



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PANELES
SOLARES PARA UN NANOSATÉLITE**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA:
AARÓN GARZA RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE PRADO MOLINA



CD. UNIVERSITARIA MÉXICO, D.F. MARZO DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

- Este trabajo de tesis se lo dedico a mi padre quien con su esfuerzo, inteligencia, carisma y amor hizo posible mi educación y formación como ingeniero. Estaría muy orgulloso de ver culminada esta etapa de mi vida y yo nunca le dejaré de agradecer por brindarme esta hermosa oportunidad.

Descansa en Paz.

- A mi madre; quien me ofreció gran parte de su vida para guiarme y orientarme hacia el camino del éxito. Muchas gracias por todos tus consejos, tu cariño, apoyo y compañía.
- A toda mi familia y amigos por creer en mí y estar a mi lado en las buenas y en las malas. Siempre estaré yo con ustedes.

Agradecimientos

- A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme una formación profesional y personal.
- Al Instituto de Geografía de la UNAM por proveerme las instalaciones para realizar este trabajo de tesis.
- Al Dr. Jorge Prado Molina porque siempre estuvo a mi lado como guía y orientador durante la elaboración del proyecto.
- A la M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez por su gentileza, cariño, amabilidad, confianza y apoyo en todo momento.
- A mis compañeros de laboratorio: Lucero, Sahel, Rigoberto y Leonel quienes con su amistad, carisma, conocimientos y nobleza contribuyeron a formar un ambiente ameno facilitando la elaboración de la presente tesis.

Índice

Resumen	7
1. Introducción	8
1.1. EL efecto fotoeléctrico.....	9
1.2. El medio ambiente espacial.....	11
1.2.1. Afectaciones en la respuesta de las celdas solares.....	12
1.2.2. Degradación por radiación ionizante.....	13
1.2.3. Por cambios de temperatura.....	14
1.2.4. Por variaciones en la intensidad solar.....	15
1.3. Celdas solares.....	16
1.3.1. Para aplicación terrestre.....	16
1.3.2. Celdas solares espaciales.....	17
1.4. Sistema de potencia para un nanosatélite.....	18
2. Celdas Solares y Diseño de Paneles	21
2.1. Celdas Solares.....	21
2.1.1. Materiales de los sustratos.....	21
2.2. Funcionamiento de una celda solar de Si.....	22
2.2.1. Absorción de Luz.....	27
2.2.2. Texturizado y cubierta antireflectante.....	29
2.2.3. Modelo eléctrico de una celda solar.....	30
2.3. Celdas Solares de uso espacial.....	32
2.3.1. Celdas solares seleccionadas.....	33
2.4. Diseño y construcción de paneles solares.....	34
2.4.1. Adhesivos en un panel solar.....	36
2.4.2. Cableado y soldadura.....	38
2.4.3. Conexiones serie-paralelo.....	39
2.4.4. Diodos de protección.....	33
3. Simuladores Solares y Pruebas de Eficiencia de Celdas Solares	41
3.1. Simuladores solares.....	41
3.2. Caracterización espectral del simulador solar utilizado.....	41

3.2.1. Respuesta espectral del sol	46
3.2.2. Respuesta espectral de las celdas de silicio	48
3.3. Determinación de la eficiencia de las celdas solares	49
4. Integración de Componentes y Pruebas de Funcionamiento	58
4.1. Pruebas de eficiencia de los paneles solares	58
4.1.1. Con el simulador solar	58
4.1.2. Con el sol	62
4.2. Selección de baterías	64
4.3. Circuito electrónico de regulación y carga de baterías	67
5. Resultados y conclusiones	71
5.1. Resultados	71
5.2. Conclusiones	73
Apéndice A. Determinación de las pruebas de calificación para vuelo espacial	76
Referencias	79

Resumen

En este trabajo se describen los procedimientos de diseño de un conjunto de paneles solares que serán utilizados en un nanosatélite de órbita baja. Se presentan las pruebas de funcionamiento y de eficiencia obtenidas en el laboratorio con un simulador solar y se comparan con aquellas realizadas directamente con el Sol; estas últimas en condiciones de potencia un poco menores que las que se tendrán en órbita.

También se presentan los ensayos para caracterizar la respuesta espectral del simulador solar y su comparación con aquella que presenta el Sol. Se describen los circuitos electrónicos utilizados en las pruebas de funcionamiento y para recargar el conjunto de baterías.

Finalmente, se describen las pruebas de calificación espacial para este tipo de componentes.

Introducción

La ciencia es sin duda alguna la fuente de toda riqueza existente en una sociedad. En nuestro país actualmente está comenzando a despertar un cambio en la forma de invertir recursos en ciencia y tecnología; un ejemplo es la tecnología espacial. Con la reciente creación de la Agencia Espacial Mexicana (AEM) se espera que se inicie una industria propia en nuestro país, a través de la formación de recursos humanos y conocimientos que permitirán abordar proyectos cada vez más ambiciosos y benéficos para nuestra sociedad.

El presente proyecto de tesis, cuyo objetivo fue el diseñar y construir un conjunto de paneles solares para su utilización en un nanosatélite, se llevó a cabo en el Instituto de Geografía de la UNAM, siguiendo el proceso de desarrollo de diferentes subsistemas satelitales que desde ya hace algunas décadas se elaboran en esta Universidad. El sistema eléctrico de potencia es indispensable en un satélite, ya que proporciona la energía necesaria para que este equipo pueda llevar a cabo la misión para la cual fue diseñado y construido. El subsistema satelital aquí descrito, vendrá a cubrir una necesidad en el desarrollo de esta tecnología en nuestro país.

Para llevar a cabo el proyecto se utilizó la siguiente metodología:

- Estudio bibliográfico, principalmente sobre la teoría de funcionamiento de las celdas solares.
- Selección de las celdas solares y de los materiales para los paneles.
- Caracterización espectral de una lámpara de halógeno utilizada como simulador solar y su comparación con el Sol.

- Determinación de la eficiencia de las celdas solares a utilizar.
- Diseño y fabricación de los paneles solares.
- Selección de circuitos de regulación, de carga y descarga de baterías.
- Realización de pruebas de funcionamiento.
- Análisis de los resultados obtenidos.

1.1. El Efecto Fotoeléctrico

Hace más de 100 años comenzó una revolución científica con el fin de entender a fondo la estructura de la materia. Empezaron a realizarse una serie de experimentos que comprobaran los modelos teóricos planteados por los físicos de aquella época, marcando así el nacimiento de la mecánica cuántica.

Uno de los grandes descubrimientos efectuados a principios del siglo XX, fue el efecto fotoeléctrico. El físico húngaro Philipp Von Lenard (1862-1947) descubrió que los electrones podían desprenderse de un metal al hacer incidir una onda electromagnética dentro de una cámara de vacío ^[1]. Se aplicaba una diferencia de potencial en los electrodos de tal forma que la corriente resultante fuera cero, para medir la energía cinética de los electrones. Se encontró en este caso que con luz ultravioleta era posible tal efecto y que la energía que portaba una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia.

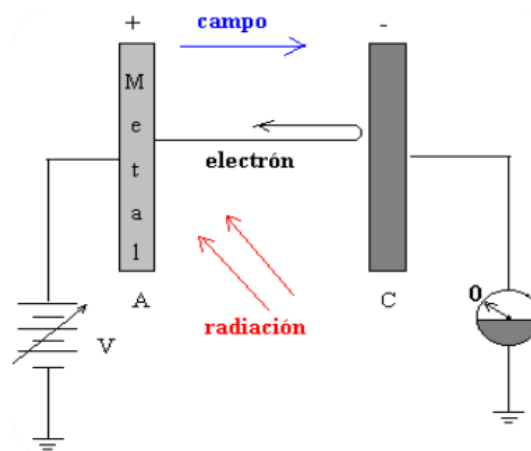


Figura 1.1 Circuito utilizado para comprobar el efecto fotoeléctrico.

En 1900, el físico alemán Max Planck (1858-1947) postuló que la energía térmica radiante emitida por una superficie a temperatura elevada es a través de paquetes de energía discretos llamados *quanta* [2].

Más tarde, en 1905, el físico alemán Albert Einstein (1877-1955), basándose en los experimentos de Philipp von Lenard y Max Planck, propuso un modelo teórico donde establecía que cualquier onda electromagnética, sin importar su intensidad o frecuencia, se encuentra constituida por paquetes de energía llamados fotones.

Con lo anterior podemos decir entonces que un fotón es la manifestación electromagnética más pequeña que se pueda medir en forma de partícula. Entonces, bajo estos términos, la luz es una manifestación de energía en forma de una onda electromagnética compuesta por partículas llamadas fotones. Éstos, al ser parte de una onda electromagnética, poseen una cantidad de energía determinada, la cual es dependiente de la frecuencia de dicha onda, por lo que un rayo de luz roja es menos energético que uno de color morado, que a su vez menos energético que uno ultravioleta.

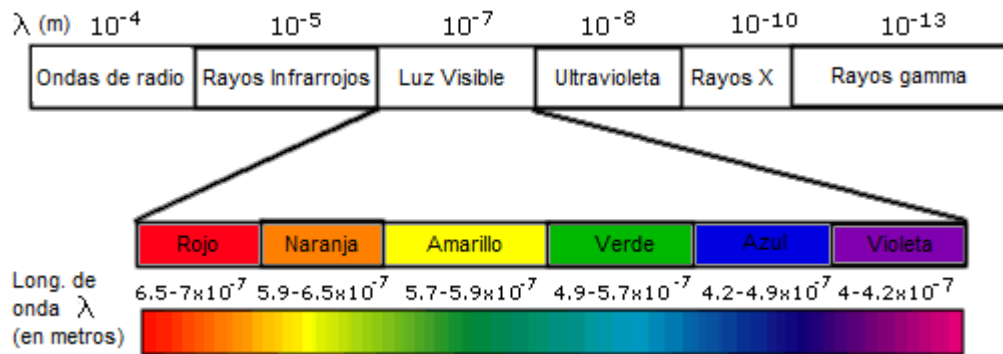


Figura 1.2 Espectro electromagnético

Con los trabajos de Max Planck y Albert Einstein se pudo determinar que la energía de un fotón se rige por la siguiente ecuación:

$$E = h\nu \tag{1.1}$$

Donde:

E : energía del fotón medida en [J]

h : constante de Planck (6.62×10^{-34} [J·s])

ν : frecuencia [Hz]

O expresada en función de su longitud de onda:

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

Donde:

E : energía del fotón medida en [J]

h : constante de Planck (6.62×10^{-34} [J·s])

c : velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 [m/s])

λ : longitud de onda en [m]

La energía del fotón suele expresarse en la unidad denominada eV, electronvolt.

Un electronvolt es la energía cinética ganada por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 [V]; es decir, 1 [eV]= 1.602×10^{-19} [J].

Con base en esta teoría se construyen todas las celdas fotovoltaicas disponibles hoy en día. En este caso, la luz solar es la onda electromagnética incidente sobre la celda solar y ésta se encarga de transformar las ondas de luz en energía eléctrica.

1.2. El medio ambiente espacial

Las condiciones en el espacio exterior son muy extremas, comparadas con las que tenemos dentro de la atmósfera terrestre. Gracias a ésta, nos encontramos protegidos de este ambiente adverso. No obstante, la atmósfera no posee las mismas características en altitudes diferentes; conforme se va ascendiendo, la densidad del aire es cada vez menor por lo que a su vez la presión es también menor. Cuando se llega a una altura de 100 km sobre el nivel del mar, se dice que se ha llegado al límite de la atmósfera terrestre y es el punto de partida del espacio exterior. A éste límite se le conoce como línea de Kármán ^[3]. Más allá de este límite la presión es casi nula, la protección contra radiaciones solares y rayos cósmicos es mucho menor, y existen cambios drásticos en la temperatura, entre otros factores.

Estas condiciones son a las que los satélites, y en particular los paneles solares, estarán expuestos en el espacio.

Las órbitas de los satélites se pueden clasificar según su lejanía con respecto a la Tierra. Los que se utilizan para estudiar y analizar el clima terrestre, así como para algunos tipos de comunicaciones, se localizan en órbita alta ($\geq 35,786$ [km]). Los

satélites de órbita media (2000 a 35,786 [km]) incluyen los que son utilizados para navegación (NAVSTAR, GLONASS), así como algunos otros con funciones específicas. La gran mayoría de los satélites de percepción remota, experimentales y la estación espacial internacional, se encuentran en órbita baja (180 a 2000 [km]) ^[4].

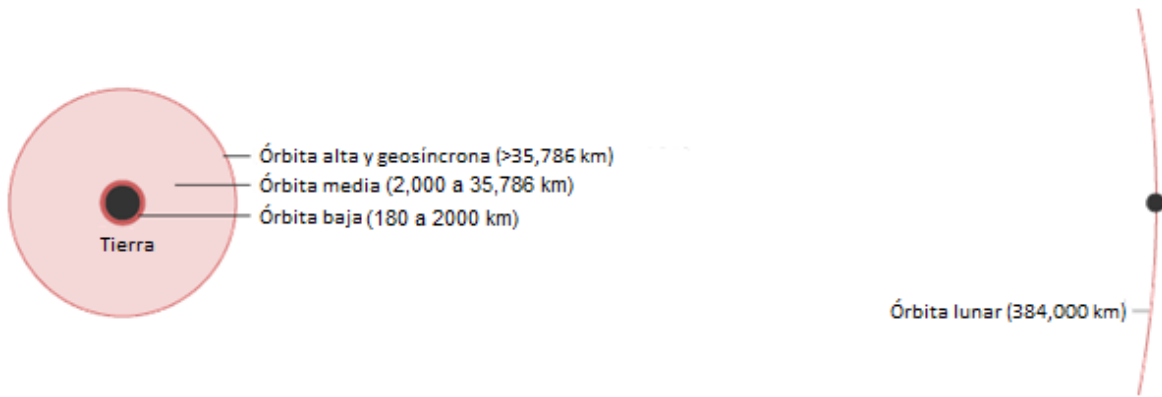


Figura 1.3 Tipos de órbita en un satélite

Un satélite también se clasifica de acuerdo con su masa. Esta define muchos de los parámetros que se deben tomar en cuenta para su lanzamiento, puesta en órbita, cantidad de combustible, etc. En la siguiente tabla se puede observar dicha clasificación ^[5].

Categoría	Masa [kg]
Satélite grande	> 1000
Satélite mediano	500 a 1000
Minisatélite	100 a 500
Microsatélite	10 a 100
Nanosatélite	1 a 10
Picosatélite	0.1 a 1
Femtosatélite	< 0.1

Tabla 1.1 Clasificación de los satélites según su masa

1.2.1. Afectaciones en la respuesta de las celdas solares

Se ha sabido, desde los comienzos de la era espacial, que las partículas energéticas del Sol y los rayos cósmicos provenientes del espacio exterior, producen un daño físico a los cuerpos que orbitan la Tierra, incluyendo por supuesto las celdas solares. Debido a que la potencia de salida de los paneles es vigilada en un monitor cada minuto, diversos estudios demuestran que existe un claro proceso de degradación de las mismas a través del tiempo.

Como podemos observar en la gráfica de la figura 1.4, del Observatorio Solar y Heliosférico de la Nasa y Esa, la potencia entregada por un panel disminuyó un 14% en los primeros 7 años de vida.

Cabe mencionar que en este caso en específico, hubo 2 eventos importantes (en la gráfica se observan dos saltos que ocurrieron en Dic-99 y en Dic-00) los cuales degradaron un 4% más de lo esperado. Dichos eventos fueron producidos por fenómenos electromagnéticos del sol conocidos como: tormentas de protones ^[6].

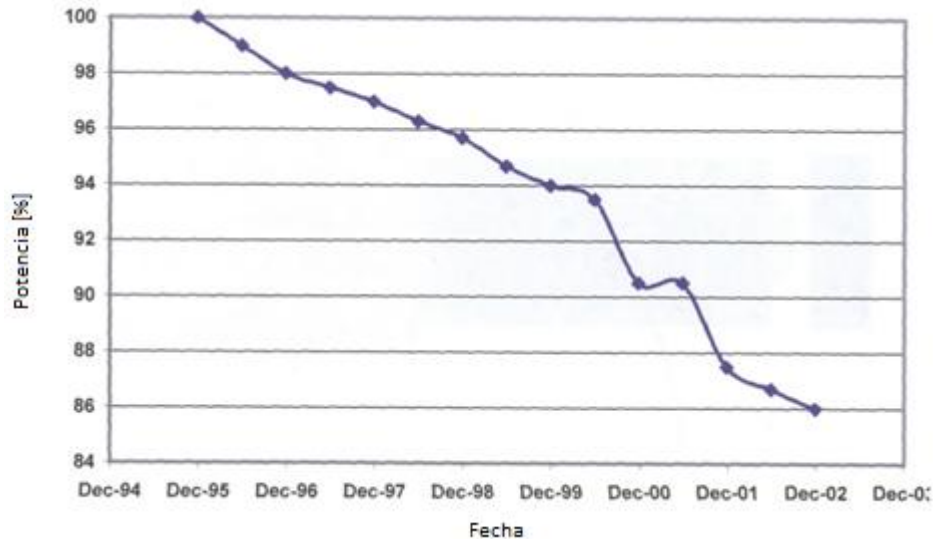


Figura 1.4 Reducción de la potencia inicial de un satélite con el paso del tiempo ^[6]

Un fenómeno determinante para medir el tiempo de vida de un panel solar, es la radiación de rayos cósmicos, tales como tormentas de protones y erupciones solares. Cuando se lanza un satélite a órbita, es usual que la superficie ocupada por los paneles sea 25% mayor, para contrarrestar en gran medida este tipo de situaciones, para llegar al tiempo calculado de vida, con un buen nivel de energía disponible.

1.2.2. Degradación por radiación ionizante

El Sol emite constantemente una corriente de partículas cargadas hacia el espacio exterior en todas direcciones. A dicho fenómeno se le conoce como viento solar. Estas partículas, viajan en el espacio con una velocidad promedio de 600 [km/s] y cuando interactúan con el campo magnético terrestre, en la magnetósfera, son desviadas, concentrándose mayormente en una zona conocida como cinturones de Van Allen (figura 1.5) ^[7].

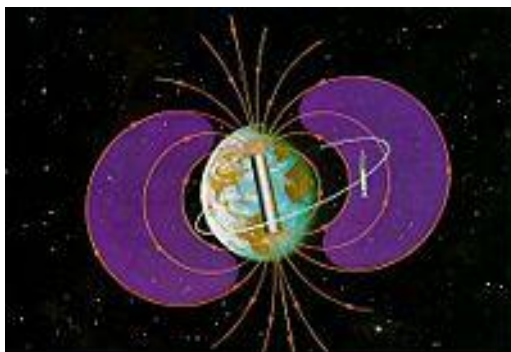


Figura 1.5 Cinturones de Van Allen

Las órbitas de los satélites varían de acuerdo con el propósito y alcance de la misión. Es por eso que podemos encontrarlos desde los 200 [km] en órbita baja, hasta la geoestacionaria (35,786 [km]). La mayoría de los satélites se encuentran en órbita baja por lo que están dentro de los cinturones de Van Allen, recibiendo así una cantidad importante de partículas provenientes del espacio. Los paneles solares, al encontrarse completamente expuestos, sufren una degradación sustancial, porque constantemente colisionan con toda partícula que se encuentre a su paso.

Con el tiempo, la eficiencia de un panel solar es severamente comprometida a tal punto, que el satélite ya no puede operar, por lo que el tiempo de vida es relativamente corto logrando estar en funcionamiento alrededor de 10 a 15 años, este es el caso de satélites geoestacionarios de comunicaciones, los satélites pequeños tienen tiempos de vida de 1 a 2 años.

El viento solar predomina sobre otros efectos de degradación de los objetos lanzados al espacio; entonces, es fundamental tomarlo en cuenta para el diseño de cualquier módulo, satélite, estación espacial, etc.

1.2.3. Por cambios de temperatura

La atmósfera terrestre, además de protegernos de partículas y de diferentes tipos de radiación provenientes del Sol y del espacio ultraterrestre, también es una de las principales fuentes de regulación de la temperatura en el planeta (junto con el agua de los océanos). En ella están contenidos el aire, la humedad y demás partículas que evitan gradientes de temperatura muy grandes, cosa que no ocurre en el espacio.

Los satélites, al estar en el espacio exterior, no están protegidos ante los cambios bruscos de temperatura que se dan cuando pasan de la parte luminosa a la parte oscura de la órbita. Por otro lado, cuando existe un aumento en la temperatura de

una celda solar ésta disminuye su eficiencia. Esto se debe a que el aumento en la temperatura de los electrones, aumenta la conductividad en la celda, provocando así un decremento en la diferencia de potencial de la juntura p-n ^[8]. Si se analiza desde el punto de vista de la teoría de bandas, observaremos que la energía requerida para que un electrón pase de la banda de valencia a la de conducción es menor, reduciendo así la banda prohibida o *band gap*.

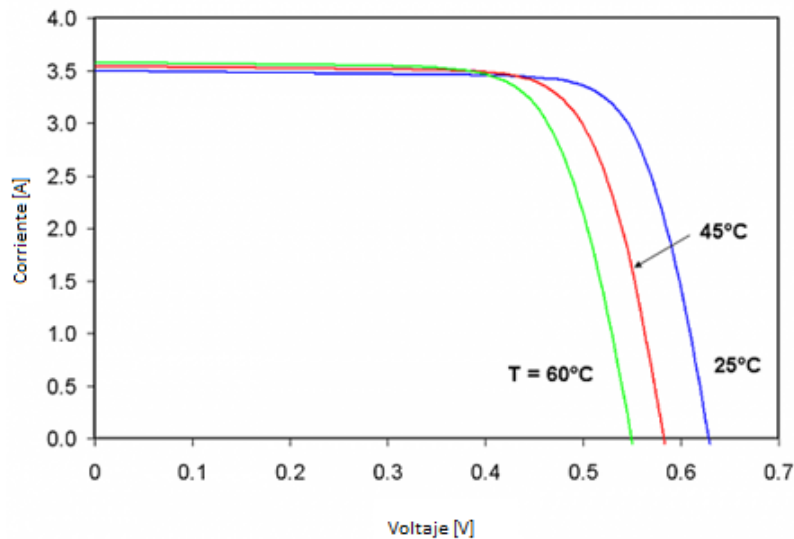


Figura 1.6 Variación de la curva característica en una celda solar en función de la temperatura ^[8]

Entonces, la potencia máxima que pueda suministrar una celda bajo este tipo de condiciones se ve comprometida y puede disminuir hasta en un 25%.

1.2.4. Por variaciones en la intensidad solar

En nuestro Sol ocurren reacciones químicas que provocan que el hidrógeno se fusione y genere helio. La energía liberada de dichas reacciones genera diversos fenómenos que afectan de manera directa a la Tierra. Los flujos de calor no homogéneos en el núcleo solar, la liberación de los electrones de sus átomos y la gran fuerza de gravedad existente hacen que la intensidad energética emitida no sea constante.

Las variaciones en la intensidad solar están directamente relacionadas con las partículas que colisionan con los paneles solares. Se estima que cada año que pasa, los paneles solares pierden entre 1% y 2% de su eficiencia por esta causa ^[6]. Si existen tormentas solares, la degradación de los paneles podría ser aún mayor limitando en mayor medida la esperanza de vida, como vimos anteriormente.

Aún así se han hecho notables mejoras en la eficiencia y tiempo de vida de los paneles desde sus comienzos en los años 80. La eficiencia máxima alcanzada en un panel es cercana al 30% ^[9]. Si se elige la órbita adecuada, los paneles solares pueden quedar expuestos a los rayos del sol hasta en un 96% de la órbita del satélite, aunque esto puede ser poco práctico y no cumplir las expectativas de la misión. Una desventaja de los paneles solares de uso espacial es su costo elevado.

1.3. Celdas Solares

En la década de los años 50, en los laboratorios Bell, se descubrió que el silicio dopado con ciertas impurezas era muy sensible a la luz. Es ahí cuando se comenzó a desarrollar la tecnología de las celdas fotovoltaicas o celdas solares. Los crecientes precios de los combustibles fósiles, así como la cada vez mayor influencia de los grupos a favor del medio ambiente, han propiciado que la producción de paneles solares para uso doméstico, comercial e industrial vaya en aumento.

En la actualidad es relativamente fácil instalar un sistema de generación de energía eléctrica con paneles solares, con el fin de disminuir cada vez más la gran dependencia que se tiene con el petróleo, gas y carbón. A pesar de que todavía no es completamente competitivo, en términos de costo, es un hecho que año con año esta tecnología es cada vez más asequible por el consumidor promedio.

1.3.1. Para aplicación terrestre

Para la perspectiva humana el Sol es inagotable, además de que es una de las formas más limpias de generación de energía eléctrica.



Figura 1.7 Celdas solares para uso doméstico ^[28]

Esta tecnología es posible gracias al elemento más abundante en la corteza terrestre: el silicio. Lo podemos encontrar en la arena de las playas y desiertos. Aunque normalmente se encuentra como óxido de silicio (SiO_2) existe la tecnología para obtener silicio puro y a partir de él se debe seguir un procedimiento para obtener una celda fotovoltaica.

Los paneles solares de silicio pueden constituirse de cristales monocristalinos, policristalinos o de silicio amorfo. La diferencia entre ellos radica en la forma como están dispuestos los átomos de silicio en el material. Existe además, una diferencia en la eficiencia, es decir, el porcentaje de luz solar que es transformada a energía eléctrica.

Para obtener un lingote monocristalino de una pureza elevada y una estructura cristalina casi perfecta se necesita de un proceso de elaboración largo, sofisticado y delicado. Las celdas de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro que se refunde en un crisol a una temperatura de $1,400\text{ [}^\circ\text{C]}$ junto con una pequeña porción de boro (impureza menos electronegativa que el silicio, formando así el material tipo “p”). Después se corta en obleas y se introduce en un horno especial donde se difunden átomos de fósforo (impureza más electronegativa que el silicio, formando así el material tipo “n”) en una de sus caras formando así una oblea de silicio con una unión p-n.

Se proceden a hacer los contactos eléctricos de la celda y se recubre con una capa antirreflectante. Este tipo de celdas tienen una eficiencia cercana al 18% y son las más costosas y su uso puede ser doméstico, comercial e industrial.

El silicio policristalino se fabrica de manera muy parecida pero su eficiencia es menor, siendo de un 12% o 14%^[10]. Las aplicaciones son las mismas que el silicio monocristalino sólo que son más asequibles en términos económicos.

Finalmente, el silicio amorfo es el más barato pero es el de menor rendimiento de todos. Su uso es para dispositivos de poca energía como relojes, calculadoras o luces de emergencia.

1.3.2. Celdas solares espaciales

Con el lanzamiento del satélite Sputnik I, por parte de la U.R.S.S., comenzó una nueva era donde existía una gran cantidad de interrogantes que deberían ser resueltas. Este satélite fue enviado al espacio con una batería de NiCd, sin posibilidad de ser reenergizada.



Figura 1.8 Estación espacial Mir ^[11]

Con el paso del tiempo los dispositivos que se lanzaban al espacio eran cada vez más sofisticados, por lo que necesitaban de una mayor energía para su operación y buen funcionamiento. No fue sino hasta en la década de los 80 cuando se realizaron importantes investigaciones sobre el uso de la energía solar en el espacio. Desde ese entonces, se ha convertido en la mejor forma de proporcionar energía a casi todos los dispositivos espaciales. La estación espacial Mir fue un ejemplo del uso de paneles solares; éstos fueron indispensables para que una gran cantidad de experimentos pudieran realizarse, además de que con los años se le fueron acoplando más módulos ^[11].

Actualmente, los satélites que son lanzados a órbita con distintas funciones, ya sean de comunicaciones, experimentales, etc., la mayoría de ellos llevan consigo un módulo de paneles solares para abastecerse de energía. Otra gran ventaja es que la irradiancia del Sol en el espacio es 25% mayor que en la Tierra, debido a que no hay atmósfera que absorba algún tipo de radiación que minimice la intensidad de los rayos solares.

1.4. Sistema de potencia para un nanosatélite

Sin duda alguna, el diseño de un sistema de potencia para cualquier dispositivo que sea lanzado a órbita debe ser elaborado cuidadosamente para que la misión opere satisfactoriamente (si existe alguna falla, las pérdidas consecuenciales se traducen en altos costos).

Desde los inicios de la era espacial, los sistemas de alimentación de los satélites han ido evolucionando, siendo éstos cada vez más eficientes, compactos y económicos.

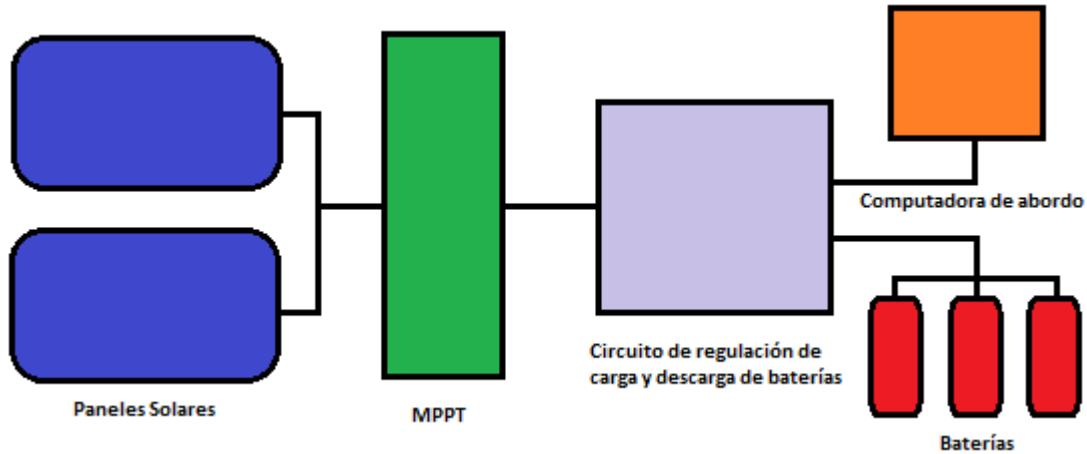


Figura 1.9 Representación de un sistema de potencia de un nanosatélite

En la figura 1.9 se pueden observar las distintas etapas que componen el sistema de potencia de un nanosatélite. La alimentación comienza con los paneles solares, que deben suministrar la suficiente potencia, hasta el final de la misión. En los paneles se conectan diodos, los cuales sirven para evitar un flujo de corriente en sentido inverso cuando alguno o algunos de ellos se encuentren en eclipse.

La siguiente etapa consiste en un convertidor MPPT (Maximum Power Point Tracking), el cual se encarga de suministrar la máxima potencia posible a las baterías^[12].

Existen distintos tipos de baterías. Las que más se usan en la actualidad son de Litio-Ión ($L+$). El litio es un material muy ligero y ofrece una capacidad energética mayor que otros tipos de baterías como las de Ácido-Plomo, Níquel-Cadmio ($NiCd$) o Níquel Metal Hidruro ($NiMH$). Sin embargo, el ciclo de carga es delicado por lo que debe contar con un suministro constante de corriente y voltaje, para mantener su rendimiento energético, tanto en fase luminosa como oscura, y evitar algún tipo de sobrecalentamiento comprometiendo así la vida útil de la batería. Es necesario, así como en los paneles solares, diseñar un arreglo adecuado para asegurar que durante el transcurso de la misión, cuente con energía suficiente para mantener en operación todos los circuitos electrónicos del nanosatélite. Siempre se debe considerar un sistema de protección adecuado, en esta etapa, en caso de sobrecarga, de alguna falla eléctrica o de algún circuito, corto que pueda surgir durante la vida útil del dispositivo.



Figura 1.10 Satélite Sac-A con distintas caras de paneles solares.

En los nanosatélites, normalmente, es necesario contar con distintos niveles de diferencia de potencial. La última etapa, antes de la distribución de la energía eléctrica a los distintos subsistemas, consiste en un arreglo de convertidores de DC/DC. Éstos funcionan por medio de la generación de ondas cuadradas moduladas en su ancho de pulso (PWM). El ciclo de trabajo de dicha onda será proporcional al voltaje, a la salida de dicho convertidor. Esto hace que su eficiencia (85%+) sea mucho mayor a la de un divisor de voltaje convencional. Además, la señal de voltaje a la salida es muy estable por lo que la electrónica involucrada en el nanosatélite tendrá una menor probabilidad de falla. El tamaño de los convertidores es reducido al igual que su masa, siendo éstos dos factores muy importantes para un dispositivo que va a ser puesto en órbita.

Para aumentar la confiabilidad de su funcionamiento, se deben tomar en cuenta en el diseño de los subsistemas del nanosatélite su redundancia, es decir, un sistema cuya composición sea idéntica al original, pero que únicamente entrará en funcionamiento cuando el sistema principal llegase a fallar. Así se evita que por un funcionamiento inadecuado en la cual un bloque deje de operar, se convierta al dispositivo en un cuerpo totalmente inerte. Aunque incluir la redundancia en el diseño aumenta considerablemente el costo del nanosatélite, la probabilidad de tener éxito en la misión es mayor.

Celdas Solares y Diseño de Paneles

2.1. Celdas Solares

2.1.1. Materiales de los sustratos

Las celdas solares actuales difieren de las primeras que se construían en los años 50 en los laboratorios Bell ^[13] ^[14]. En aquella época, con el lanzamiento del satélite estadounidense Vanguard 1 (1958) se realizaron distintas pruebas; entre ellas, la inclusión de celdas solares como una forma de suministro de potencia al dispositivo ^[15]. Debido a que la misión tuvo éxito, su uso se fue expandiendo rápidamente en numerosas misiones satelitales.



Figura 2.1 Satélite Vanguard 1 ^[29]

En sus inicios, las celdas estaban hechas de Si y junturas p-n elaboradas sobre obleas de Si cristalino haciendo la función de material tipo n dopado con B para el material tipo p. La eficiencia máxima que se lograba era entre el 7% y 8%.

Cuando el físico estadounidense James Van Allen (1914-2006) descubrió que existen zonas de alta radiación electromagnética, en la alta atmósfera (magnetósfera), a principios de la década de los 60, se comenzaron a hacer

investigaciones acerca del impacto en la vida útil de las celdas solares ubicadas en esta zona.

Se experimentaron con diversos materiales. Uno de ellos era el Ga pero mostraba ciertas desventajas: la resistividad de este material era mayor, por lo que causaba una menor eficiencia en la celda. Posteriormente, se observó que si el Si es sometido a un proceso de recocido a 400 [°C] el daño por la radiación disminuía. El Litio fue otro material que se difundió en las obleas de Si (material tipo n) para reducir aún más los efectos causados por la radiación. Sin embargo, se abandonó esta idea cuando las condiciones de operación de las celdas se volvían inestables en el espacio.

Para los contactos de la celda solar se llevó un proceso de evaporación de Ti y Ag, el cual se adoptó rápidamente debido a su buena adhesión al Si. A finales de los 60 se introdujo una mejora la cual consistía en añadir una capa de Pd entre el Ti y Ag, dando así un aumento significativo en la protección contra la corrosión ^[16].

Las celdas para uso terrestre comenzaron su desarrollo en los años 70. El crecimiento del Si se llevó a cabo de distintas formas, siendo las más populares el Si monocristalino, policristalino y el amorfo. En esa misma década se estaban logrando grandes avances en el crecimiento de semillas de Si, con la técnica de Czochralski, por lo que se comenzó a utilizar en la fabricación de celdas solares espaciales.

También se hicieron diversas investigaciones utilizando materiales del grupo III y V de la tabla periódica, llegando a tener importantes avances tales como producir una celda solar con una eficiencia de entre el 16% y 18% ^[16]. Ya no estaba hecha de silicio, ahora se experimentaba con GaAs y las celdas se construían utilizando la técnica de deposición epitaxial de fase líquida.

A pesar de que existían alternativas para la elaboración de celdas de Si, no había algún otro material que tuviera la misma confiabilidad, predictibilidad en sus características y con notables mejoras en los procesos de producción. Las obleas también sufrieron cambios significativos, ya que se les añadió una estructura piramidal en toda la superficie para generar una cantidad mayor de portadores, aumentando así la eficiencia. Sin embargo, después de diversas pruebas en el espacio, se descubrió que su misma estructura hacía que la celda aumentara rápidamente su temperatura volviéndola menos eficiente y poco apta para este tipo de uso. Poco después, se modificaron las obleas invirtiendo las estructuras piramidales, es decir, ahora existían pequeños huecos a través de la celda, reduciendo un poco la temperatura de operación.

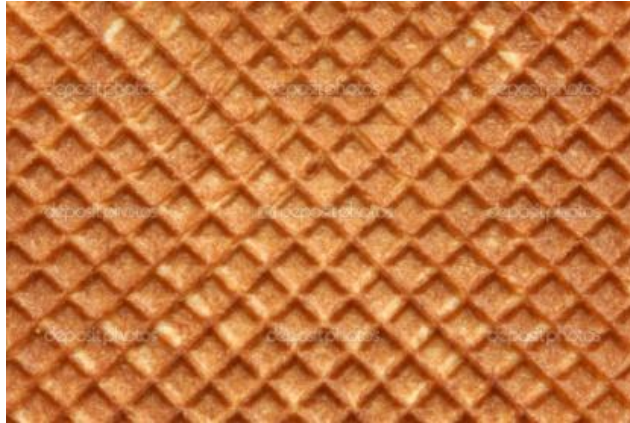


Figura 2.2 Oblea texturizada con estructuras piramidales invertidas ^[19]

Para los años 80 se comenzaba a experimentar con Ge como material de sustrato y GaAs como dopante. Resultaba que el Ge tenía una mayor resistencia mecánica la cual era fundamental, desde el despegue de la nave espacial hasta el posicionamiento del satélite en órbita. A finales de la misma década se habían logrado obtener celdas de GaAs/Ge de más de una juntura, logrando un mejor aprovechamiento de la energía solar llegando a tener una eficiencia mayor al 20%. Posteriormente, ya en los 90, las celdas multijuntura comenzaron a ganar terreno en el mercado espacial, porque su mayor eficiencia permitía a los diseñadores crear satélites de menor tamaño, por lo que había una clara reducción del volumen y peso; no obstante, su costo era entre 6 y 9 veces superior a las celdas convencionales de Si.

La última generación de celdas solares contiene varias juntas, llamadas también celdas multijuntura. Pueden tener 2, 3 o más uniones dependiendo del diseño y es claro deducir que entre más juntas tenga la celda, mayor será el costo. La eficiencia típica de este tipo de celdas es del 21% o 22% para las de doble juntura y del 24% o 26% para las de triple juntura, habiendo llegado hasta el 29%. En la actualidad se está buscando la forma de obtener celdas con eficiencias mayores al 30%, adicionando una cuarta juntura para las celdas basadas en materiales de GaAs/Ge.

2.2. Funcionamiento de una celda solar de Si

De los elementos existentes en la naturaleza, sólo algunos forman enlaces en los cuales los electrones se comparten entre los átomos de las partículas para tener siempre 8 de éstos en el último nivel. A este tipo de enlace se le denomina covalente.

Otro factor clave es la cantidad de energía con la que cuentan los electrones en la última capa del átomo. Ésta y el tipo de enlace, definen muchas de las propiedades de un semiconductor ^[19].

Los electrones que están involucrados en el enlace atómico no son capaces de transmitir energía por lo que no se les considera libres. Sin embargo, esto sólo sucede en el cero absoluto. A temperatura ambiente (25 [°C]), los electrones ganan suficiente energía para escapar de sus respectivos enlaces. Entonces, son capaces de formar parte del proceso de conducción. A temperaturas muy bajas o cercanas al cero absoluto, el semiconductor se comporta como un aislante.

							VIIIA
							2 He 4.003
			IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
			5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998
			10 Ne 20.183				
			13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453
			18 Ar 39.948				
IB	IIB						
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)

Figura 2.3 Los elementos en azul son los materiales semiconductores más comunes ^[19]

El electrón, cuando se encuentra enlazado por otros o cuando está libre para formar parte del proceso de conducción genera 2 estados energéticos: uno alto y otro bajo. Es posible analizar este fenómeno a través de la Teoría de Bandas. Ésta consiste, como su nombre lo indica, en modelar una “banda” donde se encuentran todos los electrones en estado bajo (banda de valencia) y otra en donde están libres (banda de conducción).

Para pasar de un nivel a otro, es necesaria una determinada cantidad de energía; ésta no puede ser menor para pasar a un estado intermedio lo que genera el modelado de una tercera banda de energía denominada “banda prohibida” (o band gap).



Figura 2.4 Modelo de la Teoría de Bandas en un elemento ^[19]

En la banda de valencia, cuando un electrón pasa de ésta a la de conducción, deja libre un espacio en uno de los enlaces, denominado “hueco”. Un electrón adyacente intenta ocupar el enlace roto por el primero, pero a su vez rompe otro. Este proceso se repite una y otra vez por un intento de mantener todos los enlaces completos. Se puede entender esto como una partícula con carga positiva desplazándose dentro de la banda de valencia.

Es posible inferir que por cada electrón excitado, es decir, aquel que pasa a la banda de conducción, se genera al mismo tiempo un hueco. Entonces, ambas partículas, al participar en el proceso de conducción, se les denomina portadores.

La temperatura en un material semiconductor obliga a que se generen portadores libres (tanto huecos como electrones). A la concentración de éstos se le denomina “concentración de portadores intrínsecos” (η_i) ^[19]. Un semiconductor intrínseco es aquel que se encuentra en su estado puro, es decir, está formado por un solo elemento. La concentración intrínseca se refiere entonces al número de electrones o huecos en un material de esta naturaleza y está definida por la siguiente ecuación:

$$\eta_i = 9.38 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300} \right)^2 e^{-\frac{6884}{T}} \quad (2.1)$$

Donde:

η_i = concentración intrínseca de portadores [cm^{-3}]

T = temperatura absoluta del semiconductor [K]

Impurezas en un semiconductor

A un material semiconductor es posible doparlo de otros materiales, denominados impurezas, para cambiar la concentración de portadores. El Si tiene 4 electrones

de valencia, es decir, cuenta con cuatro de éstas partículas en su último nivel orbital. Átomos con un electrón más de valencia que el Si (conocidos también como átomos pentavalentes; pertenecientes al grupo VA de la tabla periódica) son utilizados para doparlo con el fin de que cuente con más electrones libres para hacer más eficiente la conducción; a este material se le denomina “tipo-n”. De igual forma, átomos con un electrón menos que el Si (elementos trivalentes; grupo IIIA) al ser empleados en el dopaje otorgan un mayor número de huecos denominado semiconductor “tipo-p” tal como se muestra en la figura 2.5. Para nuestro caso, el semiconductor tipo-p en una celda solar es dopado con B y el tipo-n con P.

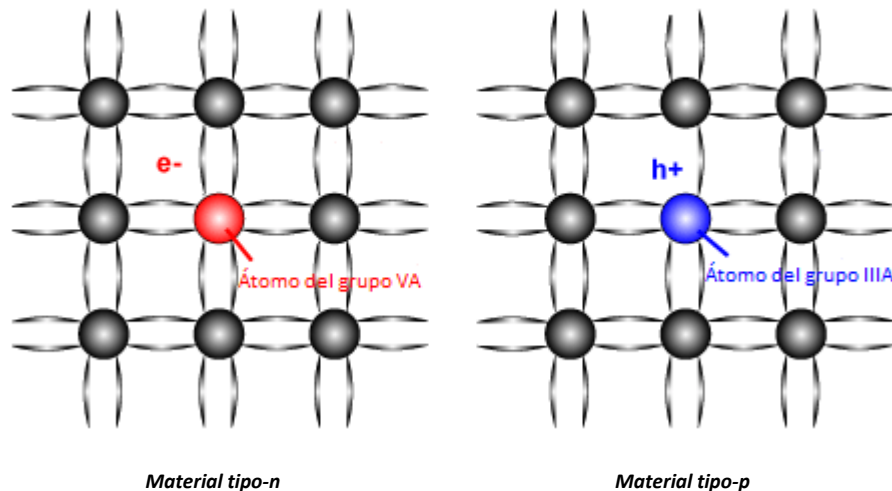


Figura 2.5 Diferentes configuraciones de materiales semiconductores según su dopaje ^[19]

En materiales con dopaje, siempre existe una mayor cantidad de portadores de carga de un tipo que el otro; el tipo de portadores con mayor concentración se le denominan “portadores mayoritarios” y al de menor concentración “portadores minoritarios.”

Un semiconductor tipo-n y otro tipo-p se juntan para formar la unión p-n. Como el material tipo-n contiene una alta concentración de electrones y el tipo-p de huecos; éstos tienden a distribuirse hacia el material opuesto. Si las partículas carecieran de carga, la concentración de ambos materiales tendería a ser la misma. Sin embargo, en la unión p-n, cuando los electrones del material tipo-n se desplazan hacia los huecos en el tipo-p, generan detrás de ellos iones positivos y se crean iones negativos al momento de alojarse en los huecos. Éstos, al mantenerse fijos a los materiales, en los límites de la unión se comienza a formar un campo eléctrico en dirección contraria al proceso de combinación de electrones deteniendo eventualmente este desplazamiento alcanzando un equilibrio eléctrico. A la región donde ocurre este fenómeno se le denomina “zona de agotamiento” (figura 2.6).

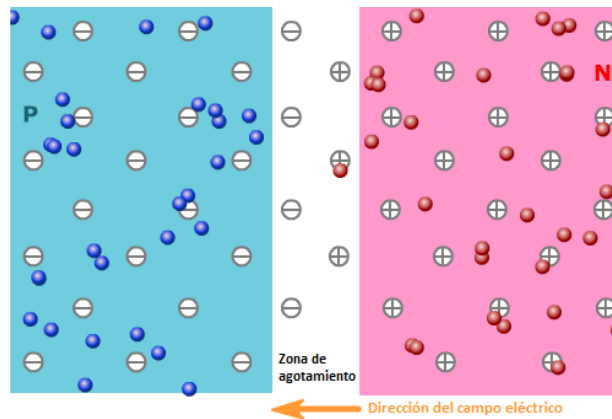


Figura 2.6 Juntura o unión p-n. Al momento de la unión se crea la zona de agotamiento y se genera un campo eléctrico ^[19]

La intensidad del campo eléctrico crea a su vez una diferencia de potencial en la unión, que en el caso del Si, es de 0.6 a 0.7 [V]. Dicho voltaje es el que puede ser medido cuando una celda solar se encuentra en operación. Cabe mencionar que el modelo de una celda solar, tanto matemático como su representación en un circuito eléctrico (mostrado más adelante), es el de un diodo, debido a que existe un gran parecido en el comportamiento con este dispositivo.

2.2.1. Absorción de luz

Los fotones que inciden en un semiconductor pueden ser reflejados de su superficie, absorbidos por el material o pasar a través de él (transmisión). Para dispositivos fotovoltaicos, la reflexión y transmisión son considerados mecanismos de pérdida, porque un fotón que no es absorbido por el material, no genera energía. Cuando el fotón es absorbido tiene la posibilidad de excitar un electrón de la banda de valencia a la de conducción. La absorción depende de la energía del fotón, por lo que no cualquiera tenderá a producir dicho fenómeno.

La absorción de fotones en un semiconductor se puede dividir en 3 grupos según la energía que contengan, con respecto a la energía de la banda prohibida del material:

- $E_f < E_{bp}$: los fotones con energía E_f menor a la de la banda prohibida interactúan débilmente con el material, pasando a través de él en forma transparente.
- $E_f = E_{bp}$: la E_{bp} prohibida posee la suficiente energía para crear un par electrón-hueco.
- $E_f > E_{bp}$: aquellos fotones con energía mayor que la E_{bp} son absorbidos pero el exceso de energía se transforma en calor. Para nuestro caso, esto reduce la eficiencia por aumento de temperatura en la celda.

La luz incidente en una celda solar es una suma de diferentes ondas de energía. Cada una de ellas determina entonces el coeficiente de absorción, el cual mide la cantidad de fotones que son absorbidos por unidad de área, en función a la longitud de onda, cuando penetran en el material.

Cabe resaltar que aún para los fotones con mayor energía que E_{bp} , el coeficiente no es una constante, pero depende en gran medida de la longitud de onda.

Para los fotones que tengan una energía muy cercana a la de la banda prohibida, sólo aquellos electrones que se encuentren en el límite de la banda de valencia podrán ser capaces de interactuar con ellos y pasar a la banda de conducción; sin embargo, esto da como resultado una absorción relativamente baja (figura 2.7). Conforme la energía del fotón aumenta, la probabilidad de ser absorbido por un número mayor de electrones también se incrementa.

El coeficiente de absorción, α , está determinado por la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.2)$$

Donde:

α = coeficiente de absorción [cm^{-1}]

k = coeficiente de extinción (relacionado con el coeficiente de refracción como su parte imaginaria)

λ = longitud de onda [cm]

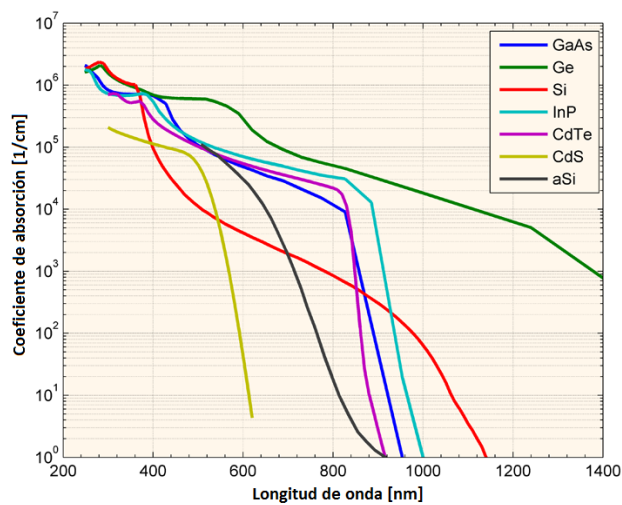


Figura 2.7 Coeficiente de absorción para distintos materiales a una temperatura de 300 [K] ^[19]

2.2.2. Texturizado y cubierta antireflectante

Si se fabricara una celda solar sin algún tipo de texturizado, ni cubierta anti reflectante, la luz se transmitiría en el semiconductor una sola vez haciéndola mucho menos eficiente. El texturizado de la celda se realiza en la parte frontal, es decir, en el material tipo-n y en la parte posterior, donde se coloca una capa de aluminio. La textura piramidal invertida en la parte frontal obliga a la luz reflejada a incidir nuevamente en el material; el texturizado en el aluminio refleja totalmente la luz que se encuentra dentro del material para interactuar nuevamente con los electrones del semiconductor.

La cubierta antireflectante (figura 2.8) está hecha a base de nitruro de Si y se difunde en la oblea de Si, ésta le da su color característico. Su función es modificar el índice de refracción del material para aumentar la absorción de fotones en el semiconductor.



Figura 2.8 Distintas cubiertas anti reflectantes de nitruro de silicio. El color depende del grosor de la celda pero es únicamente utilizado como referencia ^[19]

Cuando los electrones cuentan con la suficiente energía para permanecer en la banda de conducción, estarían totalmente desaprovechados si la celda no forma parte de algún circuito electrónico. Al momento de conectar una celda a un componente, una corriente comienza a fluir a partir de la luz que incide en la misma; los electrones entonces son atraídos a los huecos que se encuentran en el material tipo-p.

La forma en la que una celda suministra la energía necesaria al dispositivo eléctrico, es como el de una fuente de corriente. Ésta entrega la corriente según la demanda en la carga a una diferencia de potencial constante (0.5 [V] en las celdas de Si).

2.2.3. Modelo eléctrico de una celda solar

La manera en que podemos representar una celda solar en un circuito, es a través de diferentes modelos. Cuando la celda se encuentra a la sombra se puede representar como un diodo de silicio, con el mismo comportamiento.

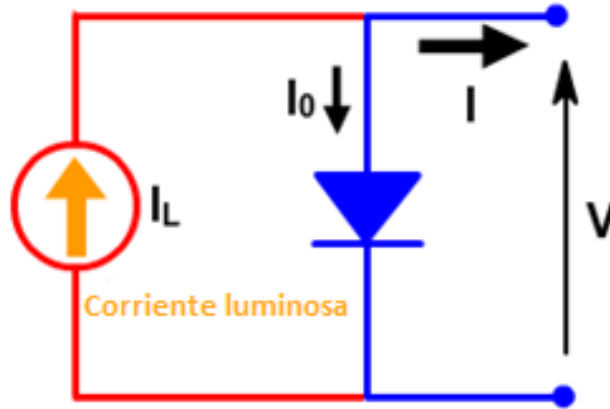


Figura 2.9 Celda Solar representada como un diodo ^[19]

Asimismo, su modelo matemático ^[19] se representa con la ecuación del diodo, pero tomando en cuenta la corriente generada en la celda.

$$I = I_L - I_S \left[e^{\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$I_0 = I_S \left[e^{\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)} - 1 \right] \quad (2.3a)$$

Donde:

I = corriente generada en la celda [A]

I_L = corriente generada por luz incidente [A]

I_S = corriente de saturación en el diodo [A]

V_D = diferencia de potencial en el diodo [V]

n = coeficiente de ajuste en función del material del semiconductor

V_T = voltaje térmico (26 [mV])

A medida que la celda comienza a ser iluminada la curva característica del diodo se modifica debido a que comienza a circular la corriente a través del circuito y como está actuando como dispositivo activo, la curva del diodo se invierte 180°

con respecto al eje de las abscisas, dando así la característica de fuente de corriente.

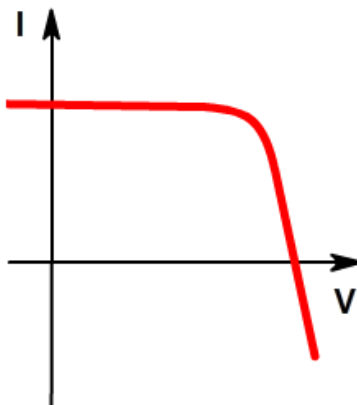


Figura 2.10 Curva característica de una Celda Solar ^[19]

Una vez que la celda solar se encuentra en ese estado podemos considerar sus características tanto de voltaje como de corriente. Como todo elemento real, existen pérdidas cuando se intenta generar energía a través de este dispositivo. En nuestro caso, como toda fuente de corriente, existe una resistencia de muy alto valor en paralelo, llamada también resistencia en derivación, generando así un divisor de corriente. Cuando la corriente circula por el panel, es natural que exista también una pérdida por lo que se modela colocando una resistencia en serie normalmente de un valor muy bajo.

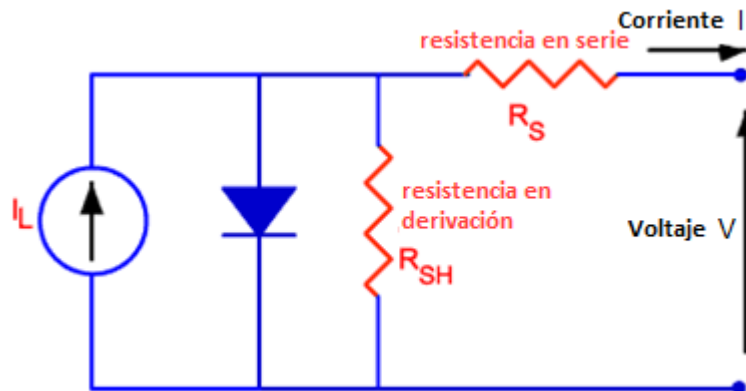


Figura 2.11 Modelo de una celda solar ^[19]

Entonces, el modelo matemático que representa la corriente generada por la celda es el siguiente:

$$I = I_L - I_S e^{\left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right]} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.4)$$

Donde:

I = corriente total generada por la celda [A]

I_L = corriente generada por la incidencia de luz [A]

I_S = corriente de saturación en el diodo [mA]

q = carga del electrón (1.602×10^{-19} [C])

V = diferencia de potencial en la celda [V]

V_{RS} = diferencia de potencial en la resistencia en serie [V]

n = coeficiente de ajuste en función del material del semiconductor

k = constante de Boltzmann (1.3806×10^{-23} [J/K])

T = temperatura de la celda (normalizado a 300 [K])

R_{SH} = resistencia en derivación [Ω]

2.3. Celdas Solares de uso espacial

En las misiones espaciales se requiere que todos los componentes sean de una alta confiabilidad. En el caso particular de las celdas solares, éstas deben diseñarse y fabricarse para funcionar en las condiciones extremas del espacio exterior, por lo que su costo se eleva muy por encima de los paneles construidos para aplicaciones terrestres (entre \$300 y \$1000 USD el watt pico).

Actualmente, los principales materiales utilizados en celdas solares espaciales son el silicio (Si), germanio (Ge), arsenuro de galio (GaAs), fosfuro de galio-indio (InGaP) y arsenuro de galio-indio (InGaAs). También se ha experimentado con fosfuro de indio (InP) debido a que tiene una mejor resistencia a la radiación.

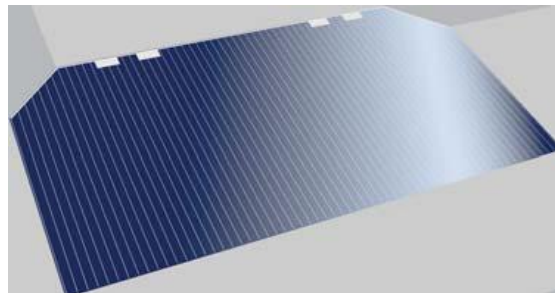


Figura 2.12 Celda solar de uso espacial marca Emcore ^[9]

A manera de ejemplo, se muestra en la figura 2.12 una celda solar espacial disponible en la actualidad. Es considerada como una celda de tercera generación con una masa de 84 [mg/cm²]. Los materiales del sustrato están conformados en una triple unión (ZTJ) con los siguientes elementos: InGaP, InGaAs y Ge. La máxima eficiencia que puede alcanzar esta celda es de 29.5%. Su diseño le permite colocar los diodos de protección contra flujos de corriente inversa en las esquinas, con corte diagonal, con el objetivo de maximizar el espacio disponible en el nanosatélite. La potencia máxima por unidad de área que ofrece esta celda es de 135.4 [mW/cm²] [9]. Las diferentes uniones que componen la celda solar se muestran en la figura 2.13.

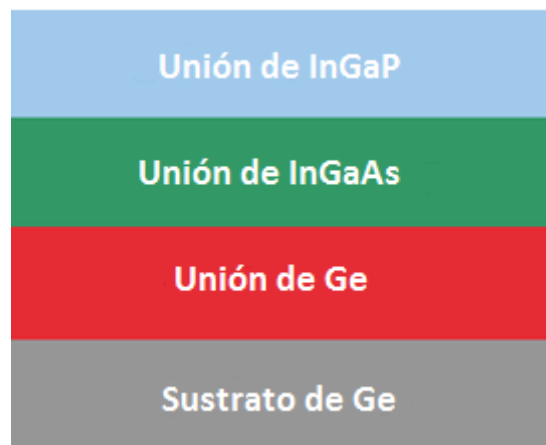


Figura 2.13 Estructura de la celda solar ZTJ Emcore [9]

Cuando se diseña el sistema de potencia de un nanosatélite es fundamental tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Potencia inicial.- Punto de partida para definir el diseño del subsistema.
- Espacio disponible.- Fundamental para el arreglo de los paneles solares.
- Presupuesto.- Un factor determinante en el diseño del subsistema. Si se cuentan con los recursos necesarios sería posible adquirir celdas muy eficientes, muy ligeras y con gran resistencia a la radiación.
- La duración de la misión.- Se hace más selecto el tipo de celdas a elegir.

2.3.1. Celdas solares seleccionadas

En nuestro caso utilizaremos celdas solares espaciales de silicio (Si), mono unión, dopadas con boro (B) y fósforo (P) como materiales p y n, respectivamente. A su vez se dispondrán de 3 tipos de celdas diferentes de acuerdo con sus

dimensiones. En la siguiente tabla se aprecian las características de cada tipo de celda a utilizar:

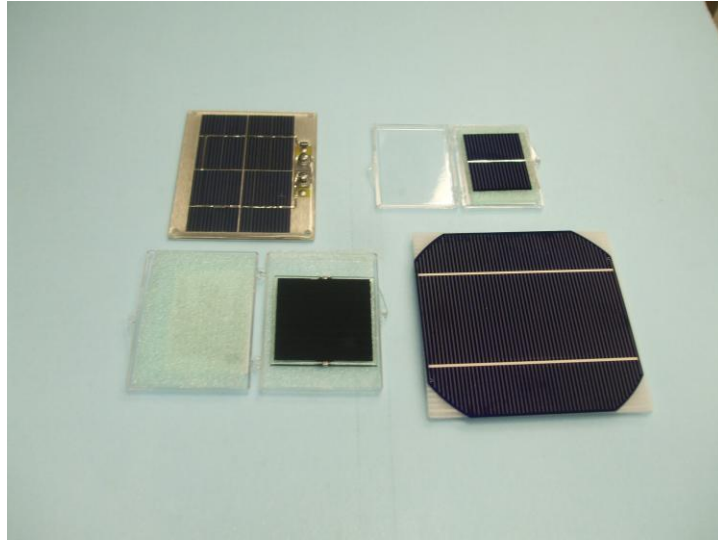


Figura 2.14 Diferentes celdas solares de uso espacial, consideradas inicialmente para este proyecto.

Para el diseño del panel se pretenden combinar los 3 grupos de celdas solares para cumplir con las especificaciones de diseño.

Tabla 2.1 Tipos de celdas utilizadas para el diseño de los paneles.

	Área [m ²]	Voc [V]	Isc [mA]	P _E [W]
Celda de 2x6 [cm]	1.2E-03	0.5	450	1.5
Celda de 2x4 [cm]	8.0E-04	0.5	250	1
Celda de 4x5 [cm]	2.0E-03	0.5	500	2.5

2.4. Diseño y construcción de paneles solares

Los paneles están fabricados con fibra de carbono y epoxy, con centro de espuma de estireno. Por especificaciones de diseño el panel debe ser de 10x30 [cm], aunque las dimensiones reales fueron 13 [cm] de ancho y 31.5 [cm] de largo, dando tolerancia para incluir una pequeña separación entre las celdas y para efectuar las conexiones. El suministro de potencia requerido es de 2 [W] con una diferencia de potencial de 5 [V].

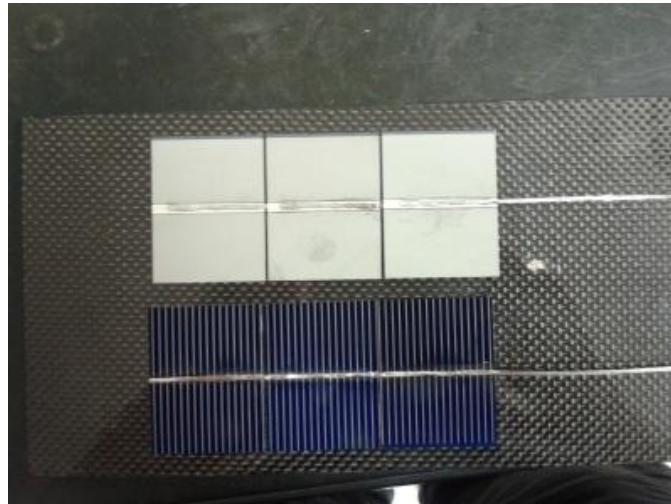


Figura 2.15 Soldado de las celdas solares

El soldado de las celdas se llevó a cabo con cable plano de cobre estañado de 1.5 mm de ancho. Una vez soldadas las celdas, se pegaron a la base con silicón de alta temperatura. En el contacto positivo del arreglo, se soldó un diodo 1N4004 para evitar corrientes de retorno en caso de que la batería tenga una mayor diferencia de potencial que las celdas. Se utilizaron 8 celdas de 4x5 [cm], 2 de 2x4 [cm] y 2 más de 2x6 [cm] conectadas de la siguiente forma:

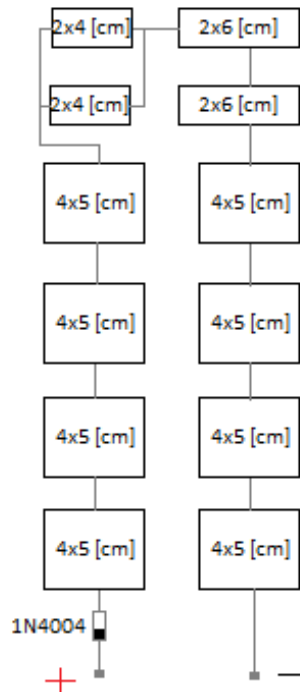


Figura 2.16 Diagrama de conexiones del panel solar

Para las terminales del panel se usaron conectores con atornillado doble para fijar firmemente las cargas de prueba.

Con el presente arreglo de celdas (figura 2.17) se espera obtener una diferencia de potencial de 5.5 [V] pero con el diodo conectado en una de las terminales, el voltaje en el panel sería de 4.8 [V] y con una corriente máxima de suministro esperada de 300 [mA]. Entonces, la potencia entregada por cada panel sería de 1.44 [W], pero con los dos conectados en paralelo se estima una potencia total de 2.88 [W]; potencia superior a la especificada en el diseño.

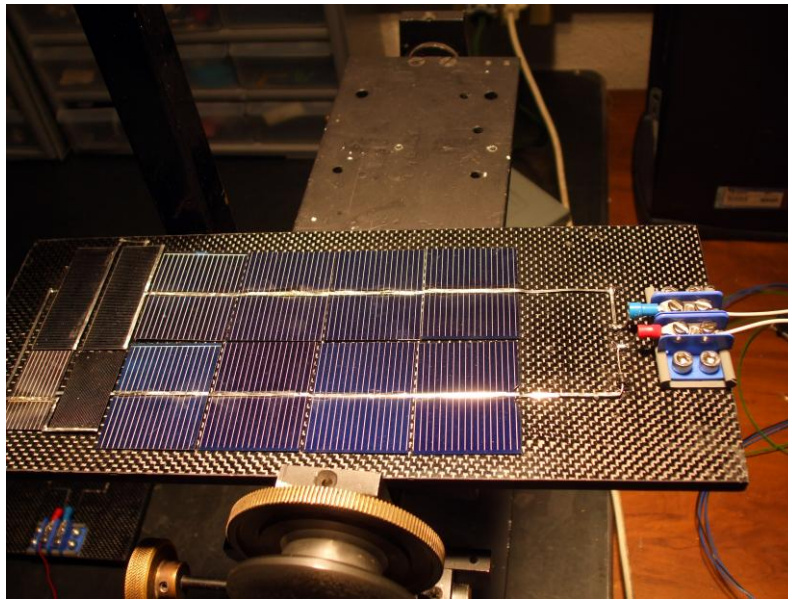


Figura 2.17 Fotografía de un panel solar en el banco de pruebas.

En el espacio, las celdas solares son la única fuente de energía y el éxito de la misión depende de manera sustancial de la potencia suministrada por los paneles.

Como en las misiones espaciales satelitales es impensable cualquier tipo de reparación o reemplazo, es indispensable que la elaboración de los paneles sea de la mejor calidad posible y su diseño permita tener una vida útil suficiente para operar adecuadamente durante el transcurso de la misión.

2.4.1. Adhesivos en un panel solar

Para que una celda solar logre operar un tiempo razonable en el espacio, de 10 a 15 años, es necesario añadir elementos que le ayuden a soportar las condiciones adversas que ahí se presentan. La manera en que se protege a la celda, afectando lo menos posible su eficiencia, es utilizando un cristal antirreflectante en la cara donde recibe la energía para operar junto con una base hecha de fibra de

carbono y aluminio. Lo más conveniente para unir las diferentes partes a la celda es utilizando adhesivo plástico.

A través del paso del tiempo, las propiedades de los adhesivos se han logrado adaptar a las exigentes condiciones en el espacio, a tal grado que hoy forman una parte fundamental en el proceso de construcción de celdas solares.

Normalmente el adhesivo es un silicón que se aplica en toda la cara de las partes que se quieren unir. Debe ser capaz de resistir el vacío, la alta radiación, el ciclado térmico (el silicón es sometido a pruebas en intervalos de temperatura mucho mayores que las que percibe en el propio espacio). Además, como el cambio de temperatura puede llegar a ser muy repentino, las piezas sólidas de la celda llegan a sufrir estrés termomecánico, por lo que el adhesivo ayuda en gran parte a disiparlo gracias a su elasticidad.

El silicón que se utiliza para unir la base con la celda requiere que su viscosidad sea baja, para poder ser aplicado en forma de una película delgada. La solución del adhesivo está compuesta por distintos hidrocarburos; contiene hidruro de silicio (SiH_4) así como la resina de silicona ^[17]. Una vez que el solvente se evapora las piezas quedan totalmente unidas.

Para unir el cristal antirreflectante a la celda es necesario que el adhesivo sea totalmente transparente, permeable a la radiación electromagnética, pero sin que se vea afectado por la misma. Es de vital importancia que el cristal y el adhesivo no presenten defecto alguno para asegurar la protección de la celda ante partículas, polvo y daños físicos.

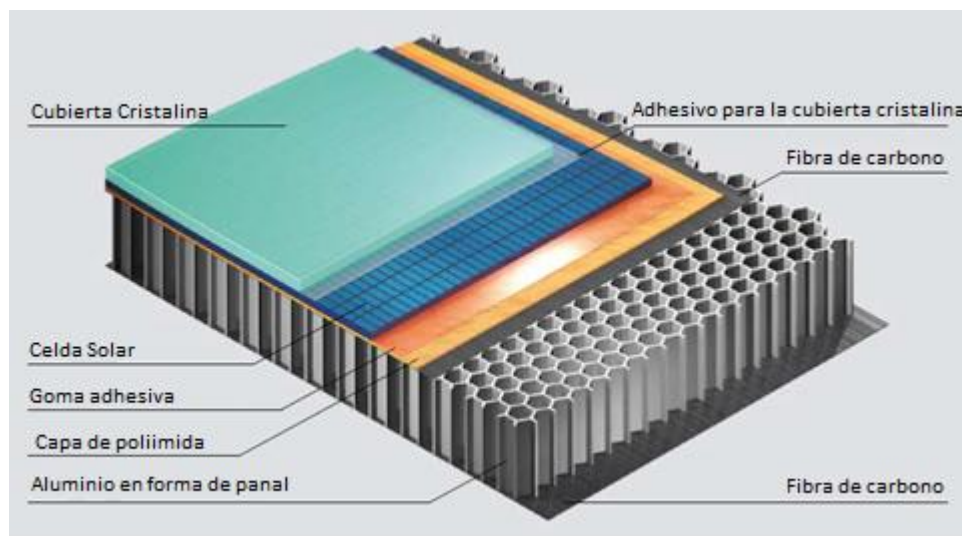


Figura 2.18 Vista de las diferentes capas que componen un panel solar de uso espacial

Para formar los paneles, la celda solar se monta en una base hecha de aluminio debido a su resistencia mecánica y bajo peso. Entre las celdas y la base de aluminio se adhieren láminas de kapton (poliimida) debido a que es un muy buen dieléctrico y su comportamiento en el espacio es bastante eficiente. Para unir las celdas a la base se utiliza un elastómero o silicón con alta rigidez dieléctrica, baja elasticidad y con la propiedad de poder ser removido para algún tipo de reparación o cambio. Sobre los paneles se adhieren las cubiertas cristalinas.

2.4.2. Cableado y soldadura

Ciertamente, la energía generada en las celdas solares necesita ser transmitida a los subsistemas del satélite para que pueda ser aprovechada. En la conexión interna de un panel solar se utiliza cable plano de cobre estañado con soldadura de estaño- plomo 60/40%.

En el espacio, la forma de conectar las celdas dentro de un panel es muy parecida a los paneles terrestres. No lo es así para la interconexión de los subsistemas en un satélite; en este caso el cable debe ser sometido a una serie de protecciones adicionales como se muestra en la figura 2.19.

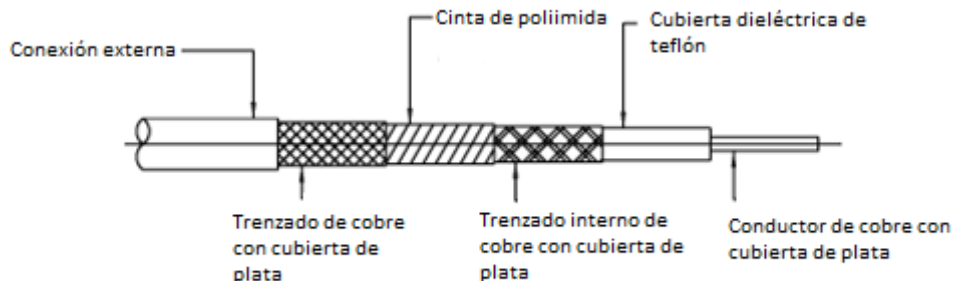


Figura 2.19 Diferentes capas que componen al cable ^[18]

El conductor de cobre, se recubre de un aislante de PTFE, es decir, politetrafluoroetileno, conocido como teflón. Después, se recubre el conductor y el aislante con una capa triple de enmallado de cobre, aluminio y cobre nuevamente. Esto con el objeto de formar un gran escudo contra las diferentes ondas electromagnéticas que se pueden encontrar en el espacio. Cabe mencionar que entre las capas se añade kapton para mantener unidos los diferentes materiales ^[18]. La forma de realizar las conexiones entre los módulos del dispositivo es mediante conectores coaxiales igualmente acondicionados para asegurar que lo que se transmita sea con la menor pérdida posible. Al momento de realizar las pruebas en los cables y conectores, la temperatura de operación debe ser entre los -20°C y 200°C ^[18]. Como bien se sabe, cuando un cable es utilizado para

transmitir potencia eléctrica, es susceptible a un aumento considerable de temperatura debido al efecto Joule.

Cuando se fabrica un panel solar es necesario conectar en serie un diodo para evitar un flujo de corriente en sentido inverso cuando alguna parte del mismo no se ilumina por el Sol. El diodo de paso es posible incluirlo dentro del material que protege a la celda para que la soldadura no sufra una degradación prematura.

2.4.3. Conexiones serie-paralelo

Las celdas solares se pueden combinar para formar la red que necesitamos y se pueden modelar como una fuente de corriente, es decir, para un cierto intervalo de diferencia de potencial, la corriente que suministre la celda será constante.

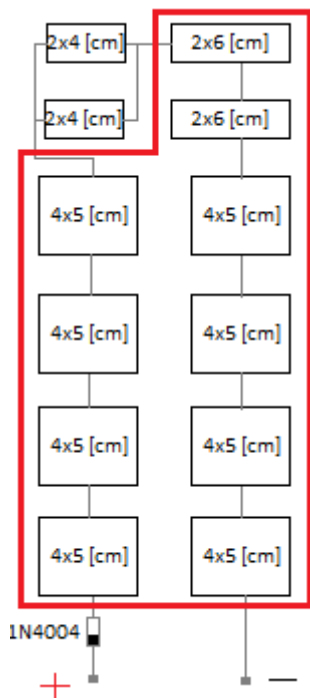


Figura 2.20 Conexión en paralelo en el panel

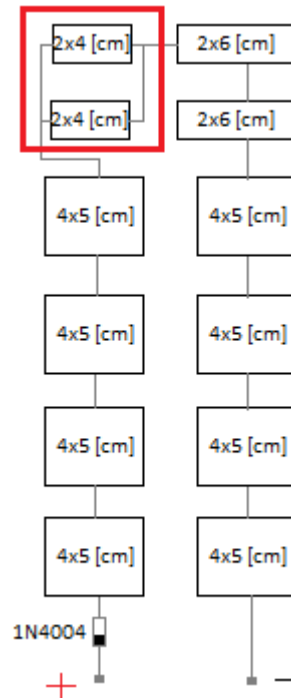


Figura 2.21 Conexión en serie en el panel

Para satisfacer la potencia requerida se interconectan las celdas en arreglos serie-paralelo. Si aumentamos la diferencia de potencial y la corriente, a su vez se incrementa la potencia que puede suministrar el arreglo, pero también se incrementa el área que ocupa, por lo que es crucial mantener un equilibrio entre la potencia y el área para asegurar el máximo beneficio en ambas partes.

2.4.4. Diodos de protección

La protección en los sistemas eléctricos y electrónicos es fundamental para asegurar un tiempo mayor de vida útil y en caso de alguna falla, no comprometa a algún otro sistema. Los diodos en los arreglos de paneles solares, nos sirven para evitar dañarlas por el mismo sistema al que se encuentran conectadas ^[20]. Cuando el arreglo de paneles fotovoltaicos se conecta a la batería, permiten recargarla; pero una vez que están a la sombra podría pensarse que ahora la batería se podría descargar suministrando la energía a los paneles. Si colocamos un diodo entre estos 2 elementos protegeremos a las celdas de ser energizadas por la batería, si esto llegara a suceder su vida útil se reduciría enormemente, además de que la batería no podría suministrar su energía adecuadamente. El diodo conectado entre el panel y la batería se le denomina diodo de bloqueo.

En la conexión en serie de los paneles, en ciertos arreglos, se conecta un diodo en paralelo en cada una de ellas conocido como diodo de bypass o desvío. Normalmente la corriente circulará de celda en celda sin pasar por los diodos pero cuando alguna de ellas se encuentre a la sombra o llegara a fallar, la resistencia aumentará considerablemente (en el caso de falla se considera como circuito abierto); en este caso la corriente podrá fluir a través del diodo de desvío minimizando en gran medida la pérdida de potencia que pudieran haber ocasionado tales eventos.

Para nuestro caso, se conectará un diodo de bloqueo en la terminal positiva de cada panel para evitar el flujo de corriente inversa.

Simuladores Solares y Pruebas de Eficiencia de Celdas Solares

3.1. Simuladores Solares

A pesar de que al Sol se le puede considerar, hasta cierto punto, como una fuente de emisión energética constante, no es así. Cuando se necesitan tomar mediciones donde la irradiancia es un parámetro fundamental, en algunos lugares será muy difícil encontrar varias veces las mismas condiciones atmosféricas para que la lectura de la irradiancia sea la misma. Con un simulador solar se eliminan muchas de las variables de las que depende la radiación solar, por lo que su uso es muy conveniente en el desarrollo de pruebas de paneles solares.

Un simulador solar se puede hacer de distintas maneras. Una de ellas es utilizar una lámpara incandescente que se asemeje al espectro de radiación del Sol. La irradiancia que emita nuestra fuente es posible variarla acercando o alejando el objeto a la lámpara y usando filtros ópticos.

3.2. Caracterización espectral del simulador solar utilizado

Con el objeto de llevar a cabo pruebas de funcionamiento de los paneles solares en el laboratorio, se utilizó una lámpara de halógeno. Para obtener el espectro de radiancia de la lámpara utilizada como simulador solar, en este trabajo de tesis, se realizaron diferentes mediciones en distintas ubicaciones, con el objeto de contar con una mayor precisión en la obtención del espectro de la misma. Se utilizó un espectro-radiómetro marca Ger 1500. Este instrumento cuenta con un intervalo que va de los 350 a los 1050 [nm] y para la detección de las distintas longitudes de onda, utiliza un arreglo lineal de fotodiodos en conjunto con un sistema de digitalización de 16 bits. El espectro-radiómetro, para su calibración, mide el espectro de una placa patrón de color blanco, la cual refleja la energía de la fuente luminosa que se quiere caracterizar.



Figura 3.1 Espectroradiómetro Ger 1500

El simulador solar a caracterizar es una lámpara de halógeno marca General Electric tipo CYX de 2000 [W] de potencia, colocada sobre un banco metálico con una base montada a 80 [cm] de la lámpara para realizar las pruebas.



Figura 3.2 Lámpara General Electric tipo CYX

En esta prueba, el instrumento se montó en un tripié, mientras que la placa reflectora se colocó sobre una base móvil que forma parte de la estructura que sostiene a la lámpara. Este acomodo se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 Montaje del instrumento y de la placa reflectora

Elegida la primera ubicación, las mediciones se realizaron de la siguiente manera: primero se hacen 5 tomas de muestra del ruido del medio ambiente y posteriormente se realizan 5 tomas, pero ahora con la lámpara encendida. Después, el tripié se mueve en un ángulo de 45° en torno a la placa reflectante y se realizan las mismas mediciones. Se efectúa este procedimiento un total de 4 veces. El espectro de radiancia de la lámpara en cada ubicación, se obtiene al calcular la media de cada conjunto de mediciones, ya sea de ruido ambiental o de la lámpara.

Una ventaja de este instrumento es que los datos los guarda en formato ASCII por lo que pueden ser abiertos por una gran cantidad de programas. Para nuestro fin los datos se procesaron en Microsoft Excel 2007, por lo que es posible también elaborar las gráficas de los espectros correspondientes.

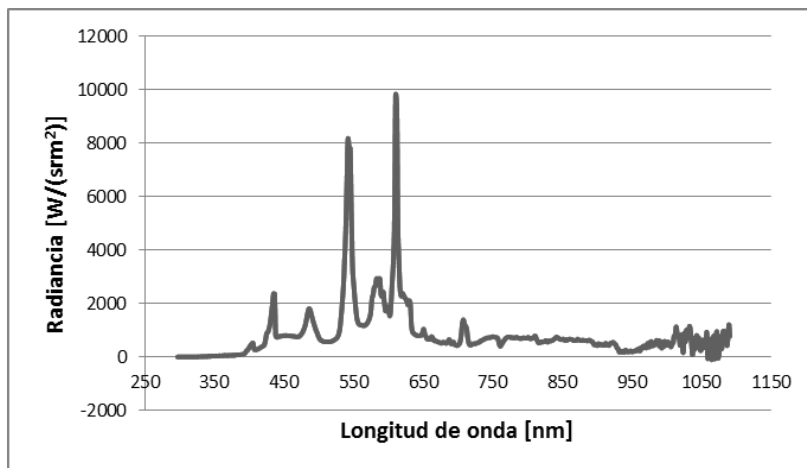


Figura 3.4 Ubicación 1: Ruido ambiental

La figura 3.4 representa la media de las mediciones hechas en la primera ubicación del ruido ambiental. En ella se observa que hay 2 picos que sobresalen de todo el espectro. Éstas corresponden a las longitudes de onda de una lámpara fluorescente.

En la figura 3.5 se muestra la gráfica del espectro correspondiente al simulador solar. Comienza a emitir en el rango donde se encuentra el ultravioleta y a medida que nos vamos acercando a la longitud de onda perteneciente al infrarrojo la magnitud crece considerablemente y se mantiene así hasta los 1100 [nm]. Con lo anterior se puede decir que gran parte de la energía emitida por la lámpara está en el infrarrojo térmico.

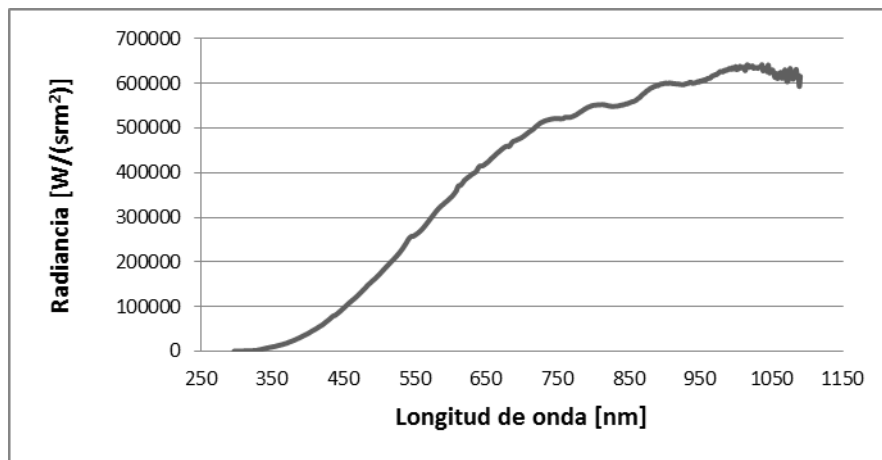


Figura 3.5 Ubicación 1: Simulador Solar

La magnitud del espectro del ruido comparada con la de la lámpara es mucho menor por lo que su presencia es poco significativa para ser tomada en cuenta en la caracterización del simulador solar. En las demás ubicaciones el comportamiento es similar en cuanto a la forma del espectro, tanto del ruido ambiental, como de la lámpara. Esto se muestra en las dos figuras siguientes.

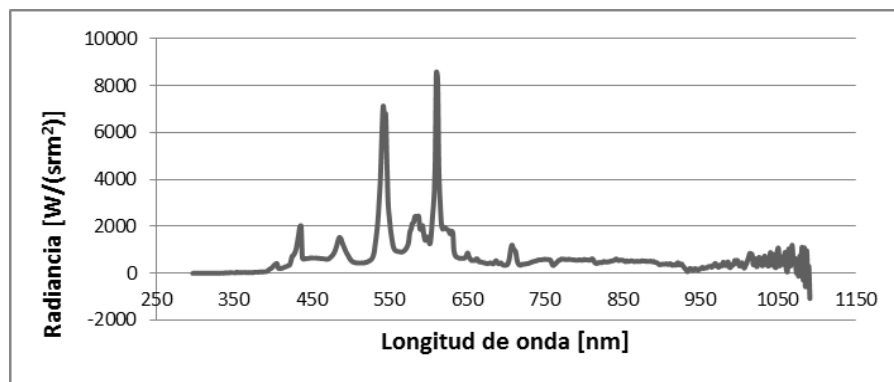


Figura 3.6 Ruido en las demás ubicaciones del espectroradiómetro

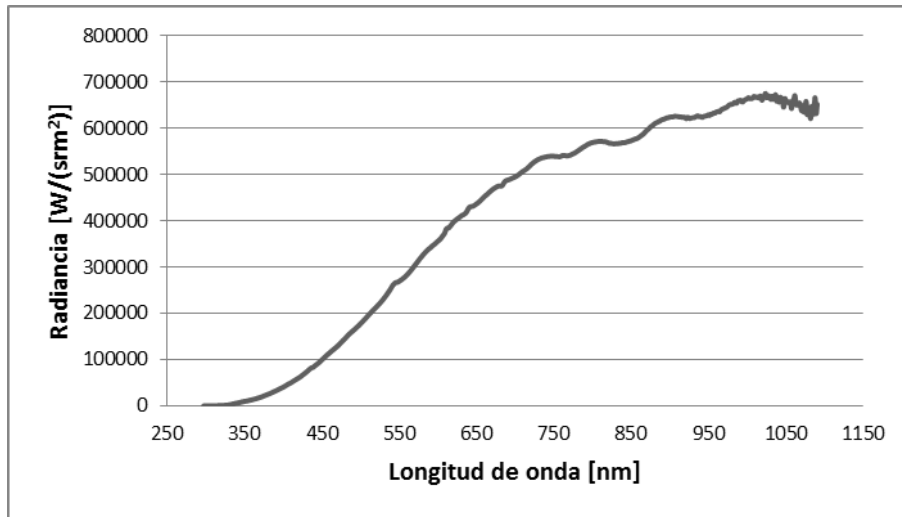


Figura 3.7 Espectro de la lámpara solar en las demás ubicaciones

Los simuladores solares que existen en el mercado cuentan con una amplia variedad de aplicaciones. Se pueden utilizar tanto para pruebas de laboratorio (como lo es en nuestro caso) o en líneas de producción para control de calidad y/o calibración de dispositivos sensibles a la luz.

El simulador solar X-25 Mark II de Spectrolab^[21] utiliza un foco de xenón de 3[kW]. Por su amplia gama de aplicaciones, es necesario adaptar el instrumento para cada tipo de prueba. Es posible intercambiar el foco de xenón por uno más potente, se puede variar la distancia entre la base y la fuente luminosa, el ángulo de incidencia así como la irradiancia, la cual se modifica utilizando filtros luminosos, para que sea semejante a la existente en el espacio o en la atmósfera.

El espectro del simulador solar X-25 se puede observar en la figura 3.8.

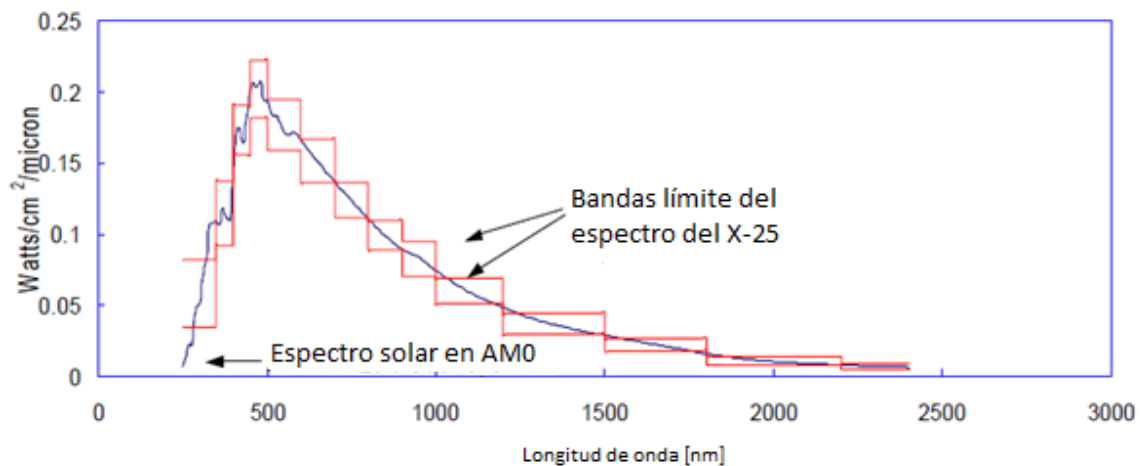


Figura 3.8 Características espectrales del simulador solar X-25^[21]

3.2.1 Respuesta espectral de Sol

Nuestro Sol, una estrella de más de 4,500 millones de años, es la más próxima a la Tierra. Cuenta con un radio de unos 700,000 [km] y una masa de 2×10^{30} [kg], esto es 330,000 veces la masa de la Tierra ^[10].

La fuente de energía de esta estrella se encuentra en su núcleo. Ahí existe una presión extrema donde ocurren reacciones nucleares de fusión. Cuatro átomos de hidrógeno se fusionan para formar uno de helio, pero la masa de este último es 0.7 veces la masa de los cuatro átomos de hidrógeno. Gracias a la relación existente entre la masa y la energía descubierta por Albert Einstein, se sabe que la masa restante de esta reacción nuclear se convierte en energía.

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

Donde:

E = energía [kg m²/s²] = [N·m] = [J]

m = masa [kg]

c = velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 [m/s])

Parte de esta energía liberada por el Sol llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética aproximadamente 8 minutos y 19 segundos después de viajar casi 150 millones de kilómetros por el espacio vacío.

Cuando llega a la parte alta de la atmósfera lo hace en forma de radiaciones de distintos tipos tales como la ultravioleta, en luz visible y el infrarrojo. Éstas forman el espectro solar que se puede observar en la figura 3.9.

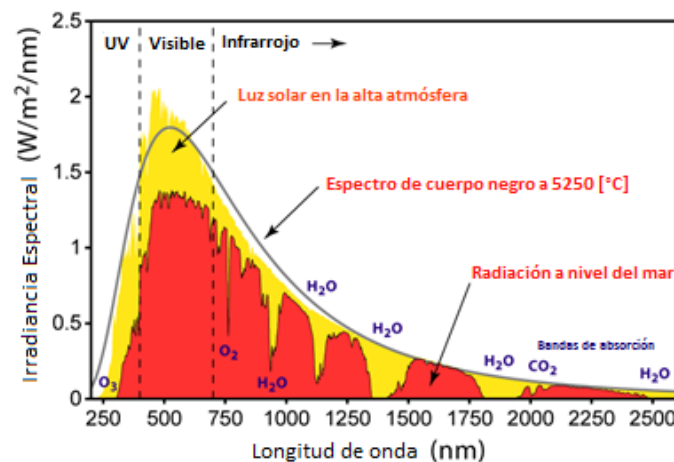


Figura 3.9 Espectro de radiación solar ^[30]

La potencia solar incidente en esa zona es de 1250 [W/m²]. Cuando nos encontramos a nivel del mar, una fracción de esta energía es absorbida por las partículas suspendidas en la atmósfera como vapor de agua, ozono y CO₂. Entonces, la potencia total incidente en un día soleado es de 1000 [W/m²]. Se puede apreciar que la atmósfera absorbe alrededor de un 25% de la energía proveniente del Sol protegiéndonos de radiaciones excesivas de rayos UV y de ciertas regiones en el infrarrojo.

La otra curva existente en la figura anterior es acerca de la emisión ideal de un cuerpo negro a esa temperatura.

Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe totalmente la energía que pueda incidir sobre el mismo. Y por el contrario, también emite energía de manera ideal a través de la ley de Planck mostrada en la siguiente ecuación:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (3.2)$$

Se puede observar que la intensidad de radiación emitida por el cuerpo negro es dependiente de la temperatura y de la frecuencia de la energía electromagnética liberada.

Por otro lado, con el espectro- radiómetro GER- 1500 se obtuvo una aproximación al espectro del Sol.

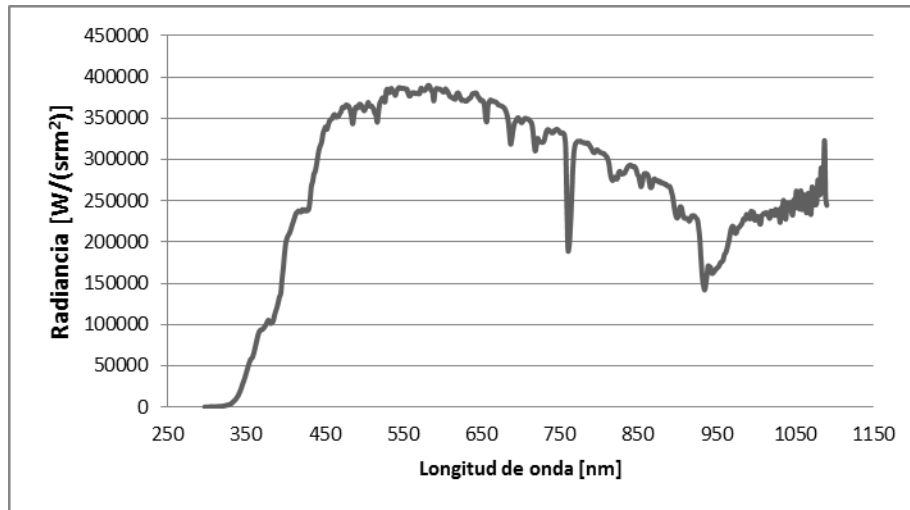


Figura 3.10 Espectro SOLar

Es posible observar que el espectro que se muestra en la figura anterior, guarda una gran semejanza con la figura 3.9, de manera que podemos confirmar que el

espectro solar en la Tierra se ve afectado cuando la radiación electromagnética incide sobre la atmósfera.

3.2.2 Respuesta espectral de las celdas de silicio

Un parámetro fundamental para entender la eficiencia en una celda solar es la respuesta espectral. Ésta se define como la razón que hay entre la corriente de circuito corto y la potencia incidente en función de la longitud de onda λ [A/W]^[22].

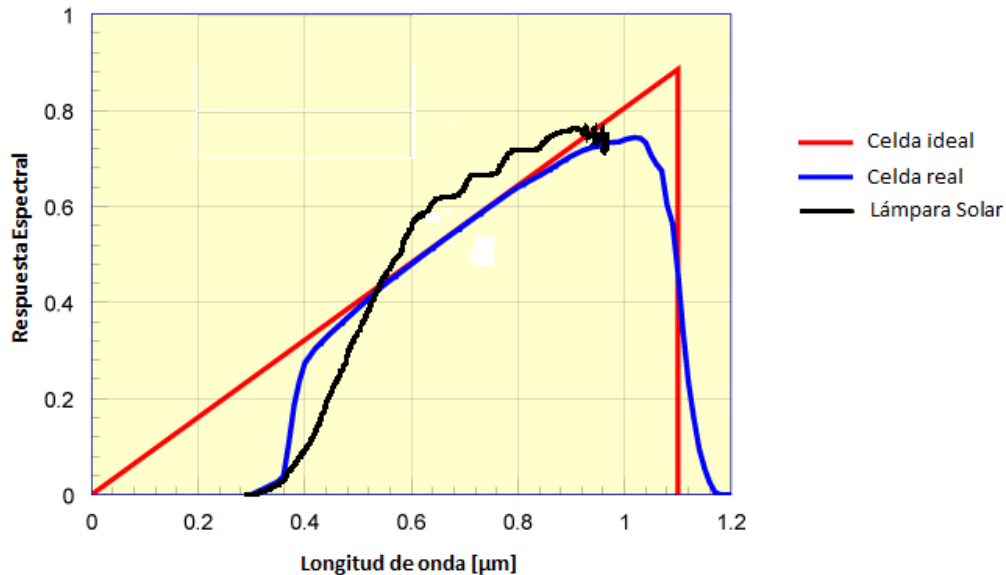


Figura 3.11 Respuesta espectral del silicio

La respuesta ideal es meramente teórica debido a que no es posible crear una celda perfecta donde todos los enlaces estén completos, donde quede libre de toda impureza posible y que en el espacio exterior no cuente con un recubrimiento cristalino.

Podría pensarse que la respuesta espectral del material fuese más bien de forma rectangular y no como se encuentra en la figura anterior. Esto se debe a que la absorción de energía en la celda no es uniforme; entre mayor energía contenga un fotón, éste se absorberá más cerca de la superficie y por tanto, un número menor de portadores serán capaces de conducir.

Entonces, si nos encontramos por debajo de longitudes de onda de 400 [nm] es posible despreciar la energía absorbida por los electrones. Y para longitudes de onda mayores, ésta será absorbida por la celda. El límite inferior en el espectro ($\lambda = 1.109 [\mu\text{m}]$) está determinado por la energía necesaria para hacer que un electrón pase de la banda de valencia a la de conducción (1.12 [eV]). Si la energía

que porta un fotón es menor, el electrón no participará en el proceso de conducción, en cambio, incrementará su temperatura reduciendo así la eficiencia de la celda.

El espectro de la lámpara solar, hasta donde el instrumento nos permite observar, se encuentra en el rango de la respuesta de una celda de silicio por lo que es posible realizar las pruebas necesarias para caracterizarla. Cabe mencionar que su espectro se encuentra más allá de 1.2 [μm], lo que se nota fácilmente, debido a que emite una gran cantidad de calor cuando se encuentra encendida. En un principio no existe una variación apreciable, pero después de unos momentos las celdas comienzan a calentarse.

3.3. Determinación de la eficiencia de las celdas solares

Ciertamente un factor dominante en el diseño de un panel solar es la eficiencia de las celdas a utilizar. Existen diversos tipos de eficiencia en una celda y a la que nos referiremos en este caso será la de conversión. Ésta se entiende como la energía eléctrica que entrega dicha celda entre la cantidad de energía lumínica incidente en la misma, por unidad de tiempo. Es decir, la eficiencia de conversión cociente de la potencia eléctrica entregada entre la potencia lumínica incidente ^[19].

$$(3.3) \quad \eta = \frac{P_S}{P_E} \times 100$$

Las potencias en un panel solar, tanto la incidente como la suministrada, dependen directamente del área involucrada, por lo que las medimos en [W/m^2]. La potencia proveniente del Sol, también denominada irradiancia, es aproximadamente 1000 [W/m^2] a nivel del mar en un día despejado. En el espacio, al no interferir la atmósfera, la irradiancia es de 1250 [W/m^2]. Es de esperar que una celda solar en el espacio suministre una mayor potencia que en Tierra pero no quiere decir que la celda sea más eficiente en ese ambiente, debido a que está involucrada la temperatura.

Para nuestro caso, la potencia lumínica incidente provino del simulador solar. Mediante un medidor de irradiancia se pudo determinar que la potencia entregada por la lámpara fue de 1250 [W/m^2] a la altura donde está colocada la base para pruebas (80 [cm]). Esta medida resultó adecuada para determinar la eficiencia, porque se obtienen condiciones similares a las del espacio.

Como se había mencionado anteriormente, el comportamiento de una celda solar es similar a la de una fuente de corriente, es decir, sin importar la resistencia del circuito conectado a la fuente, ésta será capaz de suministrar un flujo constante de corriente. Entonces, si conectamos una resistencia variable a una celda solar, tendremos el mismo efecto, pero claramente existe un límite. Aún así la potencia que se desea que entregue una celda será la máxima posible. Para este propósito, existe un módulo dedicado únicamente a obtener la máxima potencia de un panel solar, variando continuamente una resistencia.

Para determinar la eficiencia de una celda solar primero se debe obtener su curva característica la cual describe completamente cualquier tipo de celda, ya que revela en gran medida su capacidad de suministro de energía.

La curva característica se muestra en una gráfica de corriente vs voltaje en su zona de interés y nos muestra 4 parámetros fundamentales en una celda:

- *El voltaje en circuito abierto (V_{oc})*
- *La corriente en corto circuito (I_{sc})*
- *La potencia máxima*
- *La eficiencia*

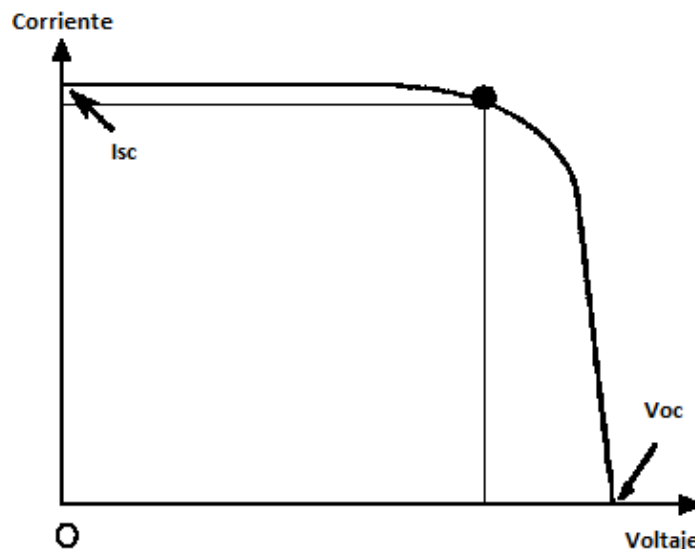


Figura 3.12 Curva característica de una celda solar.

Si medimos el voltaje y la corriente en los extremos de la curva, es decir, se mide la diferencia de potencial en la celda sin que se le conecte algún componente a ésta y la corriente se mide conectada consigo misma obtendremos los 2 primeros

parámetros arriba listados: Voc e Isc, por sus siglas en inglés; open circuit voltage y short circuit current respectivamente. De forma gráfica, estos puntos representan la intersección entre los ejes coordenados, y como resultado la eficiencia es 0 en ambos casos.

El voltaje en circuito abierto en una celda solar iluminada es de 0.5 [V] debido a que en su modelo hay un diodo conectado en paralelo a las terminales de ésta. Por tanto, la diferencia de potencial a la salida será la que se presente en el diodo.

La zona intermedia en la curva característica es la de interés, ya que es en donde se puede determinar la potencia que entrega en cada punto de la curva. Conforme avanzamos en la gráfica, la potencia irá aumentando hasta llegar a un punto máximo, correspondiente al tercer parámetro (potencia máxima), y luego comenzará a decaer hasta llegar nuevamente a 0. En términos de eficiencia, el comportamiento de ésta es proporcional a la potencia suministrada en la celda.

Ya se había mencionado antes que la manera de determinar la eficiencia en una celda solar es mediante el uso de una resistencia variable conectada a la misma. Se comienza con un valor muy bajo y se mide ya sea la corriente, el voltaje o ambas en ese punto. Acto seguido se aumenta un poco la resistencia y se vuelven a realizar las mediciones correspondientes. Se puede seguir este procedimiento hasta que las mediciones arrojen valores tales que la potencia sea casi despreciable o que ya no se encuentre en la zona de interés deseada.

La resistencia variable puede ser de 3 tipos: un trimpot, un potenciómetro y un preset. Se eligió utilizar un trimpot de 200 [Ω] porque de los tres tipos de resistencia variable éste es el de mayor resolución. Cabe mencionar que la mínima resistencia ajustable era de 4 [Ω].

Como se mencionó en el capítulo 2, se disponen de distintos tipos de celdas solares. Éstas se clasifican en 3 grupos según su tamaño: el primer grupo corresponde a las celdas de 2x6 [cm], las del segundo grupo son de 2x4 [cm] y las del último son de 4x5.15 [cm], pero con una superficie efectiva de 4x5 [cm].

Es necesario calcular la potencia utilizando la siguiente ecuación:

$$P_E = \frac{(\text{área de la celda} [m^2]) (1250 [W])}{1m^2} \quad (3.4)$$

La potencia suministrada es la que se debe obtener en cada medición para calcular la eficiencia.

Se comenzó por conectar una celda solar en serie con el trimpot y se eligió medir el voltaje utilizando un multímetro digital. La primera medición realizada con el trimpot ajustado a un valor de $4 \text{ } [\Omega]$ arrojaba valores de magnitudes aparentemente incoherentes. La potencia obtenida era casi despreciable (alrededor de 20 [mW]) al igual que la eficiencia. Por más variaciones en el trimpot, inclusive conectando resistencias de valor fijo, las mediciones siempre arrojaban valores cuya potencia y eficiencia seguían sin dar un resultado confiable.

A pesar de que se realizaron mediciones de igual tipo con distintas celdas solares, se seguía sin obtener algún resultado que no estuviera en las mismas circunstancias. Entonces, volviendo con las celdas del primer grupo, se conectaron 2 de ellas en serie junto con el trimpot y se notó que la potencia aumentó considerablemente hasta los $80 \text{ [mW]} @ 4[\Omega]$, por lo que inmediatamente se conectó una tercera celda al arreglo y la potencia se volvió a incrementar hasta llegar a más de 300 [mW] con la misma resistencia. Esta potencia aún era bastante insuficiente como para que la eficiencia pudiera ser tomada en cuenta, pero se iba comenzando a hacer evidente el fenómeno que se estaba presentando.

Cuando se intentaba caracterizar una celda de cualquier grupo utilizando solamente una de ellas y comenzando a medir la diferencia de potencial con una resistencia de $4 \text{ } [\Omega]$, el punto de la curva donde nos encontrábamos estaba muy alejado de la potencia máxima de suministro. Si hubiéramos querido obtenerla en esas mismas condiciones hubiéramos necesitado resistencias con valores de fracciones de ohms, con una tolerancia mínima para lograrlo.

Entonces, el aumento considerable de la potencia suministrada cuando se conectan 2 o más celdas en serie, se debe a que entre más celdas se agreguen al arreglo ya existente, tanto los valores de resistencia así como el rango para formar la curva característica del conjunto, son bastante mayores. Cuando se conectaron 4 celdas del primer grupo en serie con el trimpot la potencia era cercana a 500 [mW] y conforme iba aumentando el valor de la resistencia la potencia disminuía nuevamente. Como se deseaba obtener la curva con valores tanto menores como mayores que el punto de máxima potencia, el trimpot dejaba de ser una opción viable.

Otra manera de obtener la curva es a través del uso de resistencias de valor fijo. Claramente tienen la desventaja de que se necesitaría un número considerable de éstas para aproximarse a la curva verdadera, pero sería factible alcanzar un intervalo de valores que con el trimpot sería imposible.

La forma en cómo se planteó el experimento para determinar la eficiencia de las celdas solares, consistió en medir el voltaje en cada grupo de celdas conectando una resistencia a la vez del valor mínimo al máximo. Con base en el voltaje medido, es posible obtener la potencia y al mismo tiempo la eficiencia.

Debido a que para cada medición era necesario prender y apagar la lámpara para mantener en la medida de lo posible una temperatura constante en las celdas solares, se eligieron 10 valores de resistencia, para evitar prenderla y apagarla un número excesivo de veces y realizar las mediciones con 4 celdas conectadas en serie. Si se conectaban más, el espacio en la base de la lámpara era insuficiente y las resistencias a utilizar no soportarían potencias mayores a 500 [mW]. Con base en las pruebas anteriores se fijó un rango entre 1 y 15 [Ω] como zona de interés, además de que en éste se encontraría el punto de máxima potencia.

Entonces, una vez establecido el intervalo de resistencia a utilizar, se procedió a realizar la medición de voltaje, conectando una a la vez para cada grupo de 4 celdas. Las mediciones se repitieron 3 veces, tanto a temperatura ambiente (22 °C), como a la máxima temperatura alcanzada por la exposición prolongada de la lámpara (66 °C). Con esto también se verifica que la temperatura es un parámetro fundamental que se debe tomar en cuenta para la determinación de la eficiencia. En las siguientes tablas se muestra el promedio de cada conjunto de mediciones realizadas a cada grupo de celdas, para cada valor de resistencia previamente medido, con el fin de calcular su eficiencia:

Tabla 3.1: Grupo 1: celdas de 2x6 [cm] con una temperatura promedio de 20.66 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.379	0.422	0.160	2.665
2.4	1.073	0.447	0.480	8.000
2.9	1.220	0.421	0.513	8.549
3.5	1.356	0.387	0.525	8.756
4.1	1.459	0.356	0.519	8.649
4.7	1.558	0.331	0.516	8.604
5.5	1.672	0.304	0.508	8.475
8.4	1.919	0.228	0.438	7.304
10.1	1.982	0.196	0.389	6.480
15.2	2.141	0.141	0.302	5.028

Tabla 3.2: Grupo 1: celdas de 2x6 [cm] con una temperatura promedio de 61.33 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.350	0.389	0.136	2.265
2.4	0.911	0.380	0.346	5.768
2.9	1.036	0.357	0.370	6.164
3.5	1.129	0.323	0.364	6.070
4.1	1.204	0.294	0.353	5.889
4.7	1.310	0.279	0.365	6.082
5.5	1.384	0.252	0.348	5.807
8.4	1.594	0.190	0.303	5.043
10.1	1.625	0.161	0.261	4.356
15.2	1.742	0.115	0.200	3.329

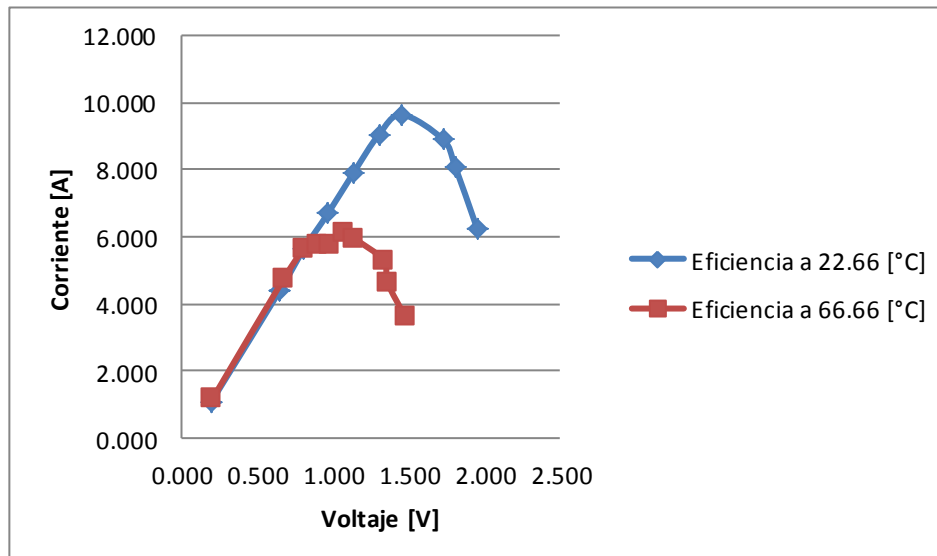


Figura 3.13 Eficiencia de celdas del grupo 1

Tabla 3.3: Grupo 2: celdas de 2x4 [cm] con una temperatura promedio de 22.66 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.194	0.215	0.042	1.041
2.4	0.649	0.270	0.175	4.383
2.9	0.808	0.279	0.225	5.623
3.5	0.969	0.277	0.268	6.702
4.1	1.141	0.278	0.318	7.938
4.7	1.304	0.278	0.362	9.049
5.5	1.457	0.265	0.386	9.649
8.4	1.730	0.206	0.356	8.907
10.1	1.809	0.179	0.324	8.103
15.2	1.953	0.128	0.251	6.271

Tabla 3.4: Grupo: 2: celdas de 2x4 [cm] con una temperatura promedio de 66.66 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.204	0.226	0.046	1.152
2.4	0.674	0.281	0.189	4.732
2.9	0.809	0.279	0.225	5.637
3.5	0.899	0.257	0.231	5.777
4.1	0.975	0.238	0.232	5.793
4.7	1.073	0.228	0.245	6.124
5.5	1.144	0.208	0.238	5.945
8.4	1.335	0.159	0.212	5.304
10.1	1.365	0.135	0.184	4.610
15.2	1.480	0.097	0.144	3.604

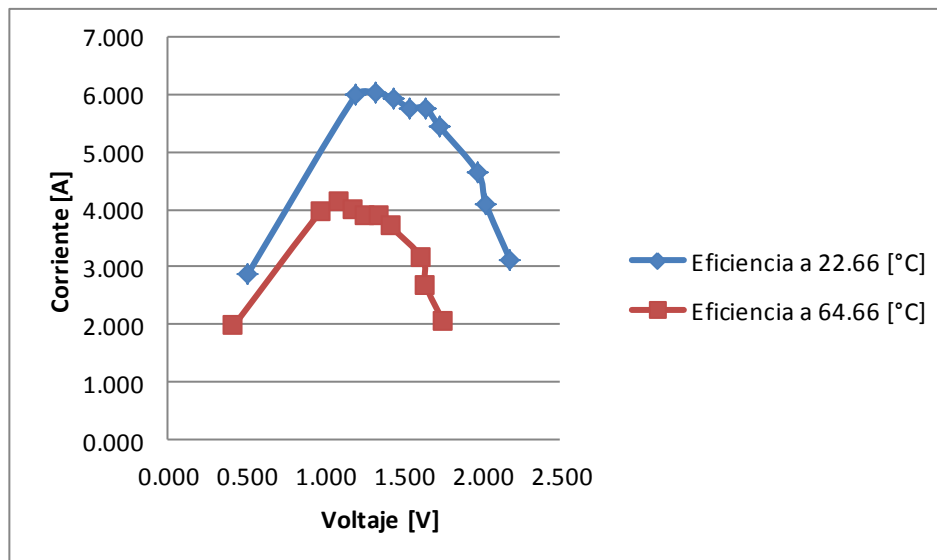


Figura 3.14 Eficiencia de celdas del grupo 2

Tabla 3.5: Grupo: 3: celdas de 4x5 [cm] con una temperatura promedio de 22.66 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.508	0.564	0.287	2.867
2.4	1.199	0.500	0.599	5.990
2.9	1.322	0.456	0.603	6.030
3.5	1.442	0.412	0.594	5.938
4.1	1.539	0.375	0.577	5.774
4.7	1.646	0.350	0.577	5.767
5.5	1.732	0.315	0.545	5.452
8.4	1.977	0.235	0.465	4.653
10.1	2.031	0.201	0.409	4.085
15.2	2.182	0.144	0.313	3.133

Tabla 3.6: Grupo: 3: celdas de 4x5 [cm] con una temperatura promedio de 64.66 [°C]

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
0.9	0.422	0.469	0.198	1.982
2.4	0.975	0.406	0.396	3.964
2.9	1.092	0.377	0.411	4.114
3.5	1.184	0.338	0.400	4.003
4.1	1.264	0.308	0.390	3.899
4.7	1.353	0.288	0.390	3.897
5.5	1.426	0.259	0.370	3.696
8.4	1.625	0.193	0.314	3.144
10.1	1.646	0.163	0.268	2.682
15.2	1.759	0.116	0.204	2.036

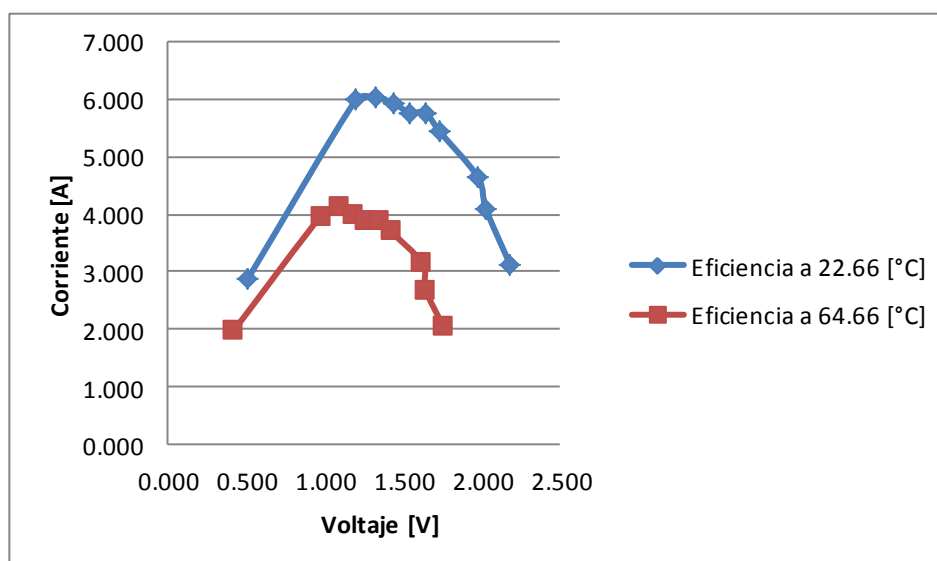


Figura 3.15 Eficiencia de celdas del grupo 3

Como es posible observar, es claro que la eficiencia varía en función del voltaje existente en la celda, así como de la corriente que fluye por la misma, por lo que se busca que siempre opere a la máxima eficiencia posible. Esto se logra con el módulo conectado entre el panel solar y el banco de baterías denominado “MPPT” que por sus siglas en inglés significa Maximum Power Point Tracking o rastreo del punto de máxima potencia.

Sin duda la temperatura juega un papel fundamental en la eficiencia de las celdas. Con una diferencia de 40 [°C] es posible notar un descenso de alrededor del 20% en todos los casos. Cabe mencionar que las celdas de 2x6 [cm], al tener un recubrimiento cristalino, refleja una parte de la radiación infrarroja emitida por la lámpara haciendo que la temperatura sea un poco más baja que las celdas que no cuentan con esta capa. Para periodos mucho más prolongados, la diferencia de

temperaturas es aún mayor, por lo que la eficiencia en las celdas con el recubrimiento es significativamente mayor, además de que las protege de los rayos cósmicos como ya se había comentado anteriormente.

Es de suma importancia tomar en cuenta este parámetro, en el diseño de los paneles solares de un satélite, para asegurar el suministro de potencia adecuado que permita cumplir con la misión, considerando los periodos de iluminación y de eclipse.

Integración de Componentes y Pruebas de Funcionamiento

El sistema de potencia de un satélite se compone de los módulos básicos de generación, regulación, almacenamiento y distribución de energía necesaria para los demás subsistemas.

Se debe diseñar un sistema de potencia autónomo, capaz de tomar decisiones por sí solo o por comandos enviados desde Tierra, para que en caso de alguna anomalía sea posible mantener su operación en el espacio exterior. Es necesario entonces contar con sensores de temperatura, voltaje y corriente en este subsistema para poder enviar esta información a un circuito de control y regulación.

4.1. Pruebas de eficiencia de los paneles solares

4.1.1. Con el simulador solar

Una vez que se tiene el panel armado y listo, es necesario extraer su curva característica para observar el comportamiento de todas las celdas conectadas en conjunto. Cada punto de la curva se obtuvo con un valor específico de resistencia comenzando con 4 $[\Omega]$ hasta llegar a 22 $[\Omega]$, tomando lecturas de voltaje cada 2 $[\Omega]$ a temperatura ambiente. Para esta prueba se utilizó un trimpot de 200 $[\Omega]$ conectado como carga al panel. Esta prueba se realizó un total de 3 veces en cada panel con el fin de verificar que las lecturas obtenidas sean coherentes entre sí y no exista una variación significativa entre ellas.

En las siguientes tablas se muestran las mediciones de voltaje, para cada valor de resistencia preseleccionado, para poder calcular la eficiencia:

Tabla 4.1 Panel 1 a una temperatura promedio de 23.33 °C

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
4	0.526	0.132	0.069	0.277
6	1.269	0.211	0.268	1.073
8	1.965	0.246	0.483	1.931
10	2.729	0.273	0.745	2.978
12	3.472	0.289	1.005	4.018
14	3.867	0.276	1.068	4.273
16	4.007	0.250	1.003	4.013
18	4.187	0.233	0.974	3.895
20	4.267	0.213	0.910	3.641
22	4.353	0.198	0.861	3.446

Tabla 4.2 Panel 2 a una temperatura promedio de 24 °C

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
4	0.561	0.140	0.079	0.315
6	1.185	0.198	0.234	0.936
8	2.035	0.254	0.518	2.071
10	2.817	0.282	0.793	3.173
12	3.660	0.305	1.116	4.465
14	4.247	0.303	1.288	5.153
16	4.527	0.283	1.281	5.123
18	4.717	0.262	1.236	4.944
20	4.850	0.243	1.176	4.705
22	4.920	0.224	1.100	4.401

Tabla 4.3 Paneles conectados en paralelo a una temperatura promedio de 23.33 °C

Resistencia [Ω]	Voltaje Promedio [V]	Corriente Promedio [I]	Potencia Promedio [W]	Eficiencia promedio [%]
4	0.991	0.248	0.246	0.491
6	2.446	0.408	0.997	1.994
8	2.881	0.360	1.037	2.075
10	3.768	0.377	1.420	2.840
12	4.247	0.354	1.503	3.006
14	4.467	0.319	1.425	2.850
16	4.720	0.295	1.392	2.785
18	4.843	0.269	1.303	2.606
20	4.910	0.246	1.205	2.411
22	4.973	0.226	1.124	2.249

De manera gráfica se muestra para cada prueba realizada la curva de eficiencia en función del voltaje medido:

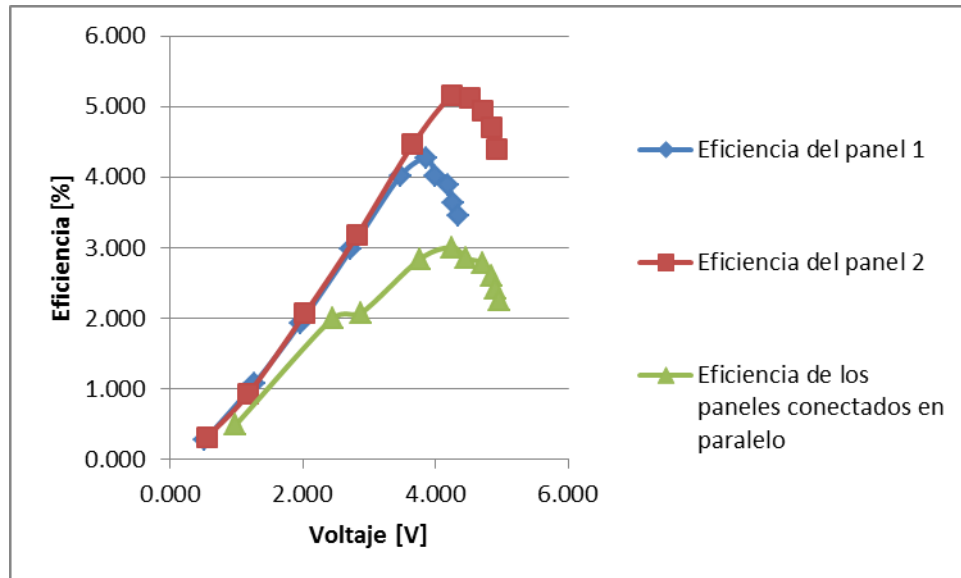


Figura 4.1 Eficiencia de los paneles con el simulador solar

Dentro de las pruebas que se realizaron para caracterizar a los paneles solares, se incluyó una donde se pudiera determinar la eficiencia en función de la temperatura. La carga elegida fue de 12 [Ω] debido a que es el valor con el que se alcanzó la mayor eficiencia en todas las lecturas registradas. La prueba consistió en medir en uno de los paneles, con intervalos de 5 segundos, la diferencia de potencial en la carga, comenzando a temperatura ambiente y finalizando una vez que el panel alcanza una temperatura de 100 [$^{\circ}\text{C}$]. Esto se repitió un total de 3 veces para verificar que el comportamiento de las celdas fuera consistente.

En la siguiente tabla se muestran los datos correspondientes a la diferencia de potencial medida, la temperatura a la que se registró, así como la eficiencia para cada una de las 3 pruebas realizadas.

Tabla 4.4 Eficiencia del Panel vs Tiempo y Temperatura vs Tiempo

Tiempo[s]	Lectura 1			Lectura 2			Lectura 3		
	Voltaje [V]	Temperatura [°C]	Eficiencia [%]	Voltaje [V]	Temperatura [°C]	Eficiencia [%]	Voltaje [V]	Temperatura [°C]	Eficiencia [%]
0	4.44	25	3.29	4.46	26	3.32	4.5	26	3.38
5	4.19	35	2.93	4.28	32	3.05	4.24	34	3.00
10	4.06	46	2.75	4.08	44	2.77	4.09	40	2.79
15	3.98	54	2.64	4	52	2.67	3.99	51	2.65
20	3.92	61	2.56	3.92	59	2.56	3.92	54	2.56
25	3.85	66	2.47	3.86	64	2.48	3.85	58	2.47
30	3.79	72	2.39	3.8	69	2.41	3.79	64	2.39
35	3.75	77	2.34	3.74	75	2.33	3.74	74	2.33
40	3.7	80	2.28	3.7	79	2.28	3.7	82	2.28
45	3.66	82	2.23	3.65	82	2.22	3.65	83	2.22
50	3.61	84	2.17	3.6	84	2.16	3.61	85	2.17
55	3.56	87	2.11	3.57	87	2.12	3.58	90	2.14
60	3.54	90	2.09	3.53	90	2.08	3.56	93	2.11
65	3.5	91	2.04	3.5	94	2.04	3.51	96	2.05
70	3.46	92	2.00	3.45	98	1.98	3.46	99	2.00
75	3.45	93	1.98						
80	3.42	94	1.95						
85	3.37	95	1.89						
90	3.35	99	1.87						

En las siguientes gráficas es posible apreciar el cambio de la eficiencia con respecto al tiempo a medida que aumenta la temperatura:

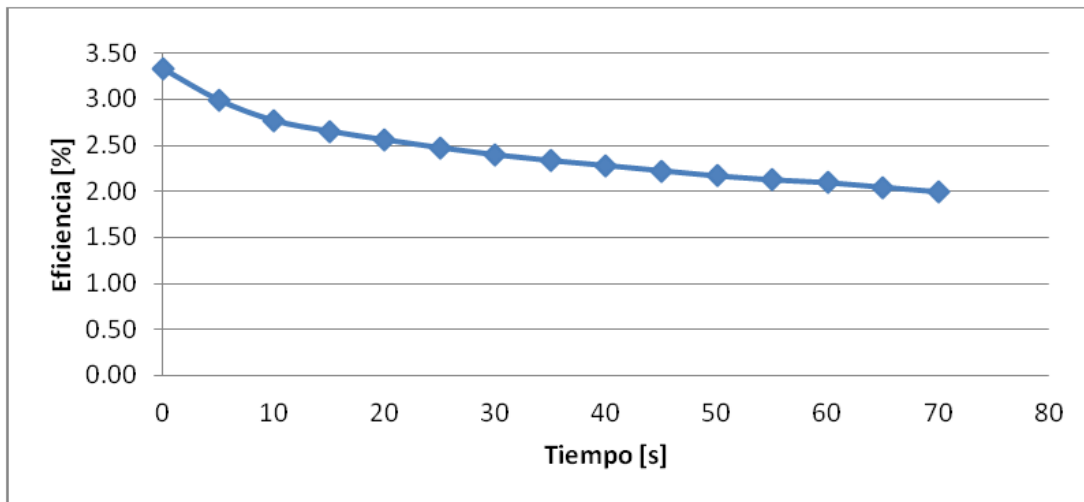


Figura 4.2 Curva de Eficiencia vs Tiempo

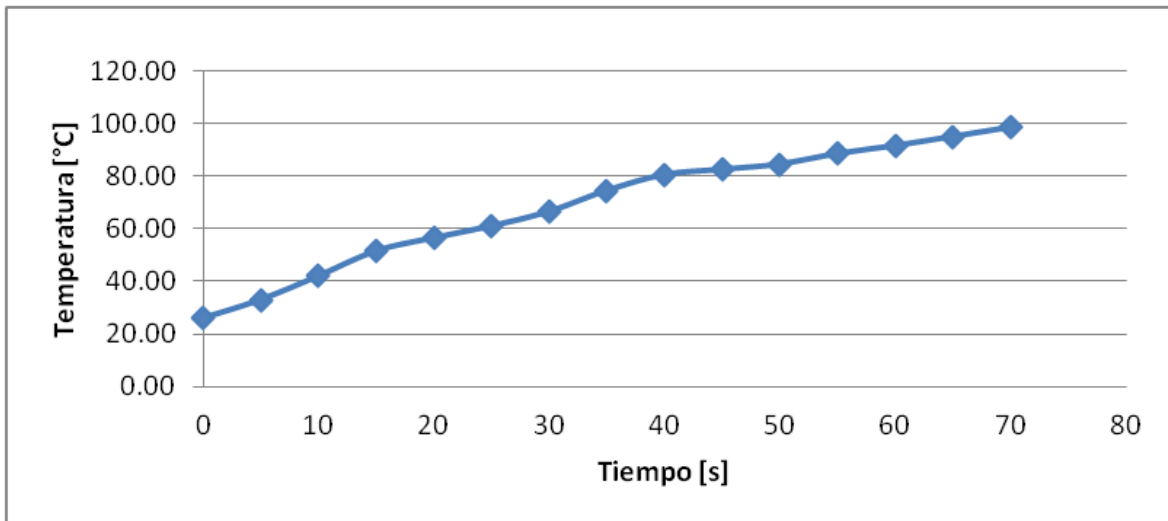


Figura 4.3 Curva de Temperatura vs Tiempo

4.1.2. Con el sol

A pesar de que las condiciones bajo las cuales se realizan estas pruebas no son las mismas que en el espacio, dan una idea muy clara del comportamiento de las celdas. La forma del experimento para obtener su curva característica y eficiencia máxima se hizo de la misma manera que con el simulador solar, es decir, cada punto de la curva se obtuvo con un valor fijo de resistencia conectado en serie con el panel comenzando con un valor de 4 $[\Omega]$ hasta llegar a 22 $[\Omega]$ tomando lectura de voltaje cada 2 $[\Omega]$ a temperatura ambiente (en este caso son 38 $^{\circ}\text{C}$). Se utilizó el mismo trimpot de 200 $[\Omega]$ como carga para el panel. Esta prueba se realizó 3 veces cuidando de que la irradiancia fuera la más parecida para cada una de las mediciones.



Figura 4.4 Montaje del experimento para la determinación de la eficiencia del panel con el Sol

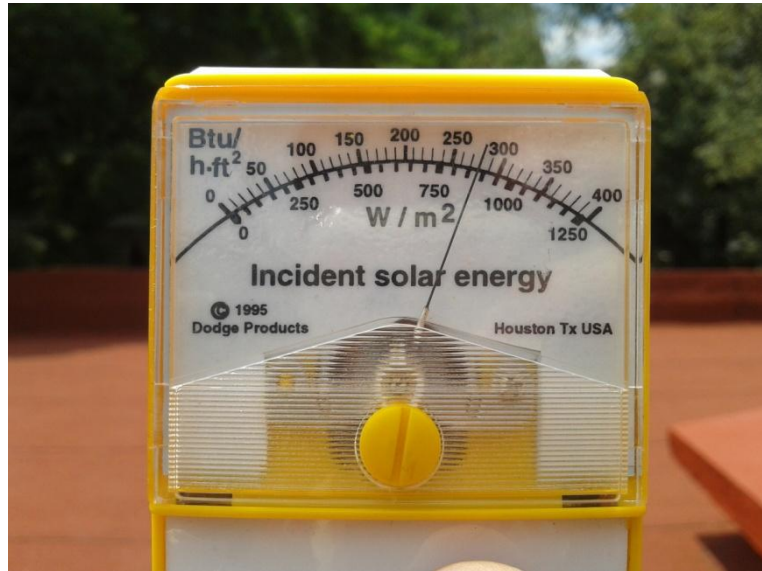


Figura 4.5 Irradiancia solar (875 [W/m²])

En la siguiente tabla se muestran los datos correspondientes a la diferencia de potencial medida, la temperatura a la que se registró así como la eficiencia a esa temperatura para cada una de las 3 pruebas realizadas con una irradiancia promedio de 875 [W/m²].

Tabla 4.5 Eficiencia del panel con una temperatura promedio 36.66 °C

<i>Resistencia [Ω]</i>	<i>Voltaje Promedio [V]</i>	<i>Corriente Promedio [I]</i>	<i>Potencia Promedio [W]</i>	<i>Eficiencia promedio [%]</i>
4	1.053	0.263	0.277	1.583
6	1.370	0.228	0.313	1.787
8	2.048	0.256	0.524	2.997
10	2.699	0.270	0.729	4.164
12	3.231	0.269	0.870	4.972
14	3.527	0.252	0.888	5.076
16	3.707	0.232	0.859	4.907
18	3.800	0.211	0.802	4.584
20	3.930	0.197	0.772	4.413
22	4.033	0.183	0.739	4.225

De manera gráfica se puede observar el comportamiento de la eficiencia con respecto a la diferencia de potencial:

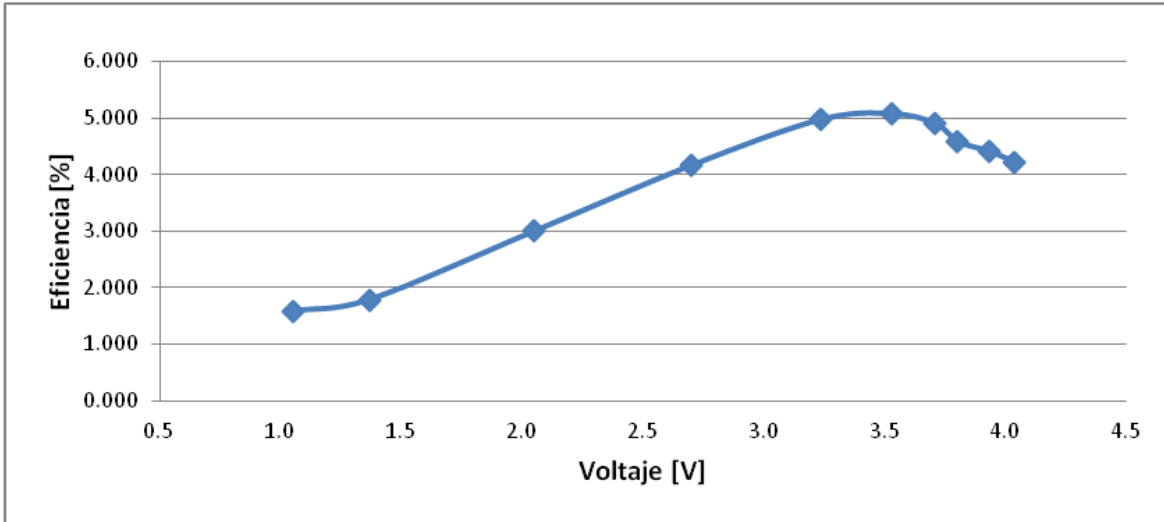


Figura 4.6 Curva de eficiencia del panel

En la siguiente figura se muestra la comparación de eficiencia vs voltaje existente entre la prueba realizada con el simulador solar y con el Sol.

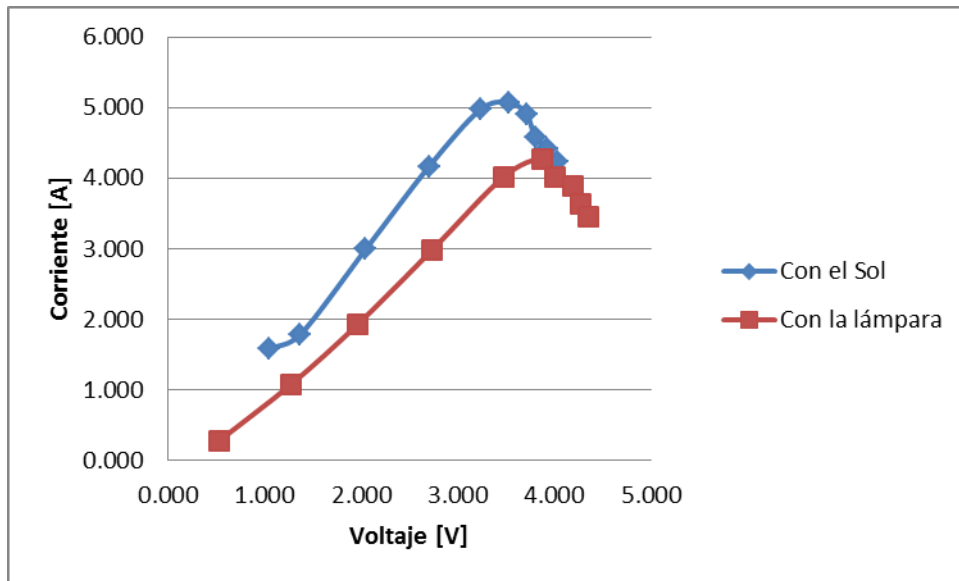


Figura 4.7 Curva de eficiencia con la lámpara de halógeno y el Sol.

4.2. Selección de baterías

Sería imposible pensar en un sistema de potencia para un nanosatélite sin un sistema de baterías. A principios del siglo XIX Alessandro Volta (1745-1827) inventó la celda voltaica y luego la batería. Desde entonces numerosos tipos de baterías se han elaborado con base en diferentes materiales, algunos muy dañinos para el medio ambiente, pero todos con la misma finalidad.

Hoy en día es posible diferenciar entre 2 tipos de baterías: las primarias (no recargables) y las secundarias (recargables). Por tanto, las primarias son de un solo uso por lo que cuando no pueden suministrar potencia se vuelven inutilizables. A pesar de lo anterior, para ciertas aplicaciones sólo es posible utilizar baterías primarias debido a que no existen las condiciones para recargarlas como en misiones militares, de rescate o en marcapasos ^[31].

Un tipo de batería primaria es de *zinc-carbono*. Su costo es el más bajo. Las baterías alcalinas tienen un mejor desempeño que las de *zinc-carbono* pero son más costosas.

Las baterías de litio cuentan con una densidad de energía superior a las alcalinas, por lo que se utilizan en dispositivos con alta demanda de corriente como cámaras fotográficas o equipos electrónicos militares.

En general, las baterías primarias cuentan con una mayor densidad de energía que las secundarias, su uso no es económicamente rentable para muchas aplicaciones, sin embargo, se utilizan en aplicaciones específicas, como se ha mencionado.

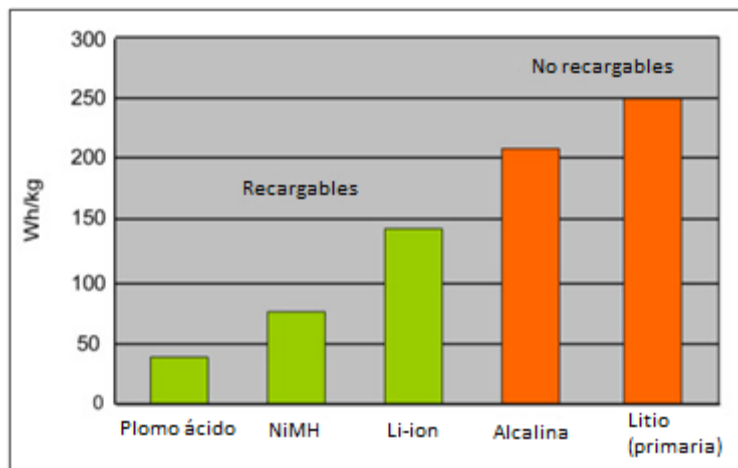


Figura 4.8 Densidad de energía en baterías primarias y secundarias ^[31]

La primera batería recargable fue inventada por el físico francés Gaston Planté (1834-1889) en 1859 y era a base de plomo-ácido. Esta batería en la actualidad tiene un gran uso debido a su bajo costo por cada watt que suministra, además de que puede entregar una gran cantidad de corriente cuando es requerida por la carga. Sin embargo, cuentan con algunas desventajas. Tienen un gran peso por lo que su energía específica es baja y tienen un menor tiempo de vida que las baterías de níquel o litio. Dependiendo de la profundidad de la descarga, ésta puede proporcionar de 200 a 300 ciclos de carga y descarga antes de que su

desempeño se vea notoriamente alterado ^[31]. Debido a sus características, pensar en una batería de este tipo para una aplicación espacial nos resultaría inconveniente.

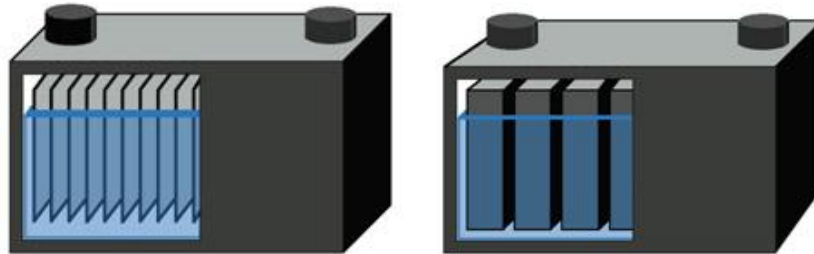


Figura 4.9 Baterías de plomo-ácido. El número y tamaño de las celdas depende de su aplicación.

A finales del siglo XIX, Waldmar Jungner inventó un nuevo tipo de batería recargable a base de níquel-cadmio (NiCd). Pero no fue sino hasta mediados del siglo XX cuando se perfeccionó y se comenzó a utilizar de forma masiva. Su bajo costo, su facilidad de recarga, el tiempo de almacenamiento, su disponibilidad en varios tamaños y formas y su mejora en cuanto a su desempeño a mediados de los años 80, hicieron que se utilizaran en aplicaciones espaciales.

Pero no eran perfectas: el efecto memoria (pérdida en la capacidad de almacenamiento de energía), pérdida de carga en la batería aún sin estar conectada a algún circuito y la toxicidad del cadmio, hizo que se sustituyera por otro tipo de baterías a base de níquel-hidruro metálico (NiMH).



Figura 4.10 Baterías de NiMH

En la actualidad existe un tipo de batería que por su mayor densidad de energía, carencia del efecto memoria, su capacidad de operar a altas temperaturas, así como su baja capacidad de descarga, las hacen viables para una aplicación de tipo espacial. Para este proyecto se utilizó una batería de litio- ion polímero (se utiliza un polímero con gel electrolítico haciéndolas más seguras que las de litio-

ion) diseñada para un IpodClassic con una capacidad de 850 [mAh] y un voltaje nominal de 3.7 [V].



Figura 4.11 Batería de litio-ion polímero utilizada en este proyecto ^[23].

4.3. Circuito electrónico de regulación y carga de baterías

Para nuestro caso, el circuito encargado de la regulación y carga de las baterías Li-ion está compuesto por una tarjeta STEVAL-ISB011V1. Para tal fin ésta cuenta con un circuito STC3100 que se encarga de monitorizar las variables mencionadas. Los datos obtenidos se envían a un microcontrolador modelo STM32F102C6T6A para después transmitirlos a la computadora de abordo. Para adaptar el voltaje a la carga que entregan las baterías, la tarjeta cuenta con unos convertidores DC-DC de subida o *step-up* con diferentes opciones de salida de voltaje (3.3[V] o 5[V]) controlados por el chip modelo MC34063A.

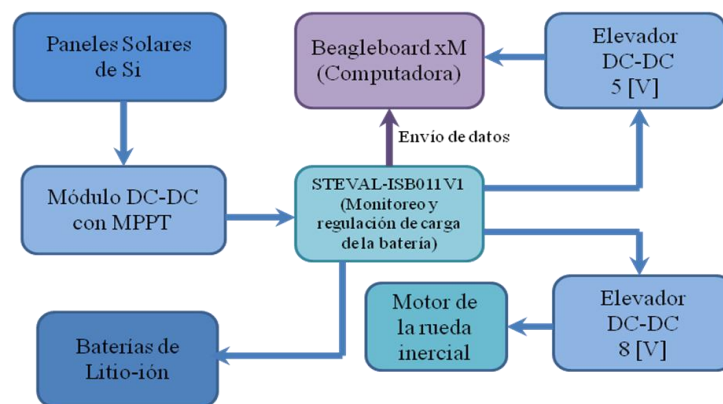


Figura 4.12 Diagrama de bloques del subsistema de potencia.

Cuando el satélite se encuentra en eclipse, un regulador de voltaje de 5[V] conectado a las baterías alimenta al circuito modelo STC4054 encargado de

regular el ciclo de carga y descarga de las mismas. Cuando el voltaje de la batería se encuentra por debajo de 2.9 [V] se comienza con una carga lenta de poca entrega de corriente (un 10% de la corriente de la capacidad de carga de la batería) hasta llegar a una diferencia de potencial de 2.9 [V]. Enseguida la corriente de carga en la batería aumenta hasta llegar a un voltaje de 4.2[V]. Finalmente, se carga a voltaje constante hasta que la corriente cae por debajo del 10% de la corriente nominal de carga ^[23]. La tarjeta también cuenta con un regulador fijo de 3.3[V] encargado de alimentar al LCD y al microcontrolador.

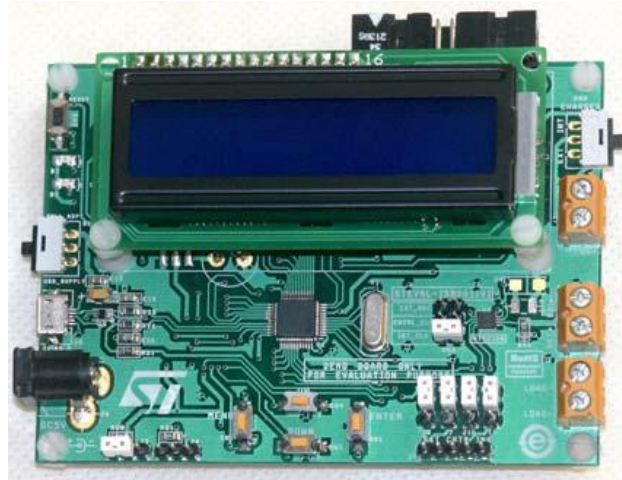


Figura 4.13 Tarjeta STEVAL-IB011V1

La alimentación de la tarjeta, cuando el satélite se encuentra expuesto al sol, es a través de los paneles solares. Un convertidor DC-DC modelo SPV1040 con un algoritmo de regulación tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking) se conecta entre los paneles y la tarjeta como medio de acople para asegurar una alimentación constante, así como para obtener la máxima eficiencia posible de los paneles.

La computadora de abordo utilizada en este proyecto fue una tarjeta BeagleboardxM.



Figura 4.14 Tarjeta BeagleboardxM

Cuando el voltaje proporcionado por los paneles solares es mayor a 3.2 [V] es posible realizar ciclos de carga y descarga de las baterías, debido a que el voltaje de salida del circuito convertidor DC-DC SPV1040 es capaz de elevar el voltaje a 4.2 [V] encendiendo así el circuito de regulación de carga.

Con los paneles solares a la entrada del circuito SPV1040 se obtuvo la siguiente curva característica de Corriente VS Voltaje:

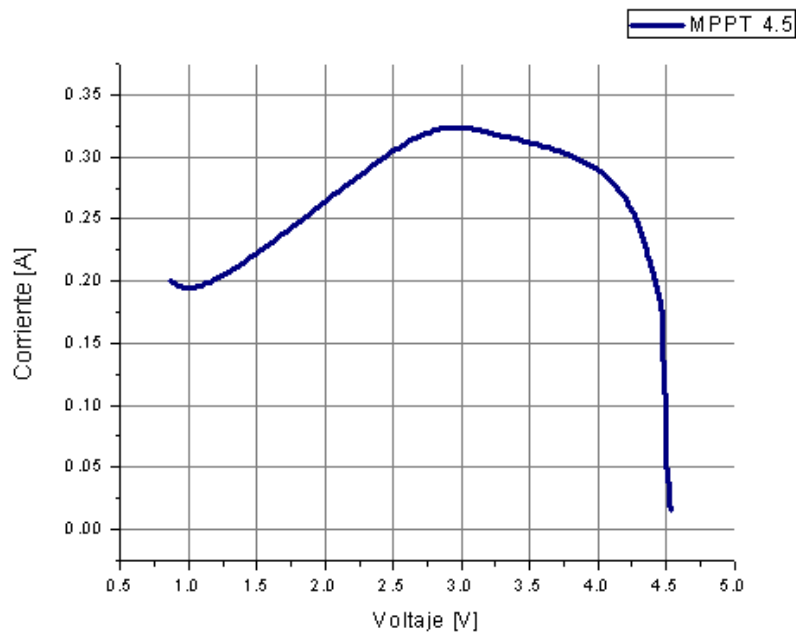


Figura 4.15 Curva de carga de los paneles utilizando el circuito de máxima transferencia de potencia: SPV1040^[23]

Al circuito de regulación, se le conectó como carga un motor de 8 [V] con una rueda inercial. Las pruebas se realizaron teniendo un voltaje en las baterías con 4.2 [V] y 3.6 [V] y se observó que la eficiencia es mejor para el valor más alto de voltaje.

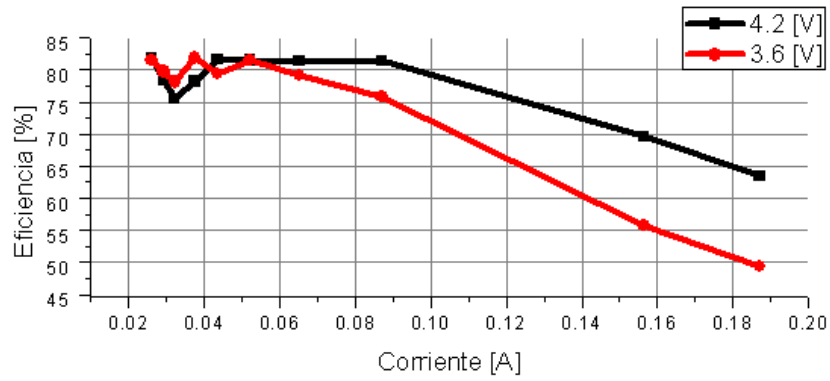


Figura 4.16 Eficiencia del circuito de control de carga MC33063A ^[23]

Resultados y Conclusiones

5.1. Resultados

Comprender el comportamiento de una celda solar fue fundamental para el desarrollo de este proyecto. Se comenzó por estudiar la teoría de la física de semiconductores en la cual se observó que existen varios modelos acerca de la interacción de partículas de distinta naturaleza (fotones y electrones) y puestas en práctica a través del uso de cierto tipo de materiales (Si, P y B) hacen posible la fabricación de un semiconductor. Dicho material es el sustrato sobre el cual se elaboran las celdas solares. Éstas se comportan como una fuente de corriente al ser irradiadas por energía luminosa, como la que produce el Sol.

Se consiguieron 3 tipos de celdas solares de grado espacial, las cuales fueron probadas de manera individual antes de ser integradas en paneles de 10x30 [cm]. Para poder determinar la eficiencia de las celdas, primero se llevó a cabo la caracterización espectral de una lámpara incandescente utilizada como simulador solar. A pesar de que el instrumento utilizado para dicho fin no realiza las mediciones con las mismas unidades de irradiancia, existe un gran parecido; es posible notar que el espectro de la lámpara es similar al del sol pero con una magnitud significativamente mayor en el rango del infrarrojo. A pesar de lo anterior, con el medidor de irradiancia se pudo determinar que ésta es muy similar a la del sol cuando no hay atmósfera, lo que nos indicó que este equipo tenía las condiciones necesarias para permitirnos obtener la eficiencia de las celdas.

Durante el proceso de pruebas de eficiencia de las celdas solares, existió un problema fundamental. Aunque ya se conocía la forma de calcular la eficiencia, la cual consistía en conectar una serie de resistencias de una a la vez, los valores tanto de voltaje y corriente, aparentemente eran inconsistentes y se encontraban fuera de un intervalo esperado. Esto se debía a que el rango de valores de resistencia era mucho mayor al que se debía utilizar para caracterizar una sola celda (la resistencia debe ser del orden de fracciones de ohm). Se solucionó al

conectar hasta cuatro celdas en serie para que la curva de caracterización se pudiera obtener en un intervalo de valores de resistencia razonablemente prácticos.

Los datos de eficiencia obtenidos tras realizar la caracterización de cada grupo de celdas, resultaron ser inferiores a los de una celda de silicio con calificación espacial, cuyos valores se encuentran alrededor del 15% ^[27]. Se comprobó más tarde, con las pruebas realizadas con el Sol, que con el simulador solar no se obtiene el máximo grado de eficiencia debido a que el espectro de la lámpara no coincide en un intervalo de la respuesta espectral del silicio.

La base sobre la cual se montan las celdas para formar el panel se elaboró con un emparedado de fibra de carbono, cuyo centro es una espuma de estireno y todo esto embebido con resina epóxica como endurecedor. La conexión eléctrica de las celdas solares se realizó con cable plano de cobre estañado y se adhirieron al panel con silicón de alta temperatura. En la terminal positiva se soldó un diodo para evitar corrientes de retorno que pudieran dañar el arreglo de celdas. Para las terminales se utilizaron conectores de atornillado doble.

Una vez armado el panel, se procedió a realizar las pruebas para la determinación de la eficiencia, tanto con la lámpara como con el Sol. Se pudo observar que la eficiencia máxima obtenida en los paneles fue de 5.154% y la eficiencia calculada de los 2 paneles conectados en paralelo fue de 3.006%. Podría pensarse que la eficiencia se debería mantener en este último caso, pero cuando interactúan los 2 paneles, su comportamiento no lineal implica que la corriente suministrada no es la suma de la que puede entregar cada panel por separado.

Cabe mencionar que la eficiencia obtenida con los paneles es significativamente menor a la determinada con cada grupo de celdas. Como cada grupo tiene un grado máximo de eficiencia distinto, al conectar las celdas entre sí para formar un arreglo, el punto de máxima eficiencia resultante es diferente a la de cada tipo, no pudiendo proveer la máxima potencia posible en el punto de máxima eficiencia del panel.

Sin duda la temperatura juega un papel fundamental en el comportamiento de una celda solar. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la temperatura afecta de forma negativa en la eficiencia de una celda solar a medida que ésta se incrementa. Las pruebas realizadas para observar el comportamiento en función de la temperatura indican que la eficiencia disminuye hasta llegar a 1.87% cuando el panel alcanza una temperatura de 100 [°C].

La fibra de carbono es muy resistente contra impactos y vibraciones pero es altamente sensible a la radiación infrarroja. Cuando se efectuaron las pruebas,

para la determinación de la eficiencia en los diferentes tipos de celdas, la temperatura máxima alcanzada fue de 70 [°C] y cuando se hicieron en los paneles fácilmente superaban los 100 [°C].

Finalmente, durante la realización de pruebas de funcionamiento en conjunto, los paneles fueron capaces de suministrar el voltaje y corriente suficientes (3.2 [V] y 350 [mA], respectivamente, a temperatura ambiente) para alimentar el circuito MPPT el cual a su vez alimenta al circuito electrónico de carga y descarga de baterías (STEVAL-ISB011V1) así como la computadora de abordo (BeagleboardxM). No obstante, si la temperatura de operación de los paneles es mayor a la temperatura ambiente (25 °C), éstos pierden la capacidad de suministrar la potencia suficiente al sistema.

5.2. Conclusiones

Invertir en tecnología aeroespacial en nuestro país marca el comienzo de una etapa de avances tanto en conocimientos como en un posible surgimiento de una industria de esta naturaleza. Así, nuestra sociedad será capaz de generar más científicos altamente calificados, capaces de crear diseños cada vez más complejos que pondrán eventualmente a México en competencia real con las potencias actuales en materia espacial.

El desarrollo de este tipo de proyectos nos ayuda a entender el conocimiento existente que se tiene sobre los diferentes componentes empleados para su uso en el espacio. Sin duda marcan una tendencia para el desarrollo de tecnología propia, teniendo como consecuencia una menor dependencia de otros países. Para nuestro caso en particular, el prototipo armado ayudó a entender el funcionamiento de una celda individual bajo ciertas condiciones de operación, así como su comportamiento ante cambios de temperatura, su respuesta en arreglos serie-paralelo, la conexión entre paneles y el desempeño en su funcionamiento como parte del subsistema de potencia.

Es cierto que los paneles construidos son capaces de encender el circuito electrónico de carga y descarga de baterías bajo condiciones de temperatura normales en Tierra. La potencia que suministran es la suficiente para el sistema, pero para el espacio es indispensable contar con al menos 25% ^[6] más de la energía necesaria para asegurar el funcionamiento del satélite durante su vida útil.

De manera puntual podemos señalar las siguientes conclusiones sobre este trabajo de tesis:

- Se han diseñado, construido y probado dos paneles con celdas solares de calidad espacial.
- Se ha caracterizado una lámpara de tungsteno-halógeno para ser utilizada como simulador solar.
- Se ha establecido un método para evaluar la eficiencia de celdas y de paneles solares.
- Las celdas individuales, así como los paneles solares, han sido caracterizados y sus eficiencias obtenidas.
- Las pruebas de funcionamiento de los paneles solares en conjunto con el sistema de regulación, distribución y almacenamiento, demuestran su utilidad como sistema de potencia para un nanosatélite.

Después de realizado el presente desarrollo experimental y analizar los resultados, se hace necesario hacer las siguientes recomendaciones:

- Para que el punto máximo de eficiencia en el panel sea el mismo que el de cada una de las celdas que lo componen deberán emplearse aquellas que sean del mismo tipo y capacidades. Así se logra una mayor eficiencia en el panel y por tanto, una mayor potencia para el sistema.
- Se recomienda que las celdas solares cuenten con cubierta cristalina para que se obtenga una mayor eficiencia, al ser menos propensas a sufrir por el incremento de temperatura y se aproximen al comportamiento de las celdas que formen el panel que vaya a ser puesto en órbita. Además su manipulación es más sencilla al tener una mayor resistencia mecánica.
- La fibra de carbono es un material muy resistente el cual se emplea para la fabricación de paneles solares espaciales, pero con las pruebas realizadas sobre la eficiencia en función de la temperatura, resulta muy evidente que esta última se eleva demasiado. Se recomienda entonces cortar a ras el panel a las celdas para que la luz del simulador o del sol, no incida directamente sobre el material. Además, es recomendable utilizar en el centro del panel, aluminio de grado espacial con forma de panel de abeja y construirlo como se muestra en la figura 2.5. agregando algunas capas de kapton como aislante térmico.

- A través de la caracterización de la lámpara de halógeno fue posible observar que su espectro se aproxima al del Sol, pero para lograr un mejor resultado al realizar las pruebas de determinación de eficiencia, así como de temperatura, se recomienda el uso de un simulador solar con mejores características, como el que se muestra en el capítulo 3.
- Realizar pruebas de calificación espacial. Es de suma importancia conocer si el panel es capaz de soportar las condiciones adversas del espacio para asegurar un adecuado funcionamiento y suministrar la potencia necesaria durante el tiempo de vida considerado para la misión.

A través del desarrollo de este proyecto se marca un nuevo punto de partida con la intención de que los prototipos posteriores tengan una mayor eficiencia, desempeño y versatilidad en su uso para que en un futuro, esperemos en un corto plazo, sea posible lanzar un sistema de potencia para un nanosatélite con tecnología 100% mexicana.

A

Determinación de las pruebas de calificación para vuelo espacial

Cualquier satélite, subsistema o circuito electrónico que se pretenda lanzar al espacio debe tener en cuenta durante su diseño, las condiciones a las que se someterá desde su lanzamiento, hasta su puesta en órbita, para asegurar su correcta operación.

Económicamente sería inviable probar cada diseño realizando un lanzamiento para determinar si funcionará en el espacio. Es por eso que se han desarrollado pruebas de laboratorio capaces de evaluar si un componente será apto para vuelo espacial.

Existen varias dependencias que se encargan de regular el procedimiento de dichas pruebas para calificar los componentes que van a ser lanzados al espacio. La Cooperación Europea para la Normalización Espacial o ECSS por sus siglas en inglés (European Cooperation for Space Standardization) establece un protocolo sobre el desarrollo de las pruebas que se deben efectuar ^[24] ^[25] al dispositivo completo o a sus componentes; esto dependerá del tamaño del modelo y de las piezas que necesiten algún tipo de prueba en específico.

Las pruebas en la etapa temprana de desarrollo asisten tanto la confiabilidad del diseño como de su evolución. Aquí se determina si es necesario hacer algún tipo de modificación para cumplir finalmente con las especificaciones previamente establecidas.

Con las pruebas de desarrollo se deben a su vez asegurar:

- Los límites de desempeño del diseño.
- La capacidad de ser construido con la tecnología actual.
- Que al modelo terminado se le puedan efectuar las pruebas de calificación para vuelo espacial.
- Confiabilidad
- Su expectativa de vida útil

➤ **Modelado de fallas en el sistema**

Una vez que se tiene el modelo terminado éste se somete a una serie de pruebas para calificación para vuelo espacial. Los resultados de dichas pruebas deberán demostrar tanto que el diseño como su manufactura se desempeñan satisfactoriamente bajo las condiciones previstas dentro de un intervalo establecido. Los niveles de las pruebas de este tipo deben de exceder los niveles máximos predichos dentro de un margen de seguridad para asumir que, incluso llevándose a cabo la peor combinación de niveles de tolerancia en las pruebas, no sobrepasen las condiciones reales de vuelo.

Se dividen en 6 variantes: pruebas en general, mecánicas, de integridad estructural, térmicas, eléctricas/RF y si es necesario, realizar alguna específica para la misión. A continuación se describirá cada una de ellas:

Pruebas en general

Sirven para determinar el completo funcionamiento del equipo bajo las condiciones espaciales en todos los modos posibles de operación. Se debe verificar su correcto desempeño cumpliendo con todas las especificaciones de diseño. Se realizan también pruebas de expectativa de vida así como de funcionamiento en conjunto.

Mecánicas

Aquí se verifica que las propiedades mecánicas del equipo cumplan con las establecidas en el diseño. Se comienza por medir sus propiedades físicas tales como su masa, dimensiones, centro de gravedad y momento de inercia. Después se realizan pruebas de aceleración para demostrar que el equipo no se dañará en el proceso de lanzamiento, ni en su trayecto hacia su órbita.

Integridad Estructural

Debido a todas las etapas por las cuales pasa el equipo para cumplir su ciclo de vida, se debe asegurar que los materiales no pierdan sus propiedades físicas. Las pruebas consisten entonces en medir la hermeticidad del sellado del equipo (si cuenta con algún compartimiento presurizado) y su resistencia a las bajas presiones.

Térmicas

Los altos gradientes de temperatura existentes en el espacio, ocasionados por los periodos de luz y sombra en el equipo, puede afectar el funcionamiento de sus

componentes, por lo que antes del lanzamiento se deben probar para demostrar que puede operar bajo esas condiciones extremas.

Eléctricas/RF

Este tipo de pruebas se refieren a la compatibilidad electromagnética que tenga el equipo con el ambiente espacial, es decir, se deberá demostrar que la interferencia de esta naturaleza bajo las peores circunstancias no resulte en un funcionamiento erróneo. A su vez, también se verifica que el equipo no emita, radie o transmita algún tipo de interferencia a algún otro sistema.

Pruebas específicas para la misión

En esencia son pruebas acústicas para medir la intensidad de las ondas sonoras en la estructura del equipo cuando éste se encuentra en ambientes donde sea posible la transmisión de vibraciones de esta naturaleza (por ejemplo en una estación espacial).

Antes de ser lanzado el equipo al espacio, es necesario realizar un último conjunto de pruebas denominadas pruebas de aceptación. Éstas tienen como objetivo de actuar como control de calidad para detectar defectos de fabricación, de manufactura, análisis de fallas y otras anomalías en el desempeño del equipo. Son de carácter similar a las de calificación espacial pero éstas se realizan con un menor grado de intensidad manteniéndose siempre dentro de un margen de seguridad, con el fin de simular las condiciones a las que estará sometido el equipo en el espacio.

Paneles solares

Los materiales de la base de los paneles solares son de calidad espacial así como las celdas. Sin embargo, algunas de ellas no cuentan con el recubrimiento cristalino para darle protección contra la radiación cósmica. El prototipo armado tiene la intención de ser probado en Tierra y no pretende pasar por algún proceso de calificación espacial. Sin embargo, en futuros prototipos de paneles solares se les deben realizar las pruebas mecánicas, de integridad estructural, térmicas (incluyendo las de termo-vacío) y las pruebas en general para obtener calificación para vuelo espacial.

Referencias

1. Van Zeghbroeck, B. 2011. *Principles of Semiconductor Devices*. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/> (Enero de 2012).
2. Neamen, D. A. 2003. *Semiconductor Physics and Devices*. Mc Graw- Hill. New York. pp. 46-48.
3. Merlin, S. 2005. *Dryden Flight Research Center*. http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/XPress/stories/2005/102105_Schneider.html (Octubre de 2011).
4. Riebeek, H. 2009. *Catalog of Earth Satellite Orbits* <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/> (Octubre 2011).
5. Darling, D. 1999. *The Encyclopedia of Science* http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/satellite_mass_categories.html (Julio 2012)
6. Odenwald, S. 2005. *Space Weather* <http://www.solarstorms.org/Svulnerability.html> (Noviembre 2011).
7. Zell, H. 2010. *Heliophysics Fun Facts* <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/sunearthsystem/main/Helio-facts.html> (Julio 2012)
8. Den Haan, J. 2009. *Solar Cell Efficiency* <http://www.solarpower2day.net/solar-cells/efficiency/> (Enero 2012).
9. Hoja de Datos Técnicos de Celda Solar Emcore ZTJ http://www.emcore.com/wp-content/themes/emcore/pdf/ZTJ_datasheet.pdf
10. Sánchez, M. A. 2011. *Energía Solar Fotovoltáica*. Limusa. México. pp. 9-72.
11. Dismukes, K. 1999. *Mir Space Station* <http://history.nasa.gov/SP-4225/mir/mir.htm> (Agosto 2012).
12. Carrizales, M. Z. L. 2009. *Subsistema Inteligente de Potencia para un Satélite Educativo*. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 88 p.

13. U.S. Department of Energy. *The History of Solar*. http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf (Agosto 2012).
14. A. Green M. 2009. *The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution*. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.892/pdf>. (Septiembre 2012).
15. Hagen, J. P. 2012. *Vanguard 1* <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/Display.do?id=1958-002B> (Agosto 2012).
16. J.L. Tamasi, M. 2003. *Celdas Solares para uso espacial: Optimización de procesos y caracterización*. Tesis Doctoral. Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sabato", Universidad Nacional de General San Martín. Argentina 188 p.
17. Wacker Silicones. *Silicone rubber adhesives for outer space*. http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6427_EN.pdf (Febrero 2012).
18. Hoja de Datos Técnicos de Cable de Uso Espacial Astrolab http://www.minibend.com/catalog_viewcable.asp?cnid=30
19. Honsberg, C., Bowden, S. *Photovoltaic Education Network*. <http://pveducation.org/> 2012 (Noviembre 2011).
20. ABS Alaskan, Inc. 2001. *Diodes in Solar Arrays*. <http://www.absak.com/tech/diodes.pdf> (Enero 2012).
21. Hoja de Datos Técnicos de Simulador Solar SpectroSun X-25 Mark II. 1997 <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/ILS%20X-25%20Data%20Sheet%20Web.pdf>. (Octubre 2012).
22. P. Barrera, M., M. 2009. *Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales*. Tesis Doctoral. Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sabato", Universidad Nacional de General San Martín. Argentina 168 p.
23. Buenrostro D., L. M. 2011. *Fuente de energía para un satélite pequeño*. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 108 p.

24. European Cooperation for Space Standardization. 2002. *Space Engineering: Testing. Manual de especificaciones técnicas* http://www.everyspec.com/ESA/ECSS-E-10-03A_14019/ (Septiembre 2012).
25. European Cooperation for Space Standardization. 2012. *Space Engineering: Testing. Manual de especificaciones técnicas* <http://www.ecss.nl/> (Septiembre 2012).
26. Hess, M. 2012. *Engineering Human Space Exploration* http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated_environments/index.html (Octubre 2012).
27. Torchynska, T. V. and Polupan, G. 2004. High efficiency solar cells for space applications. *Superficies y Vacío* 17 (4): 21-25.
28. Chapa, J. 2008. *Paint on Solar Power!* <http://inhabitat.com/solar-power-without-a-solar-panel/> (Noviembre 2011)
29. Lowe, S. 2003 *From space junk to world heritage listing* <http://www.smh.com.au/articles/2003/06/10/1055220598848.html> (Noviembre 2011)
30. Rohde, R. A. 2007 *Solar Radiation Spectrum* http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Solar_Spectrum_png (Octubre 2012)
31. Buchmann, I. 2003 *Battery University* <http://batteryuniversity.com/> (Septiembre 2012)