

# Estudio Comparativo de las Tecnologías Utilizadas en Celdas y Paneles Solares para Nanosatélites del Tipo CubeSat

Luis Antonio Argüello Rangel, Lenin Adgimiro Luna Díaz  
Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), Venezuela

larguello@abae.gob.ve

lluna@abae.gob.ve

**Resumen.-** El presente artículo contiene la revisión de las tecnologías y materiales usados para la fabricación de los diferentes tipos de celdas solares (silicio y multiunión) y paneles solares utilizados en nanosatélites, específicamente del tipo CubeSat. De igual manera presenta la comparación de las diferentes eficiencias y costos de las celdas solares, destacando las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Adicionalmente, describe los diferentes arreglos de celdas (paneles solares) utilizados para generar una mayor cantidad de potencia en los CubeSat.

**Palabras Claves:** celdas solares, CubeSat, eficiencias, paneles solares

**Abstract.-** This article contains the review of technologies for manufacturing different kinds of solar cells (silicium and multijunction) and panels used in nanosatellites, specifically CubeSats. Besides it is shown the comparison among the solar cells efficiencies and cost; emphasizing the advantages and disadvantages of each one. Additionally it is described the solar arrays used to produce more power in CubeSats

**Keywords:** CubeSat, efficiencies, solar arrays, solar cells

## I. INTRODUCCIÓN

El efecto fotovoltaico consiste en un fenómeno físico que se caracteriza por convertir la energía procedente de la luz solar en energía eléctrica. Al dispositivo capaz de realizar esta conversión se denomina celda solar. La energía solar fotovoltaica, entre otras fuentes renovables, se presenta como una alternativa para la producción de energía eléctrica desde que se empezó a desarrollar en los años setenta, a partir de la crisis del petróleo, pero aún no ha satisfecho las expectativas que en ella se han puesto.

Presenta grandes ventajas asociadas a su inagotable y bien distribuido "combustible": la energía solar. Se estima que esta energía es tan abundante, que en sólo 20 días toda la energía solar que llega a la tierra es superior al de la energía que se puede producir por todos los sectores del petróleo, el carbón y el gas en la corteza terrestre en un año.

Las aplicaciones fotovoltaicas para usos espaciales tienen características técnicas y perfiles productivos claramente diferenciados de las terrestres. La elevada confiabilidad requerida junto con la necesidad de diseñar y construir a medida los paneles fotovoltaicos en función de las características de las misiones y de la geometría de los satélites.

Las celdas solares en el espacio están sometidas a condiciones ambientales mucho más severas que en la superficie terrestre (bombardeo con partículas cargadas, UV, variaciones bruscas de temperatura, etc.). Ello hace que sus características eléctricas se deterioren durante la misión, sufriendo pérdidas significativas

(mayores al 20% en misiones de varios años) en la potencia entregada. Los principales materiales utilizados en dispositivos fotovoltaicos espaciales son el Si y la unión de varios materiales, como es el caso de las celdas de GaAs. Se ha experimentado también con otros materiales, en especial InP, por su mejor resistencia a la radiación.

El presente artículo contiene el resultado de la revisión acerca de las tecnologías utilizadas para la elaboración de celdas y paneles solares para uso espacial. Esta revisión se realiza con el fin de analizar y comparar los diferentes materiales y rendimientos de las celdas solares, permitiendo tener noción de cuales son las mejores tecnologías para sistemas de potencia de alta eficiencia dentro de los Nanosatélites, específicamente de los CubeSat.

## II. LOS CUBESAT

Los CubeSats, son un tipo de satélite cuyo tamaño mínimo o estándar es de 10 x 10 x 10 cm., y suelen ser conocidos como de "1U", lo que refiere a que es un satélite unitario; debido a que los CubeSats son modulares pueden extenderse o incrementarse en uno de sus ejes, ese incremento es de una unidad (1U). Ya se han fabricado y lanzado satélites del tipo "2U" (20 x 10 x 10 cm.) y del tipo "3U" (30 x 10 x 10 cm.); siendo la capacidad máxima posible de "6U". Los CubeSats de 1U poseen un volumen exacto de 1 litro, su masa habitualmente no sobrepasa los 1,33 kilogramos y normalmente en su fabricación y diseño se utilizan componentes comerciales del tipo "sacados de estantería" ("*COTS*" *Commercial Off The Shelf*), conocidos así por sus siglas en inglés, este tipo de componentes pueden ser adquiridos o utilizados, bajo contrato gubernamental o al público general [1].

Debido a que los CubeSats, sin importar su longitud, tienen medidas de 10 x 10 cm (alto y ancho), pueden ser lanzados a su órbita y desplegados en el espacio utilizando un sistema comúnmente llamado POD (*Picosatellite Orbital Deployer*).

Las misiones para las que son desarrollados los CubeSat en su mayoría son de proyectos educativos, sin embargo algunas compañías comerciales han fabricado este tipo de satélites para el estudio de componentes que puedan ser utilizados en otros satélites y transmisión de imágenes satelitales, también son muy populares entre los radioaficionados. Esta popularidad se debe a que los precios de fabricación son más asequibles que los de satélites de mayor envergadura. Los CubeSats pueden cumplir con múltiples y exigentes objetivos de alto nivel, su estructura facilita el diseño permitiendo crear un satélite apto y capaz a bajo costo.

Como todos los satélites, los CubeSats necesitan de un sistema de energía que alimente sus componentes para el desarrollo de las misiones, este sistema de energía se conoce como EPS (*Electrical Power Supply*) y tiene la responsabilidad de proveer, almacenar, acondicionar, controlar y distribuir la potencia requerida por todos

los equipos. Este artículo presenta una investigación acerca de las tecnologías de celdas solares para uso espacial, de igual manera el desarrollo de paneles fotovoltaicos (tomando en cuenta su estructura física y eléctrica). Una de las principales aplicaciones que ha tenido las celdas solares ha sido la de ser fuente principal de energía para satélites. En el caso particular de los CubeSats, el arreglo de celdas fotovoltaico debe estar en capacidad de brindar la suficiente potencia a los módulos que lo conforman a pesar del poco espacio estructural disponible. Por lo tanto, es preciso realizar un diseño que obtenga el máximo rendimiento de las celdas acorde con los requerimientos del proyecto.

### III. LAS CELDAS SOLARES

En el año 1839 cuando el físico experimental francés Edmund Becquerel hace el descubrimiento del efecto fotovoltaico, mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de dos electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica, observando que esta aumentaba su generación de electricidad al ser expuesta a la luz. El hombre comienza a estudiar de manera minuciosa estos fenómenos físicos y químicos, para la utilización de los mismos como una fuente alternativa de energía, usando para ello las celdas solares.

La celda solar no es más que la unión de un material tipo p con un material tipo n (juntura p-n) formando una capa semiconductor, en ella la luz es absorbida por los electrones de la banda de valencia del semiconductor los cuales son excitados y pasan a la banda de conducción a través del volumen de la juntura p-n. Los fotones con energía más grande que el band-gap  $E_G$  del semiconductor son absorbidos y crean pares electrón-hueco proporcional a la radiación incidente. Bajo la influencia de los campos eléctricos internos de la juntura p-n, estos portadores son barridos aparte y crean una fotocorriente ( $I_{ph}$ ), y un fotovoltaje ( $V_{ph}$ ) en la carga conectada exteriormente.

Una celdas se caracteriza por sus parámetros de: voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), voltaje de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ), corriente de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), eficiencia de conversión ( $\eta$ ), y factor de llenado (FF) que es un índice de calidad de la celda y se expresa mediante la relación entre la potencia máxima generada por la celda y el producto  $I_{sc} V_{oc}$ .

En la Fig. 1 se puede observar la curva característica de voltaje contra corriente de una celda solar

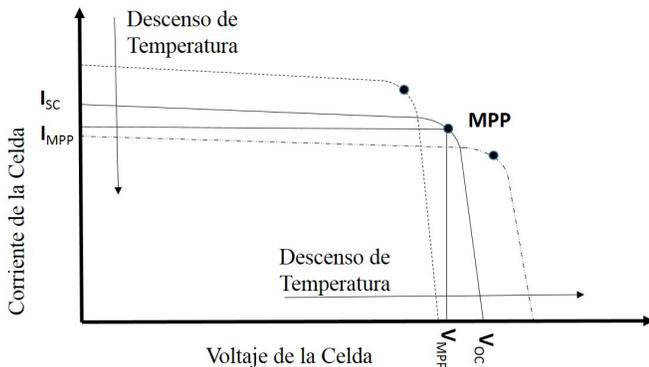


Fig. 1 Curva Característica Corriente Vs Voltaje de una Celda Solar

### IV. LAS CELDAS SOLARES PARA USO ESPACIAL

Los materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares son de gran importancia, ya que sobre ellos recaen las propiedades eléctricas y la eficiencia de conversión de energía electromagnética en energía eléctrica. A través de los años los científicos han experimentado y probado diferentes materiales, evaluando sus propiedades y la resistencia al medio ambiente para poder usarlos en el espacio.

Las celdas solares en general, y sobre todo las utilizadas en misiones espaciales, deben ser capaces de operar durante grandes intervalos de tiempo mientras están sometidas a cambios de temperatura y de intensidad luminica. Debido a que generalmente las celdas solares son la única fuente que proporciona energía a los satélites, estas deben contar con las más óptimas características, ya que el cumplimiento de la misión depende directamente de la potencia suministrada por estos componentes. Aunado a esto, durante la vida útil del satélite se puede encontrar el factor de mantenimiento, dependiendo de las características de la misión la reparación o reemplazo de las celdas solares en la mayoría de los casos es difícil y hasta pudiera ser imposible de realizar.

Las propiedades más importantes para el funcionamiento de estas celdas en el espacio son:

- Alta eficiencia debido a que el área disponible para el montaje es restringida.
- Resistencia a los daños por radiaciones causados por partículas cargadas provenientes del espacio, producidos por el sol o los cinturones magnéticos de la tierra, ya que estos con el pasar del tiempo van degenerando el material semiconductor.
- Tolerancia a la radiación UV o a la degradación por átomos de oxígeno.
- El peso debe ser el mínimo posible.
- La temperatura debe ser reducida al máximo, ya que la eficiencia de la celda disminuye con el aumento de la temperatura.

Sumado a estas propiedades las celdas deben brindar robustez y alta confiabilidad, ya que serán sometidas a esfuerzos físicos en el momento del lanzamiento, así como también pasar por ciclos térmicos provocados por la variación de temperaturas entre el sol y sombras en el espacio.

### V. LAS CELDAS SOLARES EN CUBESAT

Como fue mencionado anteriormente, la eficiencia en las celdas solares es un factor determinante, ya que de este parámetro depende la absorción de energía proveniente de los rayos solares. Esta eficiencia puede ser definida como relación entre la potencia eléctrica generada por unidad de área ( $W/m^2$ ) y la irradiación solar incidente ( $W/m^2$ ) para obtenerla. Puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\eta \% = \frac{\text{Energía Eléctrica Generada}}{\text{Energía Luminica Recibida}} \times 100 \quad (1)$$

A medida que se ha ido avanzando en el tiempo se han ido implementando nuevas tecnologías en las celdas solares aumentando la eficiencia de las mismas. A continuación se describirán algunos de los tipos de celdas solares usadas en misiones espaciales:

### A. CELDAS SOLARES DE SILICIO AMORFO (a-Si)

Las celdas de silicio amorfo (a-Si), se forman mediante el depósito de diferentes tipos de silicio tratado sobre un sustrato de vidrio. Las propiedades del silicio amorfo son diferentes a las del silicio cristalino. Por ejemplo, el ancho de banda prohibida aumenta de 1,1 eV para el silicio cristalino a 1,7 eV para el amorfo y el coeficiente de absorción también es mayor. Por el contrario, la alta densidad de defectos presentes en la red cristalina hace que la longitud de difusión de los portadores minoritarios sea muy pequeña.

Su estructura atómica es bastante desordenada, lo cual hace que presente una eficiencia por debajo del 10%, sin embargo su fabricación es muy sencilla y su costo es muy económico [3].

### B. CELDAS SOLARES DE SILICIO CRISTALINO (c-Si)

El silicio monocristalino (c-Si), es un semi metal que también es un semiconductor. La manera de su procesamiento es la siguiente: se obtiene una barra o lingote mediante la solidificación del silicio en un solo cristal. Lo cual quiere decir que en todo el lingote no existen límites (o bordes) en el material que distingan una fase de otra.

Esta tecnología de celdas solares es una de las 2 más comerciales que existen. Las eficiencias promedio de estos paneles son del 16%, un par de puntos por arriba de las celdas policristalinas. Con esta tecnología se han llegado a alcanzar eficiencias en laboratorio de hasta 24.7%. Sin embargo, celdas con estos niveles de eficiencias no son comerciales y sólo aparecen en el campo de la investigación. Su estructura atómica es muy ordenada, su fabricación es difícil, por lo que su costo es muy alto[3].

### C. CELDAS SOLARES DE SILICIO POLICRISTALINO (mc-Si)

Las celdas policristalinas (mc-Si), se producen mediante la colocación de silicio líquido en un molde para hacer un bloque cuadrado de material. El bloque, que está compuesto de muchos cristales de silicio, se corta en rebanadas muy finas o láminas para su uso en los paneles.

Las celdas policristalinas poseen una máxima eficiencia de alrededor del 15%. Ésto es inferior a las celdas monocristalinas, pero significativamente más alta que las celdas de silicio amorfo[3]. Su estructura atómica no es tan ordenada como la del silicio y son significativamente más baratas de producir que las celdas monocristalinas.

A continuación se presenta la Tabla I, la cual contiene la comparación de la eficiencia medida en laboratorio, en celdas usadas en misiones satelitales, y costos de las diferentes celdas solares fabricadas con Silicio.

TABLA I  
CUADRO COMPARATIVO DE LAS CELDAS DE SILICIO

Celdas de Silicio (Si)	Eficiencia (%) en Laboratorio	Eficiencia (%) Uso Satelital	Costo
Monocristalino	24%	15-18%	Muy Costoso
Policristalino	19-20%	12-14%	Costoso
Amorfo	16%	<10%	Barato

### D. CELDAS SOLARES MULTIUNIÓN

Las celdas solares del tipo multiunión son un conjunto de celdas individuales de una sola junta, colocadas en orden descendente de

acuerdo a su espacio de banda  $E_G$ . La celda más alta captura los fotones de alta energía y deja pasar el resto de los fotones hacia abajo para ser absorbidos por las celdas con espacios de bandas más bajos. Este tipo de celdas han alcanzado eficiencias de alrededor del 35% bajo luz solar concentrada [2].

### 1) CELDAS SOLARES DE ELEMENTOS DE VALENCIA III, IV Y V

Con el auge de la popularidad de la energía solar ha aumentado la demanda del silicio necesario para su fabricación, compitiendo directamente por la materia prima de los semiconductores.

Una solución a este problema sería usar “concentradores”, en los cuales lentes o espejos focalizan la luz solar en una celda solar más pequeña. El ratio de concentración puede ser de entre 200X a 300X para el silicio y de 1000X a 2000X para las celdas solares de GaAs. Con estos ratios de concentración, el coste de la celdas se vuelve menos importante que su eficiencia.

Las celdas solares tándem de GaInP/GaAs tienen máximos de eficiencia de  $\eta = 29.5\%$  para AM1.5G (Masa de Aire Global 1.5), de  $\eta = 30.2\%$  para AM1.5G de 160 soles y de  $\eta = 25.7\%$  para AM0 de 1 sol. Aunque estas eficiencias de uniones simples son solo ligeramente superiores que las altas eficiencias conseguidas en las mejores celdas solares de silicio, la facilidad de fabricar complejas estructuras de elementos de valencias III-V (incluyendo películas con diferentes bandas de gap) hace posible que la eficiencia exceda el 30%, superando las de cualquier dispositivo de unión simple [2]. Dentro de este tipo de celdas solares se pueden conseguir los siguientes tipos:

- CELDAS SOLARES DE TRIPLE UNIÓN MEJORADA (“IJT”, IMPROVED TRIPLE JUNCTION): este tipo de celdas son monolíticas de dos terminales de triple unión interconectados con uniones de tipo túnel, la eficiencia de estas celdas es de 26,8% [8].
- CELDAS SOLARES DE TRIPLE UNIÓN ULTRA (“UTJ”, ULTRA TRIPLE JUNCTION): Utilizan un diodo de silicio para protección, al igual que las celdas del tipo IJT son del tipo monolíticas con dos terminales de triple unión interconectados por uniones de tipo túnel. Usadas en misiones espaciales de órbita baja (LEO) y geoestacionarias (GEO), presentan una eficiencia de 28,3% [7].
- CELDAS SOLARES SIGUIENTE TRIPLE UNIÓN (“XTJ”, NEXT ULTRA JUNCTION): A nivel de configuración este tipo de celdas son iguales a las UJT, sin embargo las celdas XTJ utilizan una película más delgada de cobertura pero de mucha mayor protección. Este tipo de celdas han sido usadas en misiones de órbitas geoestacionarias (GEO), presentando una eficiencia de 29,5% [6].

### 2) CELDAS SOLARES DE $Cu(InGa)Se_2$

Las celdas solares basadas en  $Cu(InGa)Se_2$  han sido, a menudo, consideradas una de las tecnologías de celdas solares más prometedoras por su capacidad de generación de potencia a un coste reducido. Esto se debe parcialmente a las ventajas de las películas delgadas de bajo coste, con un alto grado de deposición de semiconductor de unas pocas micras de grosor sobre largas áreas y con una fabricación de módulos interconectados monolíticamente.

Las celdas solares de  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  han conseguido eficiencias cercanas al 20%, la mayor de cualquier celda solar. Actualmente, es del 18,8% con un área total de  $0,5 \text{ cm}^2$ , una celda en tándem monolítico de esta tecnología tiene el potencial de alcanzar eficiencias del 25% o mayores.

### 3) CELDAS SOLARES DE TELURO DE CADMIO

Los cálculos de la dependencia entre el gap energético y la eficiencia de conversión de la celda solar ideal muestran que el CdTe es una excelente elección para la radiación emitida por nuestro sol. El CdTe es un compuesto semiconductor del grupo IIB - VIA con una banda de gap óptica directa que coincide casi óptimamente con el espectro solar para la conversión de energía fotovoltaica [10].

Las consideraciones de los parámetros de la celda de CdTe obtenidos por dispositivos en cualquier configuración sugieren que se pueden esperar, sin mucha complicación, eficiencias cercanas al 19%. Además del incremento de la eficiencia en dispositivos de unión simple, el ajuste de la banda de gap mediante la aleación con otros metales del grupo IIB puede facilitar el desarrollo de celdas multiunión con eficiencia cercana al 30%.

### 4) CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE

Son celdas solares fotoelectroquímicas consistentes en un fotoelectrodo, un electrolito redox y un contraelectrodo. La sensibilización de grandes bandas de gap en materiales de óxido semiconductor como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{SnO}_2$  con fotosensibilizadores, como colorantes orgánicos que pueden absorber luz visible, han sido extensamente estudiados desde el desarrollo de la fotografía (s.XIX). En el proceso de sensibilización, los fotosensibilizadores absorbidos en la superficie del semiconductor absorben luz visible y los electrones excitados son inyectados en la banda de conducción de los electrodos semiconductores.

Las celdas solares sensibilizadas por colorante, basadas en un fotoelectrodo combinado de  $\text{SnO}_2/\text{ZnO}$  monocristalino y colorante N3, producen una célula de alta eficiencia con un rendimiento igual que la celda solar de  $\text{TiO}_2$ :  $8\% \eta$  para  $90 \text{ mWcm}^{-2}$  y  $15\% \eta$  para  $10 \text{ mWcm}^{-2}$ . Se usa una capa combinada de partículas pequeñas de  $\text{SnO}_2$  (15 nm) y de partículas grandes de  $\text{ZnO}$  (2  $\mu\text{m}$ ) [11].

El diseño y desarrollo de de nuevos colorantes orgánicos con grandes coeficientes de absorción en la región cercana al infrarrojo son necesarios para mejorar el rendimiento de las celdas solares sensibilizadas por colorante.

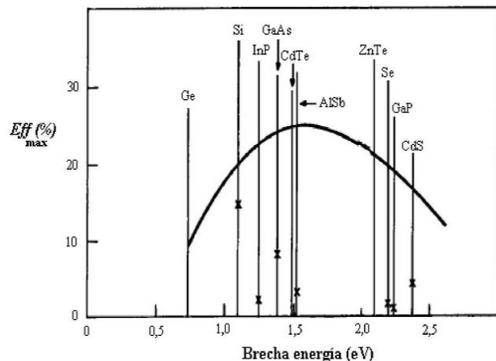


Fig. 2 Eficiencia Vs Brecha de Energía de Diferentes Celdas Solares

## VI. PANELES SOLARES

Una de las principales limitaciones en las misiones de los CubeSat es la potencia disponible a bordo. Tradicionalmente los paneles solares son montados sobre el cuerpo del CubeSat, y se logra obtener una potencia máxima de 10 W. El rendimiento y la generación de potencia puede ser mejorado en gran medida por la posición, el tamaño y la cantidad de los paneles solares utilizados.

A continuación se presenta la revisión de los nuevos tipos de paneles solares utilizados en CubeSat:

### A. PANELES SOLARES DE SIMPLE DESPLIEGUE

Son fabricados con sustratos de PCB de alta calidad, pueden ser configurados a la hora de ser fijados en la estructura, ya sea en la parte superior o en la parte lateral según lo requiera el diseño del CubeSat. Adicionalmente los paneles pueden ser orientados con ángulos de despliegue de  $90^\circ$  y  $135^\circ$ .

Estos paneles desplegables permiten la colocación de celdas solares en sus caras delanteras y traseras. Sus costos son ligeramente superiores comparados con los paneles no desplegables.

Pueden ser usados en cualquier CubeSat sin importar de cuantas unidades sea [9].

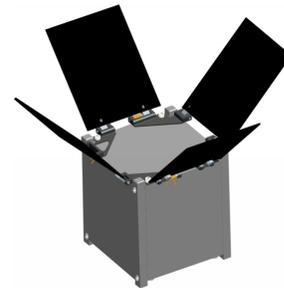


Fig. 3 Panel Solar de Simple

Despliegue

### B. PANELES SOLARES DE DOBLE DESPLIEGUE

Este tipo de paneles solares poseen las mismas características que los anteriores, sin embargo sólo pueden ser colocados en las partes laterales de la estructura y configurados en  $90^\circ$  para su despliegue. Adicionalmente, tienen un sensor de temperatura y diodos de protección inversa [9].

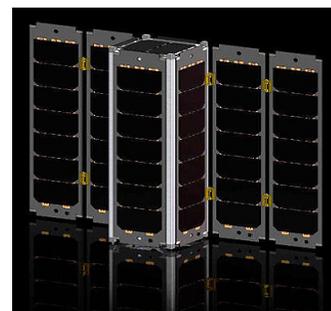


Fig. 4 Panel Solar de Doble

Despliegue

### C. POWERCUBE

Es un módulo que integra la generación de potencia, propulsión y control de posición. Es fabricado para cualquier tipo de CubeSat y tiene buen rendimiento en misiones que necesiten grandes  $\Delta V$ s, agilidad orbital, precisión de apuntamiento, y capacidad de altas potencias. Para CubeSat de 1U tiene una potencia máxima de 80W.

Este módulo contiene tres (03) paneles de siete (07) celdas que se pliegan a lo largo de cada uno de los cuatro laterales largos del CubeSat. El PowerCube está disponible en diferentes configuraciones de panel para satisfacer los diversos tipos de misión [4].

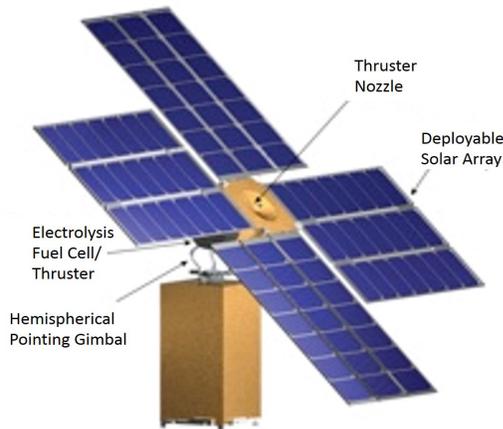


Fig. 5 PowerCube para un CubeSat de 2U

### D. FUTUROS PANELES SOLARES ORIGAMI

La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (*National Aeronautics and Space Administration "NASA"*) está tratando de crear paneles solares plegables, para ello contrataron a un experto en origami (Antiguo arte japonés de plegar el papel).

En la actualidad la NASA ya ha creado un prototipo del tamaño de una cápsula de medicina y es capaz de desplegarse hasta 4 metros de ancho, para este prototipo usaron diferentes tipos de pliegue de origami [5]. La Fig. 6 muestra el prototipo desarrollado por la NASA.



Fig. 6 Prototipo de Panel Solar Plegado con Origami

## VII. RESULTADOS

### A. CELDAS SOLARES

Los Nanosatélites son capaces de realizar misiones de alto rendimiento y los diseñadores están conscientes de ello, de allí que se enfoquen en utilizar cargas útiles de mayor ratio, enlaces de telemetría y telecomandos mucho más rápidos, plataformas con mayor agilidad. Pero para lograr que sus diseños puedan funcionar es necesario tener una fuente de potencia que logre alimentar de manera eficiente y óptima a todo el satélite durante su vida útil.

Luego de realizar la revisión de las tecnologías utilizadas para la fabricación de celdas solares y paneles solares, se puede decir que a medida que se ha ido avanzando en el tiempo la eficiencia de los sistemas de potencia se ha incrementado para soportar nuevas misiones satelitales.

Para poder seguir avanzando en esa optimización del sistema de potencia de los nanosatélites se debe seguir estudiando las celdas solares de manera que podamos tener conocimientos de cuales, cuantas y por qué debemos utilizarlas. De allí que se presenta en la Tabla II el cuadro comparativo, que puede orientar a futuros investigadores con respecto a las ventajas y desventajas de los diferentes materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares.

TABLA II  
CUADRO COMPARATIVO DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CELDAS SOLARES

Tipo De Celda	Ventajas	Desventajas
Silicio (c-Si)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta eficiencia</li> <li>Tecnología madura</li> <li>Cadena de suministro establecida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta dependencia de los precios de las materias primas</li> </ul>
Silicio (a-Si)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta experiencia</li> <li>Se utilizan procesos similares a los de la fabricación de LCD</li> <li>Buen comportamiento frente a los cambios de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baja eficiencia</li> </ul>
Silicio (mc-Si)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utilizan procesos similares a los de la fabricación de LCD</li> <li>Buen comportamiento frente a los cambios de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menores expectativas de mejora de eficiencia a largo plazo</li> <li>Experiencia limitada</li> </ul>
CdTe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencia relativamente alta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potencial Toxicidad del Cd</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bajos costos de producción</li> <li>buen comportamiento frente a los cambios de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Déficit de Te</li> <li>Experiencia limitada</li> </ul>
CIGS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencia relativamente alta</li> <li>Fácilmente implementable en sustratos flexibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altos coeficiente de perdidas por temperatura</li> <li>Déficit y elevado costo de In</li> <li>Experiencia limitada</li> </ul>
Multi-Unión	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muy alta eficiencias</li> <li>Se fabrica bajo procesos similares a los usados en LED's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de estandarización</li> <li>Experiencia limitada</li> </ul>

Como se observa en la Tabla II las celdas solares con mayor eficiencia son las de Silicio monocristalino y las de multiunión, sin embargo para las primeras sus costos elevados de fabricación representan una desventaja, mientras que la mayor desventaja que se presenta en las multiunión es la experiencia limitada en su fabricación, es decir, que a pesar de ser fabricadas desde hace años estas no han alcanzado la robustez y confiabilidad que pueden brindar las celdas de Silicio monocristalino.

Con respecto a las Celdas de CdTe y las de  $Cu(InGa)Se_2$  (CIGS) se puede observar que además de ser unas celdas solares sin la madurez necesaria, en ambas se presenta el problema de la falta o déficit de alguno de los materiales necesarios para su fabricación, sin embargo ambos tipos de celdas solares presentan una eficiencia relativamente alta, lo que podría considerarse como una gran ventaja debido que al momento de hacer la selección de las celdas solares es necesario que están puedan brindar al CubeSat un sistema de energía confiable y estable.

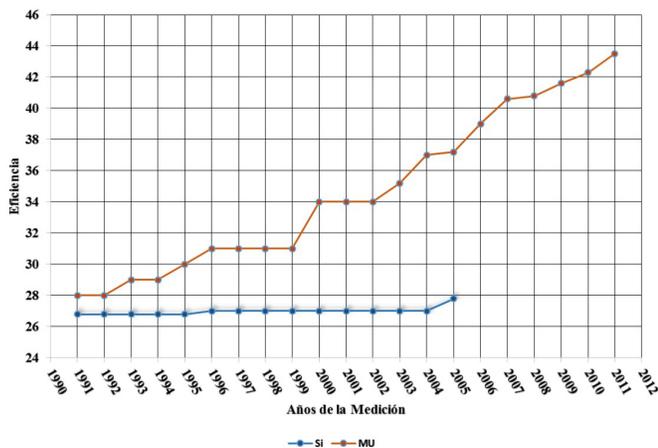


Fig. 7 Gráfico Comparativo de la Eficiencia Medida en Laboratorio de las Celdas Solares de Silicio y Multiunión

Al observar la Fig. 7 se puede notar como desde el año 1991 hasta el 2005 las celdas de Silicio solo pasaron de 27% de eficiencia a casi un 28%, mientras que las multiunión, en ese mismo lapso de tiempo, lograron pasar de 28% a casi un 37,4%, esto puede traducirse en que a medida que avanza el tiempo las primeras no presentan un cambio significativo de su eficiencia, mientras que las celdas multiunión con el pasar del tiempo cada año incrementan su eficiencia lo que pudiera entenderse como un avance para obtener un sistema de energía confiable.

### B. PANELES SOLARES

En cuanto al avance que se ha logrado sobre los paneles solares la revisión muestra que han sido pocos los avances realizados, sin embargo dichos avances podrían catalogarse como significativos ya que las nuevas configuraciones que se presentan para realizar un arreglo de celdas solares brindan una mayor cantidad de potencia.

La generación de una mayor cantidad de potencia brinda a los diseñadores de la misión del CubeSat la posibilidad de utilizar componentes más avanzados en tecnología.

En la Fig. 8 se observa la comparación entre la potencia generada por los paneles solares fijados directamente a la estructura, los paneles solares desplegables y el PowerCube, pudiendo notar que este último es la tecnología que brinda mucha mayor cantidad de potencia, teniendo como desventaja que es una tecnología muy nueva que no brinda confiabilidad.

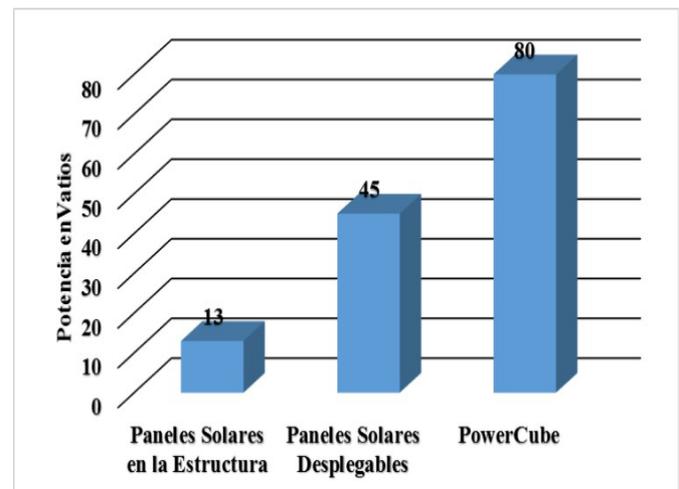


Fig. 8 Gráfico Comparativo de la Potencia Generada por Diferentes Tipos de Paneles Solares

En las nuevas tecnologías presentadas en esta revisión se observa que para una mayor generación de potencia no solamente es necesario una mayor cantidad de paneles solares, también se debe tener en cuenta que las celdas solares a utilizar en estos arreglos cuenten con una alta eficiencia, para que, de esta manera, la potencia generada sea confiable.

## VIII. CONCLUSIONES

Las investigaciones realizadas durante esta revisión constituyeron los primeros pasos del desarrollo, caracterización y calificación de dispositivos solares para uso espacial, tanto en lo que se refiere a la elaboración y eficiencia de celdas solares de silicio y celdas solares de otros materiales.

Las celdas solares de heterojuntura de silicio son una alternativa interesante y poco explorada como dispositivos de bajo costo para uso espacial. Mientras que Las celdas de doble juntura basadas en GaAs son evidentemente más resistentes al daño por radiación que las celdas de Si.

Hasta los momentos las celdas que presentan una mayor eficiencia para ser utilizadas, son las celdas de multiunión que utilizan materiales de valencia III, IV y V.

Con respecto a la creación de nuevos arreglos de celdas o paneles solares apunta a innovar en cuanto a la utilización de una mayor área donde se puedan instalar más celdas solares para, de esta manera, absorber mayor cantidad de energía solar y convertirla en la potencia que necesita el satélite para operar óptimamente.

Cabe destacar que actualmente en Venezuela la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE) en conjunto con la Fundación Instituto de Ingeniería (FII), se encuentran realizando estudios para la fabricación de celdas solares a base de nanotubos de Oxido de Titanio.

Por último se puede concluir que el estudio de nuevas tecnologías para ser usadas en celdas y paneles solares, deberán presentar mayores niveles de eficiencia y bajos costos con respecto a las existentes en la actualidad.

## REFERENCIAS

- [1] J. Salamanca, Celdas Fotovoltaicas de Alta Eficiencia y Sistema de Paneles Solares del CubeSat Colombia 1, Bogotá, Colombia, 2012.
- [2] M. Barrera, Simulación y Caracterización de Celdas Solares Multijuntura y de Silicio Cristalino para Aplicaciones Espaciales, Argentina. 2009.
- [3] S. Ponce-Alcántara, Fabricación de Células Solares sobre Silicio Multicristalino y Silicio Purificado por la vía Metalúrgica”, Madrid, España, 2007.
- [4] PowerCube website. [Online]. Disponible: <http://www.tethers.com/PowerCube>.
- [5] V. McKalin (2014), NASA Creating Origami-style Solar Array: Could Beam Electricity to Earth. [Online]. Disponible: <http://www.techtimes.com/articles/>.
- [6] “NeXt Triple Junction (XTJ) Solar Cells Data Sheet”, Spectrolab Inc., California, Estados Unidos.
- [7] “Ultra Triple Junction (UTJ) Solar Cells Data Sheet”, Spectrolab Inc., California, Estados Unidos.
- [8] “Improved Triple Junction (ITJ) Solar Cells Data Sheet”, Spectrolab Inc., California, Estados Unidos.
- [9] Clyde-Space website. [Online], Disponible: [http://www.clyde-space.com/cubesat\\_shop/solar\\_panels\\_-\\_deployable](http://www.clyde-space.com/cubesat_shop/solar_panels_-_deployable)
- [10] R. Mendoza, Celdas Solares de CdTe, Distrito Federal, México. 2011
- [11] M. Galicia, Celdas Solares de Dióxido de Titanio Nanoestructurado, Lima, Peru, 2012.