

Tendencia de las Tecnologías de Acondicionamiento y Distribución de Potencia en Nanosatélites Tipo CubeSat 1U

Diego J. Pérez R.*, Carlos L. Salinas L.**

*Agencia Bolivariana para las Actividades Espaciales (ABAE), Venezuela

**Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico, Venezuela

dperez@abae.gob.ve

csalinas@fii.gob.ve

Resumen – Este artículo presenta una investigación documental acerca de las tendencias tecnológicas del acondicionamiento y distribución de potencia en los sistemas de suministro de energía eléctrica de nanosatélites tipo *CubeSat* de 1U; comprende el estudio de la información disponible en la web, de los cincuenta y dos (52) *CubeSats* de 1U que han sido lanzados desde Enero 2013 hasta Julio 2014. Como resultado se muestran las selecciones específicas de arquitectura, método de transferencia de energía y configuración de *bus* implementados en ellos. Se desarrolla también una breve descripción de dichas tecnologías y la razón por la cual han sido seleccionadas por diversas plataformas. Todo ello con la finalidad de proveer información de los diseños que han sido probados en el espacio, de forma tal que sirva de insumo en el proceso de selección de la configuración de un sistema de suministro de energía eléctrica para un futuro desarrollo de un *CubeSat*. Se incluyen recomendaciones con especial énfasis en sistemas flexibles capaces de ser utilizados en diferentes misiones.

Palabras clave: Arquitectura, Transferencia Directa de Energía, Seguimiento de Punto Máximo de Potencia, *Bus* de Potencia y *Bus* de Batería.

Abstract – This paper presents a documentary research on the technological trends of power conditioning and distribution in electric power supply subsystems of 1U *CubeSats*; it comprises a study of the information available on-line of the fifty-two (52) 1U *CubeSats* launched from January 2013 to July 2014. As a result the specific selections of architecture, regulation and bus configuration used are shown. A brief description of those technologies and why they have been selected for various platforms are also included. The purpose of this research is provide information of the designs that have been tested in space, a helpful input in the selection process of the configuration of a power supply system for future *CubeSat* projects. Recommendations with particular emphasis on a flexible system design, able to be used on different missions are presented.

Keywords: Architecture, Direct Energy Transfer, Maximum Peak Power Tracker, Power Bus, Battery Bus.

I. INTRODUCCIÓN

El interés mundial por los *CubeSats* ha aumentado de manera acelerada en los últimos años; tanto, que la cantidad de misiones

CubeSat puestas en órbita, desde Enero de 2013 hasta Julio de 2014, supera el total de *CubeSat* desarrollados desde que el primer nanosatélite diseñado según las especificaciones creadas por Bob Twiggs y Jordi Puig-Suari [1], fue lanzado en el año 2003. Como consecuencia de la gran cantidad de *CubeSats* desarrollados, nuevas tecnologías son puestas a prueba continuamente, permitiendo que tanto tecnologías emergentes como maduras se afiancen o excluyan en el diseño de estos satélites.

La revisión de las tecnologías utilizadas en los sistemas de suministro de energía eléctrica permite conocer el estado actual a nivel mundial de las nuevas tendencias de diseño. Lo que se convierte en un valioso insumo y un paso fundamental previo al diseño de cualquier satélite

II. LA INVESTIGACIÓN

El insumo inicial para el estudio fue la base de datos de pequeños satélites de la *Technische Universität Berlin* [2], la cual contiene información básica de todas las misiones de pequeños satélites lanzados desde el 2003 hasta Julio de 2014, esta información fue filtrada con la finalidad de obtener sólo las misiones *CubeSat* de 1U lanzadas entre el periodo comprendido en esta investigación. Obteniendo como resultado cincuenta y dos (52) satélites *CubeSat* de 1U que serán estudiados.

En la recopilación de la información del diseño del subsistema *EPS* de cada uno de los *CubeSats* se encontraron diversas complicaciones y factores que influenciaron los resultados del presente estudio. A continuación son mencionados:

En primer lugar, la cantidad de información disponible en línea acerca de estos satélites es limitada debido a lo reciente de las misiones.

En segundo lugar, la información detallada de diseño y específicamente del subsistema *EPS* de los *CubeSats* desarrollados por instituciones gubernamentales o empresas privadas resulta prácticamente inexistente en la web, por lo que la mayor cantidad de información provino de los diseños de *CubeSats* desarrollados por universidades o instituciones similares.

Por último, se pudo observar que una cantidad considerable de los *CubeSats* estudiados utilizan tarjetas comerciales para el subsistema *EPS*; estas tarjetas son normalmente utilizadas con la finalidad de simplificar el desarrollo del satélite y disminuir los tiempos asociados al diseño, implementación y pruebas. Este mercado se ve actualmente dominado por dos fabricantes: *GomSpace* [3] y *ClydeSpace* [4], las cuales presentan características muy similares en cuanto a su diseño y rendimiento. En estos casos los desarrolladores de *CubeSat* se muestran más abiertos en

compartir las especificaciones técnicas ya que no se tratan de diseños propios si no comerciales, y la información de ellos está disponible en línea.

Se encontró información suficiente para la investigación de veintiocho (28) de *CubeSats*. Los parámetros estudiados del subsistema de suministro de energía eléctrica incluyen:

- La arquitectura.
- El método de transferencia de energía.
- La configuración del *bus*.

III. ARQUITECTURA

Se define como arquitectura el esquema de distribución de potencia hacia todos los usuarios del subsistema de suministro de energía eléctrica, es clasificada generalmente en dos configuraciones: Centralizadas y Distribuidas.

A. Tendencias en la Arquitectura.

Se encontró información referente a la arquitectura del subsistema EPS utilizada en veintiocho (28) *CubeSats*. En la Figura 1 se muestran los resultados de la investigación, en ella puede observarse la clara tendencia en la implementación de arquitecturas centralizadas con un 98% de los satélites contra un 2% que utilizan arquitecturas distribuidas.

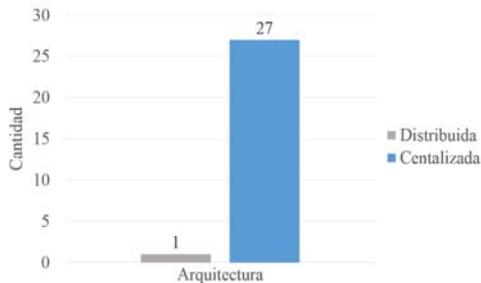


Fig. 1 Tendencia de la arquitectura del subsistema EPS.

B. Descripción de las Tecnologías

1) Arquitectura Centralizada

En la arquitectura centralizada se distribuyen todos o la mayoría de niveles de tensión utilizados por los distintos subsistemas del satélite desde una locación central, mediante la implementación de diferentes buses. Sin embargo algunos sistemas centralizados implementan regulación en la entrada de las cargas para niveles de tensión especiales no distribuidos por el subsistema *EPS*. La Figura 2 ilustra la configuración básica de una arquitectura centralizada.

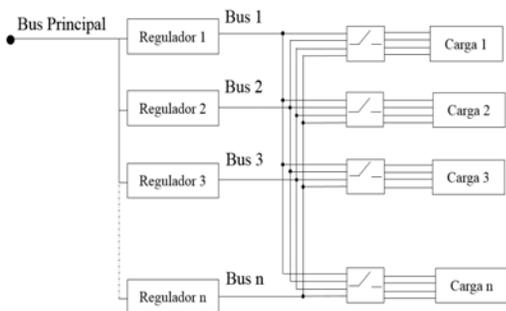


Fig. 2 Diagrama de la Arquitectura Centralizada.

2) Arquitectura Distribuida

En la arquitectura distribuida la energía es transmitida a las diferentes cargas del satélite mediante un solo *bus* en cual puede ser o no regulado, dejando a las cargas la tarea de convertir el nivel de tensión del *bus* a las diferentes tensiones requeridas por ellos mediante reguladores de punto de carga o *POL (Point-of-Load)*. La Figura 3 ilustra la configuración básica de la arquitectura distribuida.

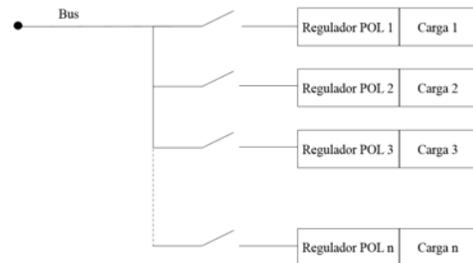


Fig. 3 Diagrama de la Arquitectura Distribuida.

C. Análisis de las Tendencias

Es notable la marcada tendencia en el uso de arquitecturas centralizadas en *CubeSats*, la ventaja principal que presenta este tipo de la arquitectura es la reducida cantidad de reguladores necesarios, ya que un solo regulador puede proveer alimentación regulada a diversas cargas o subsistemas que compartan un mismo nivel de tensión de entrada. Esto permite que el subsistema EPS sea simple, liviano, pequeño y económico, todas estas características valiosas para un *CubeSat* debido a las fuertes limitaciones de presupuesto de masa, volumen y costo de estos proyectos. Sin embargo, es importante acotar que estos beneficios pueden ser logrados siempre y cuando la mayoría de las cargas compartan tensiones de alimentación similares.

Una de las desventajas en la implementación de esta arquitectura es que el regulador debe ser dimensionado para alimentar simultáneamente a todas las posibles cargas conectadas a él, por lo tanto el diseñador debe dimensionar el regulador para la peor condición de carga esperada. Esto significa que cuando no se cumpla esta condición, el regulador operará por debajo de su curva de eficiencia, llevando al sistema a operar normalmente en condiciones no óptimas.

Otra desventaja de esta arquitectura se presenta al tener buses con bajos niveles de tensión, ya que a medida que aumente las cargas conectadas a él aumentará significativamente las pérdidas en el conductor.

Generalmente en el proceso de desarrollo de un nuevo satélite, al momento de iniciar el diseño del subsistema de energía eléctrica, no se cuenta con un diseño totalmente maduro de las cargas, por ello los requerimientos de los usuarios puedan variar a medida que el diseño evolucione. La arquitectura centralizada presenta poca adaptabilidad a dichos cambios.

A pesar del extensivo uso de la arquitectura centralizada en los *CubeSats* es importante señalar que los sistemas distribuidos presentan atractivas ventajas para sistemas *EPS* diseñados con un enfoque flexible. Un estudio extensivo de este tema realizado por Burt [5], presenta las siguientes ventajas en la implementación de una arquitectura distribuida:

- Permite modificar la alimentación requerida por los usuarios simplemente modificando un convertidor sin tener que alterar nada más en el circuito. Lo que representa una gran ventaja cuando no se cuenta con los

requerimientos de las cargas o el diseño del sistema no es maduro.

- El uso de reguladores en el punto de carga permite al diseñador optimizar el diseño o selección de los reguladores. Las corrientes en el punto de carga suelen variar en menor proporción que las corrientes de carga a nivel de sistema, debido a ello los reguladores seleccionados pueden trabajar en un punto más cercano a su curva de eficiencia.
- Los reguladores de punto de carga suelen ser de menores dimensiones y requieren inductores y/o condensadores más pequeños que los tradicionales reguladores de bus.
- Es posible aislar las cargas específicas utilizando reguladores de punto de carga, lo que incrementa la compatibilidad electromagnética mediante la filosofía de punto único de puesta a tierra, incluso sin un aislamiento total, cada carga está menos sujeta a interferencias provenientes de otras cargas.
- Un control de encendido y apagado simple puede ser implementado. Debido a que sólo un nivel de tensión es distribuido, los interruptores para cada carga son idénticos y su diseño más sencillo.

La implementación de esta arquitectura posee una importante restricción ya que sólo puede ser utilizada con usuarios que consideren dentro de su diseño sistemas de regulación de entrada, en el caso de los *CubeSats* donde varios subsistemas o tarjetas comerciales son utilizadas, resulta particularmente complejo la implementación de módulos adicionales para la regulación de las tensiones de entrada.

Sería interesante la posible estandarización de la alimentación de las tarjetas con reguladores *POL*, para que de esta manera esta arquitectura pueda ser implementada de forma más frecuente.

IV. MÉTODO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.

El método de transferencia de energía se refiere a como se regula y transfiere la energía generada por los paneles solares al bus principal. Se divide fundamentalmente en dos esquemas, el sistema transferencia directa de energía o *DET* (*Direct Energy Transfer*) y el sistema de seguimiento de punto máximo de potencia o *MPPT* (*Maximum Peak Power Tracker*).

A. Tendencias del Método de Transferencia de Energía.

De los cincuenta y dos (52) satélites investigados fue posible obtener información del método de transferencia de energía de veintiséis (26) de ellos, los resultados se presentan en la Figura 4.

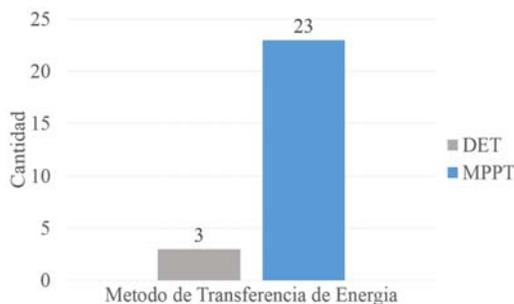


Fig. 4 Tendencia del método de transferencia de energía en el subsistema EPS.

B. Descripción de las Tecnologías

1) Transferencia Directa de Energía (DET)

El sistema de transferencia directa de energía también llamado sistema disipativo (Figura 5), comprende la conexión directa del panel solar y de las baterías al *bus* principal, y este a su vez a las cargas. Usualmente se utilizan resistencias en derivación para disipar la potencia no requerida y mantener el *bus* en un nivel de tensión predefinido. El no utilizar ningún procesador de potencia intermedio se traduce en sistemas muy simples con altos niveles de eficiencia.

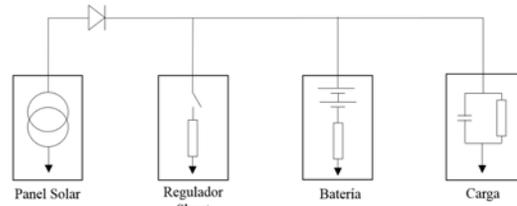


Fig. 5 Diagrama del sistema de Transferencia Directa de Energía.

2) Seguimiento de Punto Máximo de Potencia (MPPT)

En el sistema de seguimiento de punto máximo de potencia o sistema no disipativo (Figura 6), el panel solar no se conecta directamente al *bus* principal, existe un convertidor intermedio que permite variar la tensión de trabajo del panel, de forma tal que pueda operar en el punto de potencia máximo. Este ajuste debe ser realizado considerando las características de la carga y de las condiciones de iluminación, tales como el ángulo de incidencia solar con el panel solar, la temperatura de operación y el daño por radiación de las celdas solares, ya que todos ellos conllevan a variaciones en la tensión generada. Debido a que en este método se controla la potencia extraída del panel solar no es necesario el uso de disipadores, ya que sólo se genera la potencia requerida.

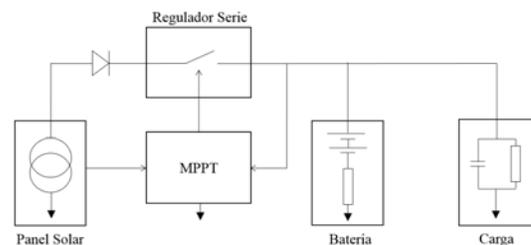


Fig. 6 Diagrama de sistema de Seguimiento de Punto Máximo de Potencia.

C. Análisis de la Tendencia

Durante el estudio, se pudo notar el cambio significativo que ha sufrido el diseño de los sistemas *EPS* de *CubeSats* respecto al método de transferencia de energía en los últimos años. La Figura 7 presenta un gráfico comparativo entre los resultados obtenidos en la investigación realizada por Osman [6] en el año 2012 y los resultados obtenidos en la presente investigación.

En este gráfico es posible observar el cambio de la tendencia en los últimos años hacia la implementación de sistemas *MPPT*. Para el año 2012, un 44,4% de los *CubeSat* utilizaban sistemas *DET* contra un 65,6% de sistemas *MPPT*. La presente investigación muestra que un 88% de los *CubeSat* lanzados entre el año 2013 y 2014 utilizan sistemas *MPPT*.

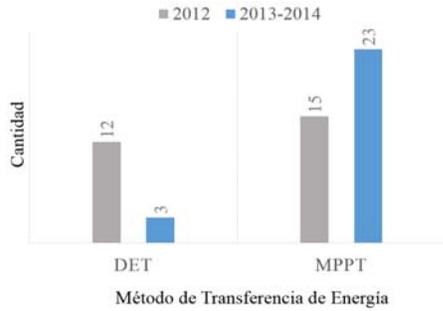


Fig. 7 Comparación de tendencias del método de transferencia de energía.

El significativo aumento en la implementación de este método ha sido generado debido a que el control *MPPT* es especialmente útil en misiones que presentan grandes variaciones de temperatura e iluminación, ya que estos parámetros junto a la degradación del panel generan un continuo movimiento del punto de máxima potencia o *MPP* del panel solar. En la Figura 8 se puede observar el movimiento del punto de máxima potencia debido a los cambios de temperatura y en la Figura 9 debido a los cambios en las condiciones de iluminación

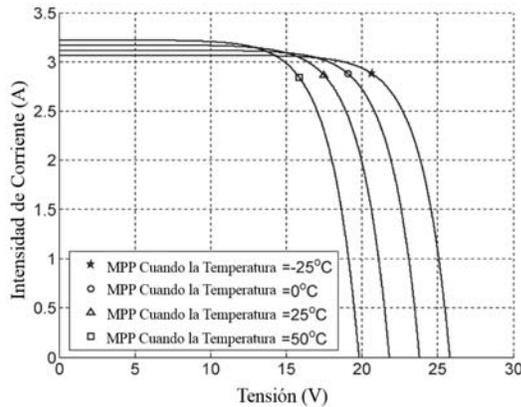


Fig. 8 Curva V-I de una celda solar en función de la temperatura con iluminación constante. [7]

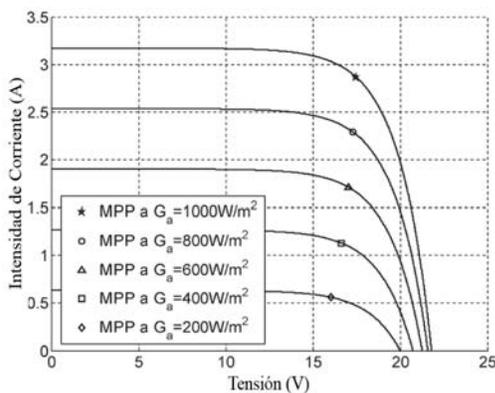


Fig. 9 Curva V-I de una celda solar en función de la iluminación con temperatura constante [7]

Además de los continuos cambios de las condiciones externas generadas por la órbita *LEO*, en la que se encuentran la mayoría de *CubeSat*, los paneles solares fijos utilizados en ellos, bien sea ubicados en la superficie del satélite o paneles desplegables,

perciben cambios aún más drásticos al no poder ser orientados a la fuente de iluminación.

Por lo anteriormente expuesto resulta claro el beneficio de utilizar un sistema flexible capaz de adaptarse a las diferentes características de funcionamiento a las que será expuesto el panel solar; otras ventajas de la implementación de sistemas *MPPT* son descritas a continuación [8]:

- Permite el uso de diferentes tipos celdas solares y diferentes configuraciones del panel solar.
- El control *MPPT* puede ser utilizado para cada panel individualmente lo que permite que el control sea ajustado a las condiciones específicas de cada uno.
- Proporciona una degradación reducida del sistema con la pérdida de un panel solar o un control *MPPT*.
- La batería normalmente necesita ser cargada en casi todo el periodo de iluminación, por lo que la pérdida de potencia de un regulador en serie con el panel solar tiene poco impacto en la eficiencia total del sistema de *EPS*.
- La conexión directa entre la batería y el *bus* proporciona una mayor eficiencia durante el eclipse.
- Las desventajas que estos sistemas presentan son la complejidad del diseño, la disminución de la eficiencia y el incremento de masa, volumen y costo en comparación de los tradicionales sistemas *DET*.

Una nueva tendencia pudo ser observada durante el desarrollo de la investigación. El nuevo circuito integrado SPV1040 [9] es un convertidor capaz de realizar la función *MPPT* para el acondicionamiento de la potencia generada por celdas solares mediante el uso de un algoritmo de control “perturbar y observar” además de ofrecer diferentes protecciones todo incluido en un solo *chip*. A pesar de que se tiene información de su uso en algunas de las plataformas lanzadas aun no cuentan con experiencia de vuelo verificable. La Figura 10 muestra el diagrama de bloque del regulador SPV1040.

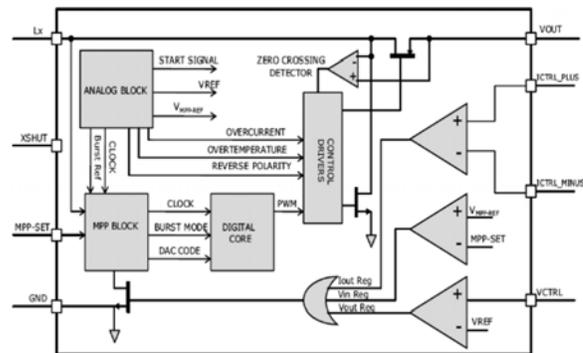


Fig.10 Diagrama de bloque del circuito integrado SPV1040 [9].

El uso de estos circuitos integrados otorga importantes niveles de flexibilidad al sistema de acondicionamiento ya que cada panel puede ser controlado de forma sencilla, autónoma y con relativamente bajo impacto en el presupuesto del subsistema.

V. CONFIGURACIÓN DEL BUS

La configuración del *bus* comprende la cantidad de buses del sistema, su nivel de tensión y tipo de regulación. Esta configuración depende en gran medida de la arquitectura seleccionada, de los requerimientos de niveles de tensión de entrada de los usuarios y de la potencia que será distribuida.

A. Tendencias de Configuración del Bus

En la investigación se logró recolectar datos referentes a la configuración del bus de veintiocho (28) satélites de los cincuenta y dos (52) estudiados. La Figura 11 muestra la cantidad de buses por satélite y la Figura 12 muestra los niveles de tensión y tipo de regulación suministrados por el subsistema EPS.

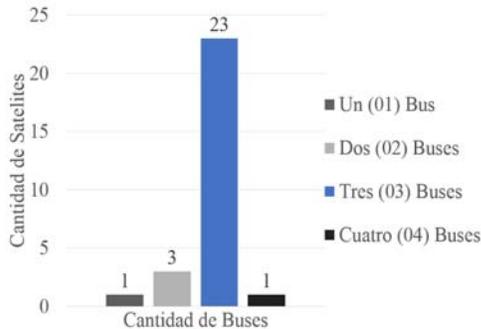


Fig. 11 Cantidad de buses implementados.

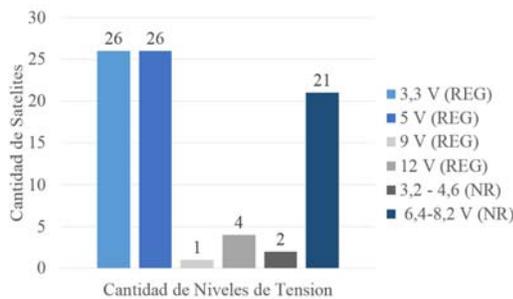


Fig. 12 Niveles de tensión distribuidos.

B. Descripción de las Tecnologías

La selección de nivel de tensión de un *bus* dependerá principalmente del nivel de tensión de alimentación de las cargas, sin embargo es necesario considerar otros factores; tensiones muy altas dentro del sistema pueden conllevar a problemas de compatibilidad electromagnética y tensiones muy bajas incrementan la pérdida de potencia en los conductores, es necesario considerar estas restricciones a la hora de diseñar el sistema EPS.

En cuanto a la cantidad de buses dependerá del tipo de arquitectura seleccionada y de los parámetros de alimentación de las cargas. La mayoría de configuraciones para *CubeSat* pueden sintetizarse en cuatro (04) tipos: bus único, bus de alta tensión y bus de baja tensión, buses múltiples y bus de batería.

1) Bus Único

En la configuración de *bus* único (Figura 13) tanto la tensión de las baterías como la tensión del panel solar son reguladas, la cantidad de equipos necesarios para esta tarea dependerá del tipo de regulación requerido. Las ventajas de esta configuración son la simplicidad, peso, volumen y costo reducido del sistema central y la tensión regulada para la alimentación de los usuarios, sin embargo su confiabilidad es baja por sólo existir una vía de suministro, creando en el bus un punto único de falla.

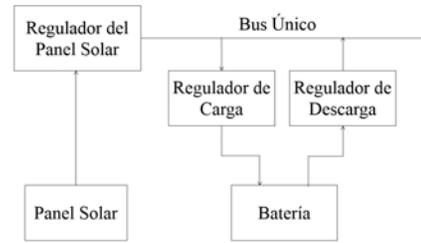


Fig. 13 Configuración de Bus Único.

Esta configuración es utilizada en la arquitectura distribuida por lo que presenta las ventajas y desventajas propias de ella, pero además se suma el sobre-dimensionamiento de los reguladores y la baja eficiencia que ello significa.

2) Bus de Alta Tensión y Bus de Baja Tensión.

La implementación de un *bus* de alta tensión y un *bus* de baja tensión es lograda mediante el uso de convertidores para elevar y disminuir la tensión de un bus principal. La Figura 14 muestra el diagrama de bloque de esta configuración.

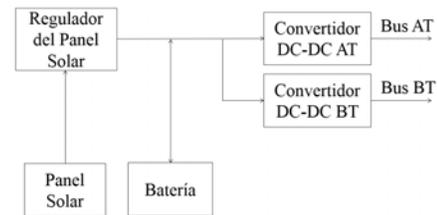


Fig. 14 Configuración de Bus de alta tensión y Bus de baja tensión.

Presenta la desventaja de duplicar el peso, volumen y costo con respecto a la configuración de bus único. Como beneficio permite separar las cargas con consumos altos de las cargas con bajos consumos, es usualmente utilizada para separar la alimentación de la plataforma y la alimentación de la carga útil. Esto permite tener un sistema más estable, separando las posibles interferencias en el bus causadas por la conexión y desconexión de cargas.

3) Buses Múltiples

La implementación de la configuración de buses múltiples (Figura 15) está asociada a la arquitectura centralizada donde se utilizan tantos buses como sean necesarios para alimentar la mayor parte de las cargas del satélite, la cantidad específica de buses y por lo tanto de convertidores es definida por los requerimientos de las cargas.

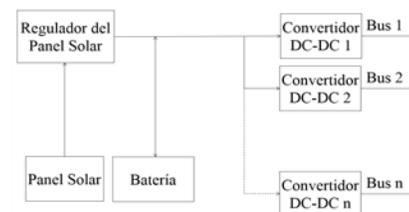


Fig. 15 Configuración de Buses Múltiples.

4) Bus de Batería

El bus de batería es un bus no regulado alimentado directamente de la batería del satélite, es la configuración más simple ya que no requiere ningún tipo de convertidor. Este bus debe ser diseñado con la finalidad de presentar una tensión cercana a la tensión de alimentación de la mayoría de las cargas conectadas a él, permitiendo de esta manera la mayor eficiencia posible de los convertidores. Su configuración básica es mostrada en la Figura 16.

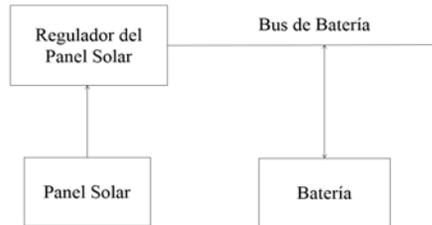


Fig. 16 Configuración de Bus de Batería

La tensión del bus de batería dependerá del tipo y cantidad de celdas en serie utilizadas. La Tabla I resume la tensión nominal, la tensión final de carga y la tensión final de descarga de cada celda de batería dependiendo de su química basado en la bibliografía consultada. [10] Es importante resaltar que estos valores pueden cambiar dependiendo del fabricante.

TABLA I
TENSION DE LAS CELDAS DE BATERÍA SEGÚN SU TIPO.

Tipo de Celda de Batería	Tensión Nominal (V)	Tensión Descargada (V)	Tensión Cargada (V)
NiCd	1,25	1,00	1,55
NiMH	1,25	1,00	1,55
Li-Ion	3,7	2,80	4,20
Li-Pol	3,7	2,80	4,20

El uso de esta configuración puede ser utilizada tanto en sistemas centralizados como distribuidos, sin embargo se debe tener en cuenta que la tolerancia de variación de tensión de entrada de los convertidores deben permitir la variación presente en el bus.

C. Análisis de la Tendencia

La configuración de bus más utilizada actualmente en los CubeSat es el uso de tres (03) buses: un bus de 5V, un bus de 3,3V y un bus de batería. A continuación se describe el por qué de estos niveles de tensión.

1) Bus de 5V y Bus de 3,3V.

El nivel de tensión de cinco (05) voltios es el nivel lógico conocido como VCC, es la tensión estandarizada para la alimentación de tecnología de transistores BJT y la tecnología de familias lógicas TTL, fue seleccionada con la idea de obtener el mejor balance entre la velocidad y la disipación de potencia.

A medida que los circuitos integrados evolucionaron se volvieron más pequeños y requerían trabajar a velocidades mayores lo que llevo a la necesidad de establecer un nuevo estándar, la tensión de

3,3V o VDD es la alimentación estándar de tecnología de transistores FET y la tecnología de familias lógicas CMOS. A pesar de que estas tecnologías han sido diseñadas con la capacidad de ser alimentadas directamente con 5 voltios, con la finalidad de presentar compatibilidad con el anterior estándar de alimentación, no todos presentan esa capacidad, lo que hace necesario adicionar un bus de 3,3V para dichos circuitos.

Micro controladores, micro procesadores, memorias, sensores, actuadores y sistemas micro-electro-mecánicos utilizan en su mayoría estos niveles de tensión como alimentación. Estos componentes representan la mayor parte de circuitos electrónicos presentes en el CubeSat, resulta evidente entonces el motivo por el cual, para la arquitectura centralizada la distribución de estos dos buses es casi un estándar.

2) Bus de Batería

La distribución del bus de baterías es implementado en casi todos los sistemas tanto centralizados como distribuidos. En los sistemas centralizados debido a lo ineficiente que resulta tener grandes cantidades de buses, el bus de batería permite una conexión directa a la fuente para regulaciones en punto de carga para niveles de tensión no comunes. Y en el caso de los sistemas distribuidos, debido a que sólo se cuenta con un ejemplo, no es posible revelar una tendencia, sin embargo es posible extrapolar el extensivo uso de la distribución del bus de batería para regulación en el punto de carga de las arquitecturas centralizadas a la arquitectura distribuida.

En cuanto a la tensión de este bus, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones que permitirán seleccionar una tensión de operación óptima para el sistema. A continuación se presentan recomendaciones para ser tomadas en cuenta al momento de la selección de esta tensión:

En primer lugar se debe analizar la cantidad de potencia que será suministrada a través de bus, mientras mayor sea la potencia, mayor debe ser la tensión con la finalidad de disminuir las pérdidas por I²R y reducir el calibre de conductor requerido. Sin embargo, tensiones elevadas pueden afectar la compatibilidad electromagnética del sistema y requerir mayores niveles de aislamiento de los circuitos.

En segundo lugar, la tensión bus de batería debe estar en concordancia con la tensión de alimentación de la mayoría de las cargas, las cuales según los resultados de la investigación se encuentran entre los 3,3V y 5V. Mientras mayor sea la diferencia entre la tensión del bus y la tensión de salida de los convertidores conectados a él, menor será su eficiencia. La Figura 17 muestra la curva de eficiencia vs tensión de entrada de un convertidor Buck LTC1148 [11] con una tensión de salida de 5V, usualmente utilizado en CubeSats.

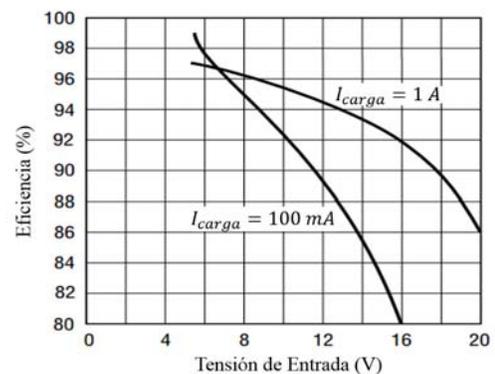


Fig. 17. Curva Eficiencia Vs. Tensión de entrada del convertidor LTC1148. [11]

En esta gráfica es claramente apreciable que los mayores niveles de eficiencia son obtenidos al tener tensiones de entrada cercanos a la tensión de salida, y a medida que aumenta la diferencia entre estas tensiones la eficiencia del convertidor disminuye significativamente.

En tercer lugar, es importante tener en cuenta las restricciones de presupuesto de masa y volumen del subsistema, así como también la potencia que debe ser suplida por las baterías en los periodos de eclipse. Estos parámetros delimitarán en gran medida la configuración serie-paralelo de celdas de batería.

La conexión en serie definirá en si, el nivel de tensión del bus de batería. La Tabla II muestra la cantidad de celdas de batería en serie necesarias para buses de batería de $\approx 5V$, $\approx 8V$ y $\approx 12V$ según su química, de acuerdo a la información presentada en la Tabla I.

TABLA II.
CANTIDAD DE CELDAS DE BATERÍA NECESARIAS PARA DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN DE BUS.

Tipo de Celda de Batería	Cantidad de Celdas ($\approx 5V$)	Cantidad de Celdas ($\approx 8V$)	Cantidad de Celdas ($\approx 12V$)
NiCd	≈ 4	≈ 7	≈ 10
NiMH	≈ 4	≈ 7	≈ 10
Li-Ion	≈ 2	≈ 2	≈ 3
Li-Pol	≈ 2	≈ 2	≈ 3

Cada celda de batería adicional incrementará la masa y el volumen del subsistema *EPS*. En esta Tabla es posible observar que altos niveles de tensión implicarían la necesidad de grandes cantidades de celdas, lo que para los *CubeSats*, y específicamente para los de 1U, resulta inadmisibles.

Por otra parte, la cantidad de cadenas de celdas de batería en paralelo será definida por la potencia requerida por el *CubeSat* durante el eclipse. En la Tabla III se muestran los parámetros de energía de los diferentes tipos de celdas de batería en relación de su dimensión y su masa, basado en la bibliografía consultada [10].

TABLA III
PARÁMETROS DE ENERGÍA DE LAS DIFERENTES CELDAS DE BATERÍA.

Tipo de Celda de Batería	Energía Específica (Wh/kg)	Densidad de Energía (Wh/l)
NiCd	40-60	50-150
NiMH	30-80	140-200
Li-Ion	100-200	150-250
Li-Pol	130-250	150-300

Mientras mayor sea la potencia requerida en el eclipse mayor serán las dimensiones y la masa de las celdas o la cantidad de cadenas de celdas en paralelo.

Considerando las limitaciones de masa de 1,33 kg y de volumen de 1000 cm³, definidos en el documento *CubeSat Design Specification* [10] para los *CubeSats* de 1U, estos factores deben ser analizados con cautela para seleccionar una tensión de bus de batería acorde con los presupuestos asignados al subsistema.

Por último, es importante tener en cuenta el tipo de convertidores a emplear. Los diseños y componentes simples son normalmente elegidos en el desarrollo de plataformas espaciales. Siguiendo este principio de diseño es preferible evitar, siempre y cuando sea posible, que la tensión del bus de batería fluctúe entre niveles

mayores y menores de algún nivel de tensión de alimentación utilizado por varias cargas, ya que en estos casos resulta necesario el uso de convertidores *Buck-Boost* capaces de disminuir e incrementar la tensión de entrada para mantener una tensión de salida estable.

En conclusión, los niveles de tensión elevados o muy bajos deben evitarse. Para la mayoría de *CubeSats* de 1U es recomendable que nivel de tensión del bus de batería sea seleccionado entre los $\approx 6V$ y $\approx 8V$, sin embargo la tensión exacta dependerá del tipo de celda de batería utilizada. Este análisis se ve sustentado por los resultados obtenidos investigación, donde veintiuno (21) de los veintitrés (23) bus de batería de los *CubeSats* estudiados presentan una tensión de 6,4-8,2V.

VI. CONCLUSIONES

Motivado a las grandes limitaciones de masa y volumen de las misiones *CubeSat*, se vuelve cada vez mas valioso la implementación de configuraciones y componentes que permitan extraer la mayor cantidad posible de energía de los paneles solares y que presenten elevados niveles de eficiencia con poco impacto en los presupuestos. Todo ello con la finalidad disminuir el tamaño del subsistema o de incrementar la potencia que puede ser suministrada a las cargas.

En cuanto a la arquitectura del subsistema *EPS*, se evidenció un extensivo uso de configuraciones centralizadas, tendencia motivada al común uso de tarjetas comerciales que necesitan ser alimentadas por tensiones reguladas y con niveles definidos. Por lo que, a pesar de las posibles ventajas que pueden ser obtenidas al implementar sistemas distribuidos su aplicación hasta los momento no es viable.

La anteriormente popular configuración *DET* como método de transferencia de energía en este tipo de nanosatélites, sufrió un cambio radical debido a la diversas ventajas que los sistemas *MPPT* aportan en este tipo de misiones, caracterizadas por grandes variaciones en las condiciones de iluminación. Un elemento detectado que ha promovido esta migración, es la implementación de nuevos chips capaces de sustituir los complejos y voluminosos circuitos que eran antes requeridos para esta función.

Por último, en las cantidades y niveles de tensión de los buses, fue posible observar la casi estandarización en la implementación de un *bus* de 3,3 V y un *bus* de 5 V, los cuales son acompañados en algunos casos por otro *bus* regulado de mayor tensión, sin embargo su uso no es tan frecuente como los dos buses mencionados anteriormente. Otro elemento presente en casi todos los satélites estudiados es el *bus* de batería, debido a la significativa ventaja de distribuir un *bus* con alimentación directa de las baterías sin ningún tipo de procesador intermedio y de mayor tensión que las requeridas para las cargas, para su futura regulación en el punto de carga. Se observó de igual manera la común selección de un nivel de tensión de 6-8V para este *bus*, logrado mediante la conexión en serie de dos (02) celdas de batería, bien sea de Li-Ion o de Li-Pol.

Es importante resaltar que gran cantidad de *CubeSats*, lanzados entre el 2013 y 2014 han optado por el uso de las tarjetas comerciales para el subsistema de energía eléctrica, es por ello que la investigación reflejó en los elementos analizados una tendencia muy marcada hacia las configuraciones que estas presentan.

REFERENCIAS

- [1] The CubeSat Program, CubeSat Design Specification, 13 ed., Cal Poly SLO, 2014.
- [2] M. Buscher, TUB Small Satellite Database TU Berlin, Agosto, 2014.
- [3] GOM Space, NanoPower P-31u, Aalborg, 2014.
- [4] Clyde Space, CubeSat Power System User, 2008.

- [5] R. Burt, Distributed Electrical Power Systems in CubeSat Applications, Utah: Utah State University, 2011
- [6] I. Osman, Design and Implementation of EPS (Electrical Power System) of a CubeSat, University of Khartoum, 2012.
- [7] W. Xiao, N. Ozog y W. Dunford, Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, n° 3, pp. 1696-1704, 2007.
- [8] C. Clark y A. Lopez, Power system challenges for small, Proceedings of the 2006 Small Satellites,, 2006.
- [9] ST Microelectronics, SPV1040 Data Sheet, 2013.
- [10] N. Navarathinam, R. Lee y C. Hugh, Characterization of Lithium-Polymer batteries for CubeSat applications, Acta Astronautica, vol. 68, n° 11-12, pp. 1752-1760, Junio-Julio 2011.
- [11] Linear Technology, LTC1148 Data Sheet, 1993.