

# CELDAS FOTOVOLTAICAS DE ALTA EFICIENCIA Y SISTEMA DE PANELES SOLARES DEL CUBESAT COLOMBIA 1

## HIGHLY EFFICIENT PHOTOVOLTAIC CELLS AND SOLAR-PANEL SYSTEM AT CUBESAT COLOMBIA 1

### ABSTRACT

The present paper shows a set of partial results obtained from research on multi-junction solar cells for space applications. The paper also includes a summary of the steps followed (to date) in the design of a photovoltaic panel prototype to meet physical, financial and electrical requirements for the operation of a pico-satellite called Cubesat Colombia 1, belonging to Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Key words:** highly efficient photo-voltaic cells, CubeSat, solar panels.

### RESUMEN

El presente documento presenta el resultado parcial de la investigación acerca de las tecnologías de celdas solares multi-juntura para uso espacial. Asimismo, se presenta una recopilación de los pasos que se han seguido hasta la fecha en el diseño de un prototipo de paneles fotovoltaicos de acuerdo a los requerimientos físicos, eléctricos y financieros del picosatélite Cubesat Colombia 1 de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Palabras claves:** celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, CubeSat, paneles solares.

**Jorge Enrique Salamanca Céspedes**  
Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones  
Docente planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
jsalamanca@udistrital.edu.co  
Bogotá, Colombia

**Tipo:** Artículo de investigación

**Fecha de Recepción:** Septiembre 5 de 2012

**Fecha de Aceptación:** Noviembre 1 de 2012

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 por parte de Becquerel, el hombre ha tratado de utilizar este sistema en celdas solares como una fuente alternativa de energía. Básicamente, una celda solar simple es una juntura p-n fabricada en una capa semiconductor, donde la luz es absorbida por electrones excitados de la banda de valencia del semiconductor 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 voltaje ( $V_{ph}$ ) 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 ( $\eta$ ), 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  $I_{sc}V_{oc}$  [2].

A pesar de la baja eficiencia de las celdas solares en sus inicios, se han desarrollado diferentes técnicas y se han empleado diversos materiales para mejorar el rendimiento, pasando así de una eficiencia del 16% en 1960 a una cercana al 35% actualmente.

Una de las principales aplicaciones que ha tenido las celdas solares ha sido la de ser fuente principal de energía para satélites. Esta aplicación adicionalmente, le exige a las celdas cumplir con determinadas características para que puedan soportar las difíciles condiciones ambientales, como los rápidos cambios de temperatura (en un periodo aproximado de 100 minutos para órbitas bajas), la radiación de partículas y el vacío propio de la atmósfera AMO [1].

En el caso particular del prototipo del picosatélite Cubesat (satélite en forma de cubo con dimensiones de 10cm x 10cm x 10cm), 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.

A pesar de que el proyecto continua en ejecución, el objetivo principal de este trabajo es el de presentar el procedimiento que se ha llevado a cabo hasta la fecha esbozando los pasos a seguir en el diseño de paneles solares para picosatélites. El documento se organiza como se describe a continuación: una revisión de las tecnologías que actualmente se emplean en la fabricación de celdas de alta eficiencia se presenta en la sección 2, en la sección 3 se describen los requerimientos físicos y eléctricos del proyecto Cubesat Colombia 1, la sección 4 plantea el procedimiento que se ha llevado a cabo para elegir las celdas que se emplearán en el arreglo fotovoltaico. Un primer acercamiento al diseño del arreglo solar y los paneles solares se presenta en la sección 5. Por último, en la sección 6, se presentan las características eléctricas que identifican una celda solar y algunos modelos eléctricos de las celdas y los arreglos fotovoltaicos [3].

## 2. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE CELDAS SOLARES DE ALTA EFICIENCIA

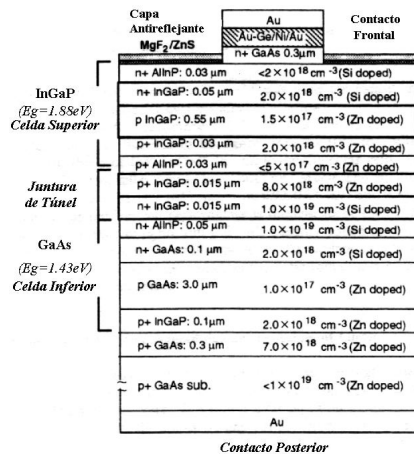
### 2.1. Materiales y estructuras

A lo largo de la historia, los materiales más utilizados en la fabricación de celdas solares espaciales han sido silicio (Si), galio-arsénico (GaAs), indio-galio-fósforo (InGaP) e indio-fósforo (InP). Hasta antes de 1990 las celdas eran creadas con base en silicio monocristalino, policristalino y amorfo, alcanzando eficiencias entre el 12% al 17% [14].

Las celdas de GaAs tienen ventajas en comparación con las de silicio, debido a que poseen una

banda prohibida más grande (1,40eV), y como resultado no absorben la luz solar con longitudes de onda mayores a 0,9μm, por lo tanto es más bajo el valor de la corriente de saturación de exceso en reversa. Las estructuras de celdas solares basadas en AlGaAs/GaAs tienen una velocidad de recombinación de superficie baja y alcanzan una eficiencia entre el 20% a 25% [4]. Así mismo, las CS de GaAs se caracterizan por los bajos valores de variación de eficiencia con respecto a la temperatura, la baja velocidad de degradación de los parámetros de las CS de GaAs y su largo tiempo de vida (hasta 15 años) en órbitas espaciales debido a la mayor recombinación y aniquilación de defectos puntuales de radiación.

En cuanto a la eficiencia en función de  $E_G$  de una celda solar de germanio, una celda de esta material con una banda prohibida muy estrecha  $E_G$  (0,66eV) genera una alta  $I_{ph}$  pero un bajo  $V_{ph}$ , mientras una celda solar de GaInP con una banda  $E_G$  ancha (1,9eV) genera un alto  $V_{ph}$  pero una baja  $I_{ph}$ , en consecuencia la eficiencia de dichas celdas no es muy alta (figura 1).



**Figura 1.** Sección transversal de una celda doble juntura de InGaP/GaAs [4].

Las principales formas de mejorar la eficiencia de las celdas solares son [4]: la expansión del rango de fotosensitividad espectral; reducir la profundidad de la juntura p-n; el incremento de la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la capa base y la reducción de la corriente de saturación de juntura p-n en reversa;

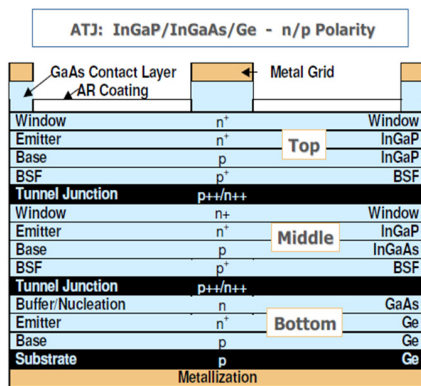
el uso adicional de barreras homojuntura y junturas p-n; el decremento de la velocidad de la recombinación de superficie sobre la superficie fotosensitiva; la optimización de los contactos, reducir pérdidas de potencia eléctrica y óptica, reducir la reflectividad de la superficie de la celda, entre otros.

Teniendo en cuenta estos conceptos, se desarrollaron en los años 80 las celdas solares doble juntura (ejemplo de una estructura doble juntura en la figura 1), para alcanzar una conversión efectiva de fotones de alta energía en potencia eléctrica. Comparada con una celda solar monojuntura de GaAs, los fotones de alta energía (<650nm) son convertidos en potencia eléctrica alta por una celda de AlGaAs/GaAs, así que la eficiencia teórica de la celda tandem o multijuntura es mucho más alta que la de la celda de GaAs. La causa principal es que el voltaje  $V_{ph}$  de las celdas solares de unión simple GaAs no puede exceder un cierto valor que es limitado por  $E_G$ [3], mientras que la combinación de dos o más celdas de materiales con distinto band gap ( $E_G$ ) hace que cada uno absorba una porción diferente del espectro solar, mejorando su desempeño incluso a la exposición de rayos infrarrojos, cercanos al infrarrojo y por supuesto los rayos visibles [13].

El inconveniente con las celdas de AlGaAs es su alta velocidad de oxidación y una resistencia de radiación relativamente baja. Un componente más estable es el InGaP.

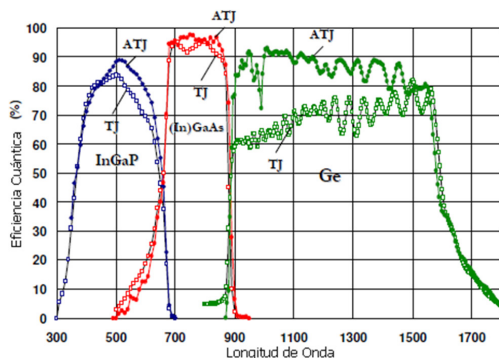
Las heteroestructuras de materiales semiconductores III-V como InGaP/GaAs, InGaP/InP y InP/Si son ahora consideradas los materiales con más perspectiva, debido fundamentalmente a dos razones: la primera, los materiales InGaP poseen una banda prohibida más amplia que la de AlGaAs lo que permite dar la posibilidad de expandir el rango fotosensitivo espectral; la segunda, la heterojuntura de AlGaAs se caracteriza por la esencial discontinuidad de la banda de conducción, así como en la heterojuntura de InGaP/GaAs se observa para la banda de valencia una discontinuidad de banda más grande. Como resultado, los electrones portadores de mayor movilidad se encuentran me-

por separados por el campo eléctrico de juntura p-n [6].



**Figura 2.** Esquema de la sección transversal de una celda ATJ de InGaP/InGaAs/Ge del fabricante Emcore [8].

A manera de ilustración de las celdas triple juntura, las cuales fueron desarrolladas en los 90, exponemos en la figura 2, un modelo de celdas realizado por la empresa Emcore y que está fabricado por técnicas de crecimiento monolítico sobre un sustrato de Ge [9]. Esta celda tiene una eficiencia BOL (beginning-of-life) mínima promedio de 27,5% con iluminación AM0, y es una estructura crecida sobre 100 mm de diámetro de sustrato de Ge con una densidad de masa promedio de aproximadamente 86mg/cm<sup>2</sup>. Igualmente, se presenta en la figura 3 la respuesta de la eficiencia cuántica (EQ) de la celda ATJ de Emcore, donde se puede apreciar como cada sección de la celda se encarga de responder a cierta longitud de onda, lo cual incrementa su rendimiento [4].

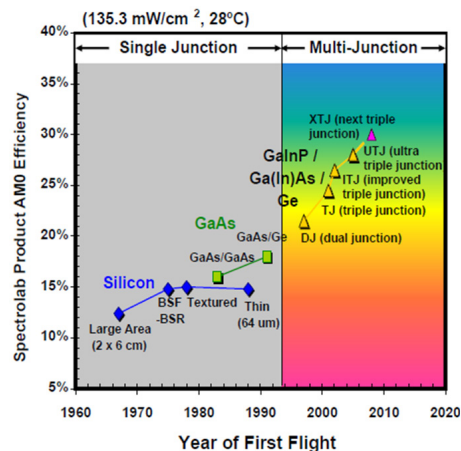


**Figura 3.** Respuesta en longitud de onda de la eficiencia cuántica para celdas triple juntura AT y triple juntura avanzada ATJ de Emcore [8].

## 2.2. Construcción

Respecto a la construcción de las celdas, básicamente existen dos tipos de configuraciones para una celda multijuntura. En una de ellas las homojunturas están físicamente separadas y unidas entre sí mecánicamente, de tal modo que forman un “paquete” relativamente compacto (mechanical stack). Esta configuración requiere que todas las homojunturas, excepto la de la parte inferior, sean transparentes a la luz por debajo de sus band gaps. Otro modo de obtener una multijuntura es fabricar todas las homojunturas para formar una estructura monolítica sobre un mismo sustrato. [7]

Por otro lado, las celdas multijunturas presentan gran mejoría a medida que se aumenta el número de junturas (figura 4), pero a la vez cuanto mayor es el número de junturas, menor es el aumento relativo de la eficiencia de la celda y mayor su costo de producción. Esto es particularmente cierto para las celdas con cuatro y más uniones. Las celdas empleadas ampliamente en aplicaciones espaciales son las triple juntura porque a pesar de los esfuerzos que actualmente se realizan en investigación para fabricar celdas de cuatro junturas y crear arreglos de celdas de película delgada flexibles con alta eficiencia, es insuficiente el desarrollo de este tipo de celdas con alto rendimiento en escenarios adversos como los que se presentan en el espacio exterior.



**Figura 4.** Evolución de celdas solares espaciales y su eficiencia. Spectrolab, Boeing Company [5].

### 3. REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO CUBESAT COLOMBIA 1

#### 3.1. Requerimientos físicos y estructurales

Debido a que la estructura del cubesat es cúbica con dimensiones de 10cm x 10cm x 10cm, el arreglo de celdas por cada cara no debe exceder dicha medida. A pesar de que son 6 caras del satélite, solo 5 estarán disponibles para el montaje de los paneles solares pues se reserva una cara para la antena del satélite.

Además, se debe tener en cuenta que el módulo control de altitud necesita colocar en cada una de las caras superficiales del CubeSat sensores de aproximadamente 4mm<sup>2</sup>.

#### 3.2. Requerimientos eléctricos

Las características en cuanto a consumo de energía para cada uno de los módulos se describen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Potencia consumida por cada módulo del Cubesat Colombia 1.

Consumidor	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Potencia [mW]
OBC	5	2	10
Comunicación	3.3	100	330
Com. Beacon	5	200	1000 (20s cada min)
Com. Link	5	750	3750 (10 min-12 min)
Control actitud	5	120	600
Total			5690

### 4. ELECCIÓN DE CELDAS PARA CUBESAT COLOMBIA 1

En el estudio y cotización de las celdas fotovoltaicas para el CubeSat Colombia 1, se hallaron bastantes fabricantes de celdas solares para uso industrial y doméstico en tierra, pero solo unos pocos producen celdas de alta eficiencia y con requisitos fundamentales para operar en el espacio. De acuerdo a las necesidades físicas y eléctricas del proyecto se inició un largo proce-

so de filtro entre fabricantes y celdas. Los principales fabricantes que pueden elaborar celdas solares, con las características necesarias para suplir energía a los diferentes módulos del proyecto son: Spectrolab (US), Emcore (US), Clyde-Space (UK), CESI (Italia), Azurspace (Alemania), Sharp (Japon) y EADS Astrium (Europa).

Sin embargo, al principio del proyecto, se albergó la opción de considerar las celdas de alta eficiencia terrestres (TASC) que ofrecía Spectrolab debido a que en otros proyectos CubeSat fueron empleadas y se tendría la ventaja de reducir costos significativamente. Al final, fueron descartadas porque no tienen recubrimiento de vidrio antireflejante, lo que significa que si no se encontraba un material óptimo y muy delgado para aplicarles en su superficie, se disminuiría su tiempo de vida y la eficiencia del sistema. Además, al ser celdas de menor tamaño (1,55cm x 3,18cm - 18 celdas por cada cara del satélite), su ensamblaje en los paneles requería de mayor trabajo y un posterior diseño para su disposición en la PCB. Todo esto representaría aumento de costos y tiempo innecesarios.

Aunque Clyde-Space cuenta con su catálogo de precios en la página Web, no fue tomado en cuenta porque esta compañía se dedica a ensamblar los paneles con celdas de Spectrolab y los costos se aumentan prácticamente al triple en comparación a comprarlos directamente con el fabricante. Adicionalmente, comprar los paneles terminados implica dejar fuera de lugar, la documentación académica del procedimiento de diseño e implementación de los paneles solares para un proyecto picosatélital en Colombia. Por otro lado, no obtuvimos respuesta por parte de Sharp y EADS Astrium [12].

Las otras compañías mencionadas presentan hojas de datos en las respectivas páginas Web de celdas diseñadas para fines espaciales. Emcore y Spectrolab son las más populares en estas aplicaciones, CESI y Azurspace fueron un hallazgo posterior y no tenemos referencias de que hayan sido empleadas en otros proyectos CubeSat. Cabe resaltar que cualquiera de estas empresas ofrece celdas "bare" (desnudas) o celdas CIC's. Estas últimas a diferencia de las



“bare” incorporan el material antirreflejante, el diodo de bypass y los conectores de las celdas que son adheridos bajo técnicas especiales.

Con estos datos, y mientras se realizaba el respectivo contacto con las compañías, se realizó un segundo filtro para determinar cuales de las celdas ofrecidas se ajustaban al proyecto, por lo cual se cálculo la potencia teórica entregada por los posibles arreglos que con ellas se podría armar.

La potencia de entrada, para un lado del satélite considerando solo la radiación solar se modela mediante la ecuación (1) [10].

$$P_{in1} = P_{sol} \cdot n \cdot A \cdot \eta \quad (1)$$

Donde,  $P_{sol}$  es el valor de irradiación solar,  $n$  representa el número de celdas en un lado,  $A$  es el área de una celda y  $\eta$  es la eficiencia de las celdas solares, para lo cual se toma la eficiencia al final de la vida EOL.

Teniendo en cuenta las pérdidas por el diodo Schottky, ecuación (2), (3).

$$P_{diodo} = \frac{P_{in1}}{n_s \cdot V_{mpp}} V_{diodo} \quad (2)$$

$$P_{in1} = P_{in1} - P_{diodo} \quad (3)$$

Donde  $n_s$  es el número de celdas en serie,  $V_{mpp}$  es el punto de máximo voltaje. La máxima potencia será entregada cuando 3 caras del Cubesat sean iluminadas (ecuación (4)).

$$P_{max1} = \sqrt{3} P_{in1} \quad (4)$$

Además, las CS están en capacidad de convertir la luz infrarroja en energía eléctrica. Para el caso máximo en el cual 3 celdas son iluminadas se tiene la ecuación (5).

$$P_{IR-max} = P_{IR-tierra} \cdot n \cdot A \cdot \eta \cdot \sqrt{3} \quad (5)$$

Donde  $P_{IR-tierra}$  representa la cantidad de energía infrarroja de la tierra.

Adicionalmente, la radiación por albedo, o luz

reflejada por la tierra también se debe tener en cuenta ecuación (6),(7).

$$P_{alb-max} = P_{alb-tierra} \cdot n \cdot A \cdot \eta \cdot \sqrt{3} \quad (6)$$

$$P_{tot-max} = P_{max1} + P_{IR-max} + P_{alb-max} \quad (7)$$

Se calculó la potencia máxima entregada por las diferentes celdas encontradas, con un número de celdas por cada cara igual a 2. Los valores de las fuentes de energía disponibles para el CubeSat son [10]: irradiancia de 1353W/m<sup>2</sup>, energía infrarroja irradiada de 237W/m<sup>2</sup> y radiación de albedo de 406W/m<sup>2</sup>, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Se considero como segundo filtro, elegir las celdas CIC's porque como se puede apreciar en la tabla 2, se pierde sólo 0,1W de potencia en comparación con las celdas “bare” y no es lo mismo implementar estos 3 componentes en el laboratorio del fabricante que hacerlo por nuestra cuenta debido a la posible alta pérdida potencia.

**Tabla 2.** Cálculos preliminares de potencia máxima entregada por las celdas solares encontradas.

Nombre Celda	$P_{in1}$	$P_{max1}$	$P_{IR-m}$	$P_{alb-n}$	$P_{tot-max}$
BTJ - Bare -Emcore InGaP/InGaAs/Ge	1,71	2,97	0,55	0,95	4,47
BTJM-CIC-Emcore InGaP/InGaAs/Ge	1,67	2,9	0,54	0,93	4,38
ATJ- Bare-Emcore InGaP/InGaAs/Ge	1,70	2,95	0,55	0,95	4,45
ATJM - CIC-Emcore InGaP/InGaAs/Ge	1,67	2,89	0,54	0,91	4,36
UTJ - CIC-Spectrolab GaInP2/GaAs/Ge	1,64	2,84	0,53	0,91	4,28
XTJ Spectrolab	1,79	3,1	0,58	1	4,68
ITJ - Spectrolab GaInP2/GaAs/Ge	1,51	2,62	0,49	0,84	3,96
CSJ - CESI GaAs/Ge	1,32	2,28	0,48	0,82	3,58
CTJA - CESI	1,59	2,75	0,52	0,88	4,15
3G27 - Azurspace	1,83	3,17	0,59	1,02	4,78
3G28 - Azurspace	1,9	3,3	0,62	1,06	4,97
3G30 - Azurspace	2,07	3,58	0,67	1,15	5,39

Las compañías que primero entregaron una respuesta favorable a nuestra solicitud fueron Spectrolab y Emcore. Luego de recibir las cotizaciones, elegimos las celdas UTJ CIC's (28,3% de eficiencia) porque ofrecen el rendimiento necesario para suplir los requerimientos de potencia de los módulos y los precios se ajustan con el presupuesto del proyecto (con Emcore los precios se suben a casi el doble teniendo en cuenta los costos de importación). Desafortunadamente, luego de comenzar el trámite de compra, se desistió toda vez que las CS espaciales son tratadas como productos militares y los trámites de exportación de Estados Unidos no son nada triviales, lo cual no garantizaba recibir las celdas ni mucho menos la devolución del dinero por el pago de dicho trámite. De este modo, quedaron descartadas cualquier tipo de celdas estadounidenses.

Con esto, tomaron fuerza las empresas CESI y Azurspace, quienes ofrecen celdas de alta eficiencia para uso espacial y de diversos tamaños. Aunque no se tomó una decisión final, se sabe que en cualquier caso, y dadas las dimensiones de las celdas ofrecidas, el Cubesat Colombia 1 emplearía 10 celdas solares como máximo.

## 5. DISEÑO PRELIMINAR DEL ARREGLO DE CELDAS SOLARES

La configuración de los paneles solares depende de la potencia que ha de necesitar el cubesat, como también depende de los reguladores, baterías y demás dispositivos que hacen la entrega final al bus de voltaje-corriente que alimenta los dispositivos a bordo. El arreglo de celdas solares puede tener similitudes con un arreglo de fuentes de corriente, ya que las celdas convierten la energía de los rayos del sol en corriente eléctrica. Con el fin de determinar el arreglo de celdas que entregue los valores de voltaje y corriente necesarios para el proyecto, se emplea a continuación un modelo de representación basado en fuentes de corriente.

Para el CubeSat Colombia 1, se requiere máximo una potencia de 4,5W con voltajes entre 2,5V a 4V, como sólo 5 caras del cubesat pue-

den ser cubiertas con las celdas, aprovechamos el área disponible para cubrirla con el máximo número de celdas posibles.

A manera de ilustración, tomamos las CS CTJ de CESI para cálculos aproximados del arreglo. Estas celdas tienen un voltaje de circuito abierto de 2,6 V y el voltaje con carga es de máximo 2,24 V. Como se muestra en la figura 5 (a) cuando se conectan dos celdas en serie el voltaje aumenta aunque la corriente es la misma y en el caso de las conexiones en paralelo (figura 5 (b)) aumenta la cantidad de corriente disponible pero el voltaje es el mismo que el de una celda.

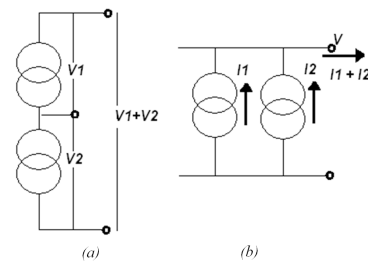


Figura 5. Configuración serie (a) y paralelo (b) de celdas solares.

De esta manera, bastaría con tener 5 submódulos con 2 celdas en serie (figura 6), no obstante, no se precisa si dicho arreglo ofrece la potencia que se calcula será consumida. Además, de ser posible, se requiere un poco más de potencia si se presenta algún inconveniente como la fractura de una celda o el oscurecimiento de la mayoría de ellas.

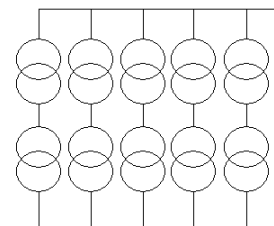


Figura 6. Arreglo de celdas.

Los diodos de Bypass y diodos de bloqueo son componentes importantes a la hora de plantear un arreglo de celdas solares (figura 6), se debe considerar que cuando una celda está en la oscuridad se comporta como un diodo rectificador en conducción directa lo cual representa

una pérdida de potencia en este arreglo. Para solucionar dicho problema se coloca un diodo en cada arreglo (figura 7) en serie en el modelo planteado, con el fin de bloquear la corriente hacia los paneles y así evitar el consumo de potencia por parte de las celdas; con esto también se evita la descarga de las baterías.

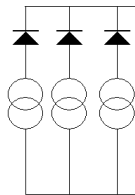


Figura 7. Diodos de bloqueo.

Otra circunstancia que se presenta en el espacio es la posible ruptura de un panel o el posible mal funcionamiento de éste. Con el daño de una celda, todo un submódulo, es decir, 2 celdas en serie, dejaría de funcionar si sólo se rompe una celda de este submódulo, para asegurar el funcionamiento de la celda que no ha sido afectada, se utiliza el diodo de Bypass (figura 8), este diodo conectado en paralelo garantiza un camino alternativo para la corriente.

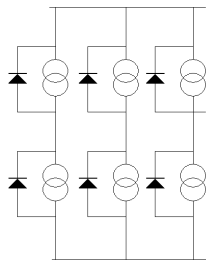


Figura 8. Diodos de Bypass.

Así la configuración final, debe tener diodos de Bypass puesto que la ausencia de estos diodos podría desencadenar en la pérdida significativa de potencia. Los diodos de bloqueo son necesarios para cualquier configuración, aunque estos diodos traen ventajas al diseño del arreglo de celdas no se puede olvidar que también tienen un pequeño consumo de voltaje el cual es significativo en comparación con la producción de voltaje de cada celda. En función de asegurar un voltaje mínimo a la salida de las celdas, dicho consumo por parte del diodo debe tener importancia en los cálculos de potencia.

Puesto que faltan pequeños detalles para definir el voltaje de salida que deben proveer el panel fotovoltaico, se proponen dos modelos: el primero es el estudiado en la sección anterior, es decir 5 submódulos con dos celdas en serie cada uno, con los diodos de bypass y bloqueo (figura 9). El otro modelo, es un arreglo en paralelo de 10 celdas (figura 10), este no necesitaría diodos de Bypass porque si una celda sale de funcionamiento no interrumpe el funcionamiento de las demás; este arreglo debe llevar diodos de bloqueo y en este es más importante denotar el consumo de voltaje debido a los diodos que es de 0,3V lo que nos dejaría un voltaje de salida de 1,94V aproximadamente, lo cual implica que la otra parte del módulo de potencia tiene incluido un elevador para alimentar los buses de 3,3V y 5V del Cubesat.

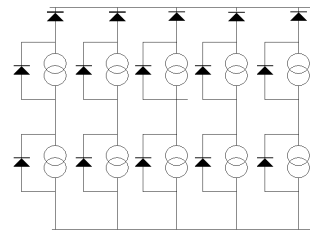


Figura 9. Arreglo de celdas serie paralelo.

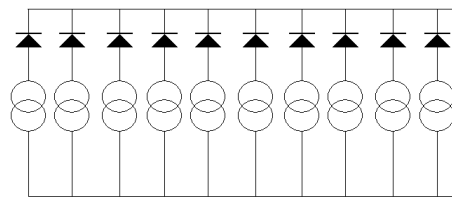


Figura 10. Arreglo de celdas en paralelo.

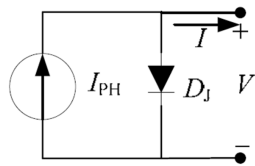
## 6. MODELO ELÉCTRICO DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA SIMULACIÓN

A pesar de tener cálculos teóricos del voltaje y la potencia que suministraría el panel solar, estos datos no toman en cuenta las diferentes condiciones que se presentan en el espacio, especialmente la irradiación y la temperatura. Para obtener un cálculo más preciso de lo que sería el comportamiento del arreglo solar en órbita.

El modelo eléctrico ideal (figura 11) consiste en una fuente de corriente que representa la celda



iluminada y un diodo que simboliza el comportamiento de la celda en la oscuridad.

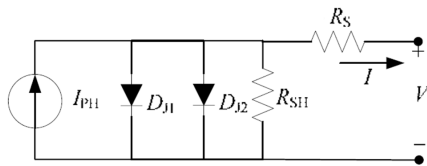


**Figura 11.** Modelo eléctrico simplificado de una celda fotovoltaica.

El valor de la corriente generada se determina mediante la ecuación (8).

$$I = I_{SC} - I_D(e^{V/V_T} - 1) \quad (8)$$

Sin embargo este modelo es insuficiente para describir el comportamiento de la curva característica I-V de la celda. La figura 12 presenta un modelo más real.



**Figura 12.** Modelo eléctrico simplificado de una celda fotovoltaica.

El anterior circuito toma en cuenta las pérdidas debido al paso de la corriente a través de los contactos resistivo del material semiconductor, representadas en  $R_s$ ,  $R_{sh}$ , simboliza las pérdidas tales como cortos localizados en la capa emisora o a lo largo del perímetro de la celda. El diodo  $D_{J2}$  modela la recombinación en la región de carga de la celda.

La ecuación (9) describe la nueva relación entre corriente y voltaje del circuito de la figura 12.

$$I = I_{SC} - I_{D1}(e^{V/V_T} - 1) - I_{D2}(e^{V/V_T} - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

Empleando el software Pspice, se encontró que este modelo para celdas fotovoltaicas refleja bastante bien el comportamiento de la corriente de corto circuito de una celda fotovoltaica pero no es suficiente para representar el voltaje de circuito abierto. Esto se debe principalmente a que las características que pretendemos simular son de una celda triple juntura, por lo cual, se planea integrar bien sea dos diodos más en serie al diodo 1, o representar una celda triple juntura como un arreglo de 3 celdas.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Mariana J.L. Tamasi. Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización. Universidad Nacional de General San Martín. República Argentina, 2003.
- [2] Green, Martin A. Photovoltaic principles. Special Research Centre for Third Generation Photovoltaics, University of New South Wales, Sydney, Australia. 2002.
- [3] Takashi, Ken; Yamada, Shigeki y Unno, Tsunehiro. High-efficiency AlGaAs/GaAs Tandem Solar Cells. Advanced Research Center, Hitachi Cable, Ltd, 2010
- [4] T.V. Torchynska y G. Polupan. High efficiency solar cells for space applications. SEPI – Instituto Politécnico Nacional, U.P.A.L.M., México D.F. Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío, 2003
- [5] Russ Jones. New Frontiers in Solar Cell Conversion Efficiency. Spectrolab, Inc. A Boeing Company. Sylmar, California, Estados Unidos. Diciembre, 2009
- [6] Power Supply for the AAU Cubesat. Aalborg University. P5-Project. Bajo la supervisión de Gert H. Andersen, 2001
- [7] Barrera, Marcela. Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales. Universidad Nacional de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica. Instituto de tecnología. República de

- Argentina, 2009
- [8] Mark A. Stan, Daniel Aiken, Paul R. Sharps, Jennifer Hills, Brad Clevenger, & Navid S. Fatemi. The Development of >28% Efficient Triple-Junction Space Solar Cells at Emcore Photovoltaics. Emcore Photovoltaics, 10420 Research Rd., Albuquerque, NM 87123, USA, 2007.
- [9] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Antonio Luque, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, España y Steven Hegedus, Institute of Energy Conversion, University of Delaware, USA. Editorial Wiley, Inglaterra, 2003.
- [10] Radu Dan Lazar, Vasile Bucelea y otros autores. Design of Power Supply for CubeSat at Aalborg University. Institute of Energy Technology, Aalborg University , PED9 Autumn, 2001.
- [11] Jeppesen, Thomas y Thomsen, Michael. Design of a Power Supply System for DTUosat . Mid-curriculum / Special Course at Eltek, DTU. February 1st, 2002
- [12] Editado por Castañer, Luis y Silvestre, Santiago. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Editorial John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 2002.
- [13] Editado por Luque, Antonio y Hegedus, Steven. Handbook of photovoltaic science and engineering. Editorial John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 2003.
- [14] Editado por Markvart, Tom y Castañer, Luis. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Application. Publicado por Elsevier Science Ltd. Oxford, U., 2003.