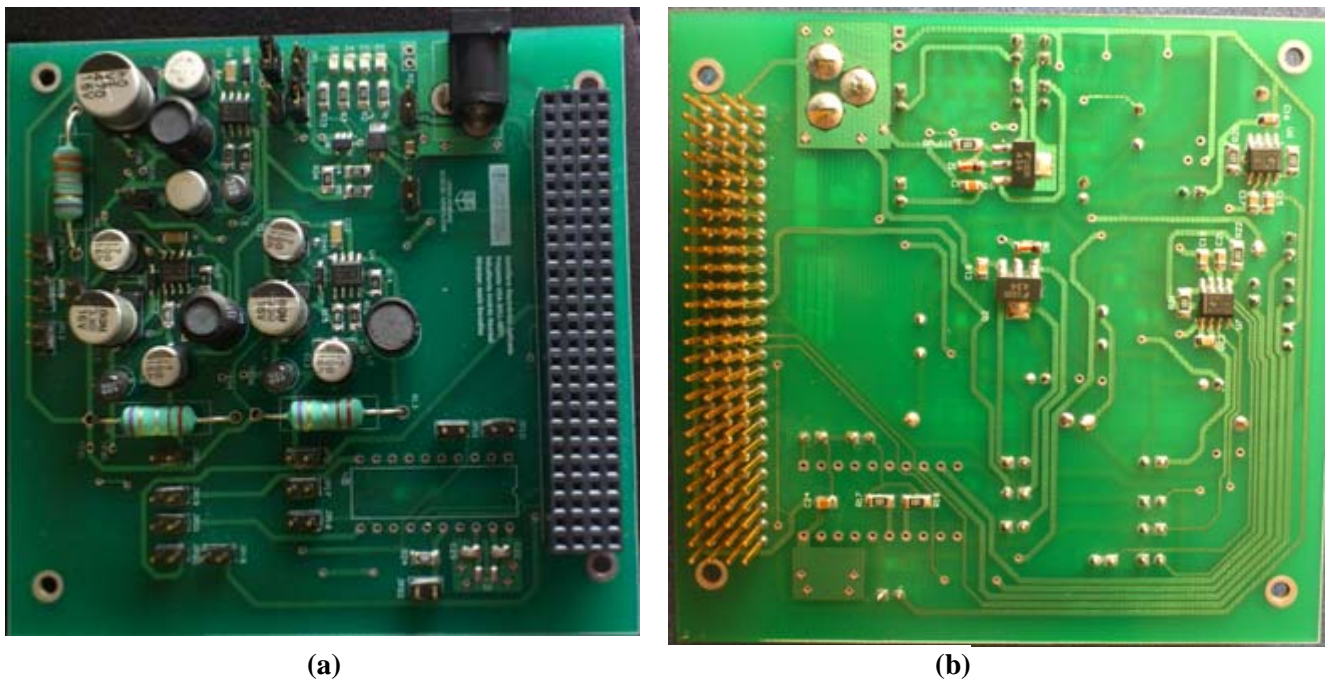


Figura 10. (a) Vista superior del prototipo implementado. (b) Vista inferior del prototipo implementado

4. CONCLUSIONES

Se mostró la implementación de un prototipo de un sistema de energía para cubesats y balloonsats, el cual es alimentado por una batería de litio-polímero (Li-Po) de 3.7V. Usando convertidores dc-dc de tipo elevador se generaron niveles de 5V y 12V, los cuales son los valores típicos de alimentación para las diferentes cargas de estas plataformas.

Se incluyó en el diseño un cargador de batería basado en el circuito integrado MCP73833, el cual carga la batería controlando el voltaje y corriente de acuerdo a los requerimientos de protección. Además, se incluyó distribución de potencia dinámica, permitiendo el uso del prototipo en aplicaciones terrestres como sistema ininterrumpido de potencia para niveles de 5V y 12V en corriente continua. Los resultados mostraron una variación del voltaje en la carga por un tiempo cercano a los 30ms cuando se conmuta entre el adaptador externo y las baterías.

Los circuitos usados para la implementación del elevador de voltaje mostraron una regulación con un error de 1% aproximadamente y una eficiencia de alrededor de 80% para la carga diseñada. El aumento en la carga por encima del valor diseñado afecta estos parámetros incrementando el error y disminuyendo la eficiencia. Por lo tanto, se debe especificar claramente las características de la carga al momento de diseñar los convertidores de voltaje.

En trabajos futuros se comparan diferentes circuitos integrados para la implementación de los convertidores de manera que se seleccionen los de mayor eficiencia y menor error de regulación. De manera que se aprovecha más la energía almacenada en las baterías. Adicionalmente, se considerará el uso de celdas solares como fuente externa para misiones de mayor duración.

REFERENCIAS

- Becnel, M. (2011). *Balloonsat as a platform for deploying the neutron counter. 62nd International Astronautical Congress 2011, IAC 2011 (Vol. 4, pp. 2682–2686)*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84864083922&partnerID=40&md5=389baf035445e138b3912fdf36efc658>
- Erickson, R., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics (2nd Edition.)*. New York: Springer.
- Heidt, H., Puig-Suari, J., Moore, A. S., Nakasuka, S., & Twiggs, R. J. (2000). *CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation*. Small, 19.
- Hussein, A. A.-H., & Batarseh, I. (2011). A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(3), 830–838. doi:10.1109/TVT.2011.2106527
- Microchip Technology Inc. (2008). *Li-Ion System Power Path Management Reference Design*. U.S.A. Retrieved from <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51746a.pdf>
- Patel, M. (2005). *Spacecraft Power System (1st Editio.)*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Sekander, S., & Harmouch, M. (2007). *Application of the MC34063 Switching Regulator*. U.S.A.: Texas Instrument Inc. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/an/slva252b/slva252b.pdf>
- Shiroma, W. a., Martin, L. K., Akagi, J. M., Akagi, J. T., Wolfe, B. L., Fewell, B. a., & Ohta, A. T. (2011). *CubeSats: A bright future for nanosatellites*. *Central European Journal of Engineering*, 1(1), 9–15. doi:10.2478/s13531-011-0007-8
- Texas Instrument Inc. (2011). *MC34036 1.5-A Boost/Buck/Inverting Switching Regulator*. U.S.A. Retrieved from <http://www.ti.com/product/mc34063a>
- Microchip Technology Inc. (2006). *Microchip Technology Inc*. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22005b.pdf>

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.