

**INFLUENCIA DEL ESPECTRO DE ILUMINACIÓN EN LA
CARACTERÍSTICA ELÉCTRICA DE CELDAS SOLARES
MULTIJUNTURA**

Exequiel E. Yaccuzzi

Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

Marzo de 2012

TEMA: Energía Solar

ALUMNO: Exequiel Eliseo Yaccuzzi

LU N°: 434/06

LUGAR DE TRABAJO: Departamento Energía Solar - Comisión Nacional de Energía Atómica

DIRECTOR DEL TRABAJO: Dr. Juan Plá

CODIRECTOR DEL TRABAJO: Ing. Hernán Socolovsky

FECHA DE INICIACIÓN: Abril de 2011

FECHA DE FINALIZACIÓN: Marzo de 2012

FECHA DE EXAMEN:

INFORME FINAL APROBADO POR:

Autor: Exequiel E. Yaccuzzi

Jurado

Director: Juan Plá

Jurado

Profesor: Mirta A. Gil

Jurado

Resumen

Este trabajo consistió en el análisis y predicción del comportamiento de una celda solar triple juntura (TJ) InGaP/GaAs/Ge cuando es iluminada con diferentes espectros de luz. Se utilizaron a tal fin diferentes fuentes de luz continua, una fuente de luz pulsada, y 3 celdas solares isotipo que se comportan de manera similar a cada una de las subceldas de la TJ (InGaP, GaAs y Ge). A partir de mediciones realizadas con las celdas isotipo y un posterior análisis, fue posible predecir la curva I-V de la celda TJ con errores RMS menores a 0.84 %. También se realizó un análisis dinámico de la celda TJ cuando es iluminada con un pulso de luz del orden de 1ms que permitió justificar el resultado de las mediciones realizadas con iluminación pulsada. Este análisis consistió en construir un modelo eléctrico de la celda con el *software* Pspice, en el cual se tuvieron en cuenta los efectos capacitivos de la misma. Con estas simulaciones fue posible explicar las mediciones y, como resultado adicional, se probó que son despreciables los efectos transitorios a la hora de medir la curva I-V de la celda TJ con el flash utilizado. Finalmente, se aplicaron los resultados obtenidos a la simulación de los módulos de potencia (cada uno integrado por 6 cadenas en paralelo, con cada cadena formada por 18 celdas en serie) del satélite Aquarius/SAC-D, con resultados satisfactorios.

Agradecimientos

Podría enumerar a varias personas que conocí y que me apoyaron a lo largo y en cada etapa de la vida y de esta carrera, pero sólo voy a mencionar a quienes realmente fueron importantes e imprescindibles para que hoy me pueda estar recibiendo. Esas personas son mi viejos. Sin el apoyo y la ayuda de ellos a lo largo de mi vida, nunca habría podido llegar hasta acá y convertirme en la persona que soy. Ahora que me recibo, espero poder retribuirles de a poco todo lo que hicieron por mi a lo largo de estos años.

Indice

1. Introducción	7
1.1. Características de la conversión fotovoltaica de la energía solar	7
1.2. Perspectivas a futuro	9
2. Física de la Celda Solar	12
2.1. Propiedades fundamentales de los semiconductores	15
2.2. Absorción de luz	16
2.3. Recombinación	17
2.4. Ecuaciones de un semiconductor	19
2.5. Junturas P-N	20
2.5.1. Capacidad de la juntura	20
2.6. Curva característica corriente-voltaje (I-V)	20
2.7. Circuito equivalente	23
2.8. Respuesta espectral	24
3. Celdas solares III-V	26
3.1. Celda triple juntura (TJ)	27
3.2. Celdas isotipo	29
4. Mediciones con simuladores solares de luz continua	32
4.1. Generación de la curva I-V de una triple juntura a partir de celdas isotipo	32
4.2. Medición con una lámpara dicróica	33
4.2.1. Homogeneidad	33
4.2.2. Curvas I-V	35
4.3. Medición con el simulador TS-Space	39
4.3.1. Curvas I-V	39
4.3.2. Análisis espectral	41
4.4. Medición en oscuridad	43
4.5. Modelo eléctrico de la celda triple juntura	43
5. Mediciones con un simulador solar de luz pulsada	46
5.1. Flash de Xe pulsado	46
5.2. Análisis espectral	48

5.3. Pulsos medidos con la celda TJ	51
5.4. Medición de la curva I-V de la celda TJ con el flash	53
6. Análisis dinámico de la celda TJ	54
6.1. Mediciones de C-V	54
6.2. Simulación dinámica de la celda TJ	56
7. Simulación de un módulo solar	60

Capítulo 1

Introducción

La energía solar fotovoltaica es el símbolo tecnológico para un futuro sistema sostenible de suministro de energía en muchos países. Una considerable cantidad de dinero se invierte en investigación, desarrollo y demostración. Ninguna otra tecnología de energía renovable recibe una fuerte apreciación por el público y de manera creciente también por los políticos y los sectores industrial y financiero. Esta es una situación notable, pues al mismo tiempo la electricidad fotovoltaica (PV) se considera demasiado cara en comparación a la red eléctrica convencional, aunque esta situación ha evolucionado de forma notable en los últimos años y, dada la madurez de la tecnología, la economía de escala, y el aumento del costo de la energía convencional basada en combustibles fósiles, en algunos países ya es competitiva. El reconocimiento justificado de la energía PV puede entenderse sobre la base de una descripción de las principales características positivas de este tipo de conversión de la energía solar [1].

Desde el primer reporte de un dispositivo fotovoltaico en 1941 por Russell Ohl, de Laboratorios Bell, se produjo una constante evolución, tanto en tipos y tecnologías de celdas como en la eficiencia de estas a nivel comercial, experimental y teórico. Como índice de esta evolución podemos considerar el mejoramiento de la eficiencia de conversión (relación entre la potencia recibida y la potencia entregada) desde 1941, con una eficiencia estimada menor que el 1 %, hasta 34,1 % en 2009 correspondiente al tipo de celdas multi-juntura GaInP/GaInAs/Ge desarrollada por la empresa AZUR [2]. Para dispositivos que usan radiación concentrada por métodos ópticos, la eficiencia se eleva hasta el 43 % [2].

1.1. Características de la conversión fotovoltaica de la energía solar

La energía PV tiene como objetivo dos ámbitos de aplicación. Uno de ellos es la fuente de alimentación fuera de la red en regiones aisladas (por

ejemplo, equipos de telecomunicaciones y sistemas solares domésticos en el ámbito rural) y el otro es la generación de electricidad a gran escala como sustituto y complemento de los procesos actuales de energía no sustentables. Con respecto a esto último, el potencial mundial de la electricidad PV es de vital importancia. La figura 1.1 muestra el potencial técnico y teórico de varias fuentes de energía renovables. El potencial teórico no tiene en cuenta las restricciones de uso del suelo, eficiencias de conversión, requisitos de almacenamiento, etc. El potencial técnico no debe confundirse con potenciales económicos de corto plazo, ya que las situaciones de los precios y los requisitos de capital para la activación de estas fuentes de energía a gran escala no son considerados.

Resource	Current use	Technical potential	Theoretical potential
Hydropower	9	50	147
Biomass energy	50	>276	2900
Solar energy	0.1	>1575	3900000
Wind energy	0.12	640	6000

Units: exajoule per year

Figura 1.1: Uso actual y potencial para algunas energías renovables. El consumo energético mundial en 2005 fue de 500EJ [1].

Sin embargo, se pueden extraer de la figura 1.1 conclusiones importantes: (1) incluso bajo fuertes restricciones de área (por ejemplo, la utilización de un pequeño porcentaje de la superficie terrestre), la conversión de energía solar por sí sola podría, en principio, producir considerablemente más energía que el total que se consume hoy en día; y (2) en comparación con otras fuentes de energía renovables, la radiación solar es por lejos la más abundante. Un sistema sostenible de energía mundial que esté fuertemente compuesto por fuentes renovables, a largo plazo puede estar basado en la energía solar. Con respecto a la tecnología de producción de la electricidad solar, la aplicación de la conversión fototérmica está restringida a zonas muy acotadas. Sin embargo, los módulos fotovoltaicos estándar se pueden aplicar prácticamente en todas partes del mundo, ya que pueden convertir radiación difusa y directa, con aproximadamente la misma eficiencia.

La conversión de la energía PV es altamente modular. Las instalaciones puede variar desde milivatios para productos de consumo (relojes) a megavatios en el caso de las centrales eléctricas conectadas a la red. Desde un punto de vista del mercado, esto da lugar a una amplia variedad de aplicaciones PV. La modularidad es especialmente importante en muchas áreas rurales y remotas, donde la extensión de la red no es económicamente viable. A partir de instalaciones de baja potencia, los módulos PV puede ser gradualmente

añadidos con el fin de hacer frente a la creciente demanda de energía. De esta manera, el suministro de electricidad puede ser realizado evitando el alto nivel inicial de inversión. En el contexto de la electrificación rural, la característica de bajo mantenimiento de la energía PV se considera como una ventaja considerable. La ausencia de partes móviles, la solidez contra el ambiente hostil y la falta de requisitos de suministro de combustible (a excepción de sistemas híbridos), hacen a esta energía muy apropiada en vastas áreas.

Otra característica positiva de la energía PV, es que puede ser vista como parte del rápido crecimiento de la industria y mercado de los semiconductores. Esta relación facilita la transición entre una industria madura y la industria PV emergente. El fuerte crecimiento de la energía PV en la última década (figura 1.2) y el reconocimiento de esta tecnología, no se podría entender si no hubiera una reducción continua y fuerte en los precios del sistema PV y los módulos. La capacidad de la energía PV se aumentó en más de 100 países durante 2010, lo que garantizó que la PV se mantenga como la tecnología de generación de energía de crecimiento más rápida en el mundo. Se estima que en el mundo se añadieron 17 GW de capacidad de PV en 2010 (en comparación con poco menos de 7,3 GW en 2009), con lo que el total mundial se acerca a 40 GW - más de siete veces la capacidad existente cinco años antes [3].

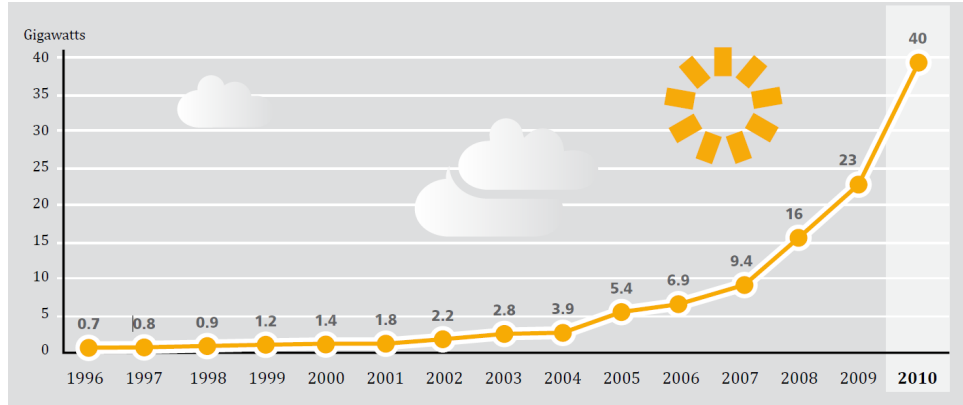


Figura 1.2: Capacidad mundial instalada de energía PV entre 1996 y 2010 [3].

1.2. Perspectivas a futuro

Durante los últimos años, las tasas anuales de crecimiento del mercado y por lo tanto el aumento de la producción industrial de energía PV han sido del orden de 49% (figura 1.2). Los principales actores detrás de este impresionante crecimiento son varios gobiernos y consumidores que ven una

urgente necesidad de una transformación de los sistemas energéticos actuales hacia la sustentabilidad. Se han desarrollado mecanismos financieros que incluyen claros componentes de competencia dentro del área de las tecnologías de suministro de energía. Este apoyo se justifica por el alto potencial de la electricidad PV y su carácter ecológico benigno. Por otra parte, estos esquemas tienen que ser limitados en el tiempo, especialmente si los mercados evolucionan exponencialmente. Por lo tanto, la pregunta que surge es si la electricidad generada por PV será rentable dentro de plazos razonables.

El punto en el cual una instalación PV consigue generar electricidad al mismo precio que los usuarios podrían comprarla a la red eléctrica se denomina paridad con la red (*grid-parity*). En la actualidad, esto ya ocurre en algunas regiones del mundo en el mercado residencial, y la tendencia se profundizará a lo largo de esta década [4]. Una estimación para el año 2020 se muestra en la figura 1.3, para Europa y América. Los primeros mercados en alcanzar la *grid-parity* fueron Chipre, Italia, el Caribe y África occidental. Al final de esta década se prevé que más del 80 % de los mercados residenciales en Europa, América y Asia habrán superado la *grid-parity*. Además, este hecho se complementa con generación de energía PV en sistemas no conectados a red en regiones rurales de países en desarrollo, la cual es económicamente competitiva desde hace tiempo. Esto es el caso para 1.500 millones de personas en el mundo, la mayoría viviendo en África y el Sur de Asia.

En los próximos años, la intensificación en la investigación, desarrollo y demostración para la integración de la energía PV conectada a la red es esencial. Es necesario una actividad sistemática de I + D en las relaciones simbióticas entre las fuentes renovables y las tecnologías respectivas. Esto podría conducir por ejemplo, a plantas de híbridas PV-eólica o PV- hidroeléctrica [4]. Los componentes electrónicos de los sistemas y las baterías para la acumulación de la energía generada tienen que seguir desarrollándose a fin de abordar al mercado de una manera óptima.

Esta tesis, realizada en el Departamento Energía Solar (DES) de la Gerencia Investigación y Aplicaciones de la Comisión Nacional de Energía Atómica, tiene como objetivo contribuir al progreso del conocimiento científico-tecnológico en el país en el campo de las celdas solares multi-juntura basadas en materiales semiconductores III-V y, en particular, a su caracterización eléctrica y electrónica. Los requerimientos de potencia y el área disponible determinaron que dichas celdas fueran las utilizadas para la integración de los paneles de vuelo de la misión satelital SAC-D y en un futuro en la misión SAOCOM, de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE); paneles cuyo diseño, simulación, integración y ensayo se ejecuta en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Por otra parte, esta es una de las tecnologías emergentes para aplicaciones terrestres (utilizando concentración de la radiación solar para minimizar el costo del dispositivo en el sistema) que, con buena probabilidad, tendrá una inserción significativa en

el mercado mundial. De hecho, ya se comercializan sistemas que utilizan la tecnología III-V para su aplicación en centrales PV conectadas a la red [3]. En el país existen regiones apropiadas para instalaciones de este tipo, y se espera que el DES pueda hacer un aporte en el desarrollo local de esta tecnología estratégica, no sólo para aplicaciones espaciales sino también para aplicaciones terrestres

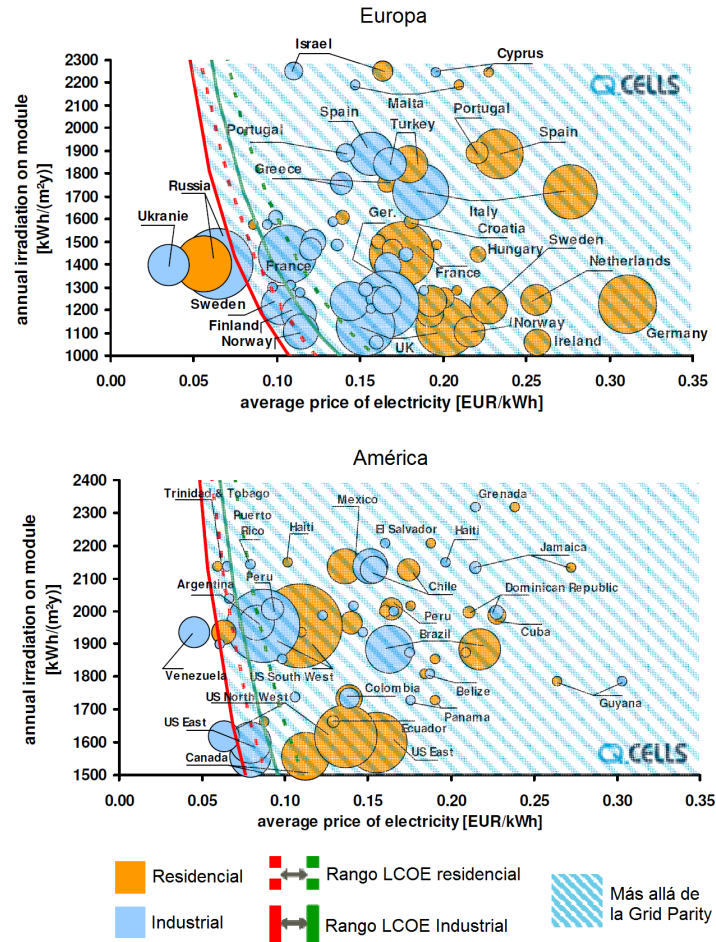


Figura 1.3: Análisis de *grid-parity* para Europa y América en 2020. Los países están clasificados de acuerdo a la población, irradiancia solar y los precios de los 2 mayores mercados: residencial (naranja) e industrial (azul). El volumen del mercado eléctrico es indicado por el tamaño de los círculos. El costo nivelado de energía eléctrica (LCOE) para la generación de electricidad PV está indicado para pequeños sistemas residenciales (líneas de puntos) y para grandes sistemas comerciales (líneas llenas) [4].

Capítulo 2

Física de la Celda Solar

Las celdas solares son, en principio, dispositivos muy simples. Los semiconductores tienen la capacidad de absorber la luz y entregar una porción de la energía de los fotones absorbidos a los portadores de la corriente eléctrica: electrones y huecos. Un campo eléctrico interno, dado por una juntura p-n, separa los portadores y conduce la corriente eléctrica generada preferentemente en una dirección específica. Así, una celda solar es simplemente un diodo semiconductor que ha sido cuidadosamente diseñado y construido para absorber de manera eficiente y convertir la energía luminosa del sol en energía eléctrica. Una estructura convencional de una celda solar se representa en la figura 2.1. La luz del sol incide desde la parte superior (cara frontal) de la celda solar. Una grilla metálica forma uno de los contactos eléctricos del diodo, permitiendo que la luz pase a través de la misma llegando al semiconductor, donde se absorbe y se convierte en energía eléctrica. Una capa antirreflectante en la superficie frontal maximiza la cantidad de luz transmitida al semiconductor. El diodo semiconductor se forma cuando un semiconductor tipo n y un semiconductor tipo p se unen para formar una unión metalúrgica. Esto se logra típicamente por difusión o implantación de impurezas específicas (dopantes) o a través de un proceso de deposición. El otro contacto eléctrico del diodo está formado por una capa metálica en la parte posterior de la celda solar.

Como es sabido, toda radiación electromagnética, incluyendo la luz solar, se compone de fotones, que llevan cantidades específicas de energía determinadas por las propiedades espectrales de su fuente. Los fotones también exhiben un carácter ondulatorio con la longitud de onda, λ , que se encuentra relacionado con la energía del fotón, E_λ , por

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz. Sólo los fotones con suficiente energía para crear un par electrón-hueco, esto es, aquellos con energía mayor al *band gap* (E_G) del semiconductor, contribuirá al proce-

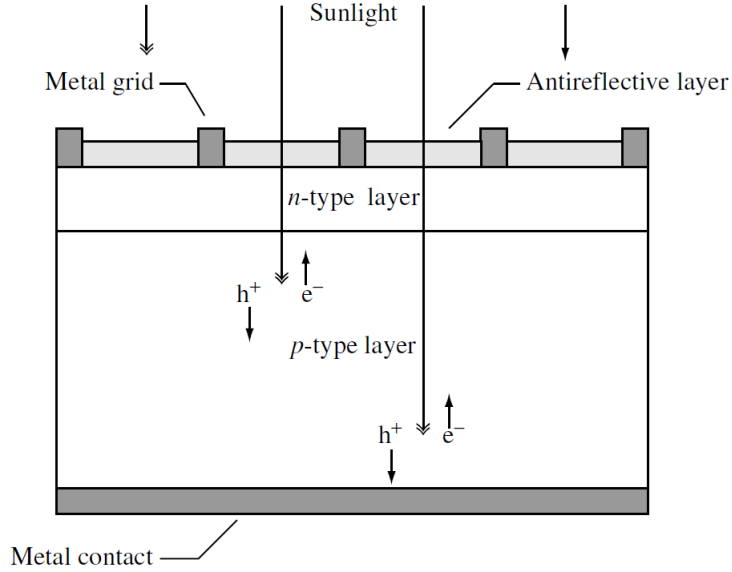


Figura 2.1: Esquema de una celda solar convencional. La creación de pares electrón-hueco, e^- y h^+ respectivamente, es representada [1].

so de conversión de energía. Por esto, el espectro solar es una importante consideración en el diseño de celdas solares eficientes.

El sol tiene una temperatura superficial de 5762 K [1] y su espectro de radiación puede ser aproximado por el de cuerpo negro a dicha temperatura. La emisión de la radiación desde el sol, al igual que con todos los cuerpos negros, es isótropa. Justo encima de la atmósfera de la Tierra, la intensidad de la radiación, o Constante Solar, es de 1366.1 W/m^2 [5] y la distribución espectral se conoce como espectro de radiación *air mass zero* (AM0). La Masa de Aire es una medida de cómo la absorción en la atmósfera afecta el contenido espectral e intensidad de la radiación solar que llega superficie de la Tierra. El número de Masa de Aire está dada por:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.2)$$

donde θ es el ángulo de incidencia ($\theta=0$ cuando el sol está en posición normal a la superficie).

Un estándar ampliamente utilizado para comparar el rendimiento de una celda solar para aplicaciones terrestres es el espectro AM1.5 normalizado a una densidad de potencia total de 1 kW/m^2 . El contenido espectral de la luz solar en la superficie de la Tierra también tiene una componente difusa (indirecta) debido a la dispersión y la reflexión en la atmósfera y paisaje circundante y puede representar hasta el 20 % de la luz incidente sobre una celda solar. Por lo tanto, además del número AM se define si el espectro incluye o no la componente difusa. El espectro AM1.5g (global) incluye

la componente difusa, mientras que el AM1.5d (directo) no lo hace. Los espectros de radiación de un cuerpo negro ($T = 5762 \text{ K}$), AM0 y AM1.5g se muestran en la figura 2.2.

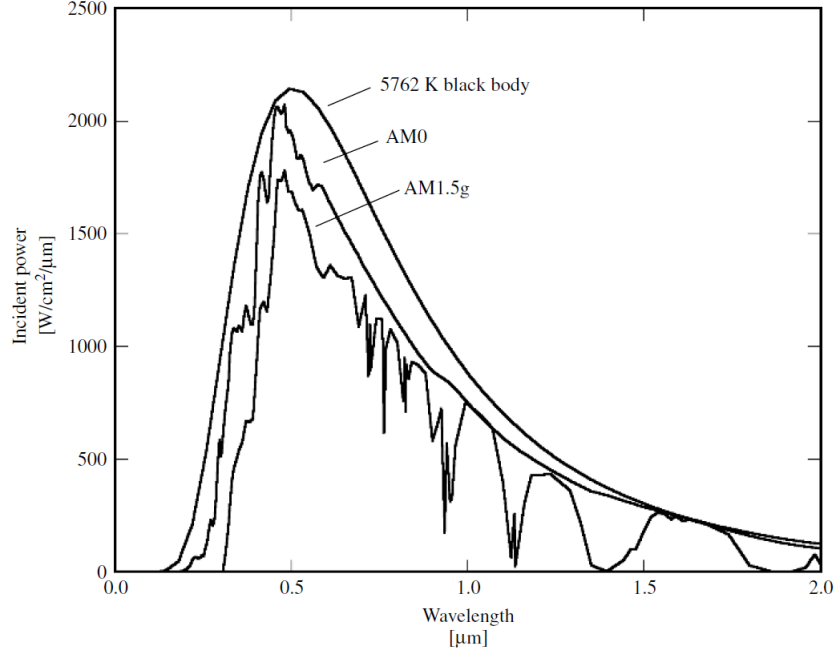


Figura 2.2: Espectro de radiación de un cuerpo negro a 5762 K, espectro AM0 y espectro AM1.5 global [1].

Las celdas solares pueden ser fabricadas a partir de una serie de materiales semiconductores, más comúnmente silicio (Si) en sus formas cristalino, policristalino y amorfo. También se obtienen a partir de materiales que resultan de combinar los elementos de las columnas III y V de la tabla periódica (GaAs, GaSb, GaInAs, GaInP), y los cristales semiconductores provenientes de las columnas II y VI (ZnSe, CdS, CdTe, CuInSe, CuInGaSe). Los materiales para las celdas solares se eligen, en gran medida, por su aptitud para absorber el espectro solar y su incidencia en el costo de fabricación. El silicio ha sido la opción más difundida debido al hecho de que su absorción coincide razonablemente bien con el espectro solar, su abundancia en la corteza terrestre, y a que la tecnología de fabricación del silicio está bien desarrollada como resultado de la industria de semiconductores para aplicaciones en electrónica.

2.1. Propiedades fundamentales de los semiconductores

El problema de cómo se comportan los electrones en las redes cristalinas puede ser abordado a partir de la resolución de la ecuación de Schrödinger, utilizando la aproximación de electrones no interactuantes y un potencial periódico (existen varios modelos para este potencial: modelo Kronig-Penney, primeros vecinos, etc.) a través del Teorema de Bloch [6]. La solución define estructuras de bandas, las cuales pueden ser ocupadas por los electrones, y a su vez pueden existir regiones de energía no permitidas denominadas bandas de energía prohibidas o *gaps*.

Los sólidos con una banda prohibida son aislantes a temperatura $T=0$. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta, existe una probabilidad no nula de que algunos electrones sean excitados térmicamente de la banda de valencia a la banda de conducción. Estos electrones son los que contribuyen a la conducción eléctrica. Pero para que esta excitación térmica contribuya apreciablemente a la conductividad, depende críticamente del tamaño del *gap*. No hay un límite muy claro para diferenciar los aislantes de los semiconductores, pero los *gaps* de energía considerados habitualmente en los semiconductores son menores a 2eV, llegando hasta décimas de eV. A temperatura ambiente, las resistividades de los semiconductores están entre 10^{-3} y $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ (en los metales es del orden de $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, y los buenos aislantes pueden llegar hasta $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$) [7].

Una banda de energía simplificada se muestra en la figura 2.3. Los electrones (*) rellenan los estados de abajo hacia arriba y los estados cerca de la parte superior de la banda de valencia están vacíos (o) ya que algunos electrones se excitan térmicamente a la banda de conducción. Estos estados vacíos pueden considerarse como portadores de carga positiva y son denominados huecos.

Cuando el mínimo de la banda de conducción está alineado con el máximo de la banda de valencia, como en el caso de la figura 2.3, se dice que es un semiconductor de *gap* directo. Cuando no se alinean, es un semiconductor de *gap* indirecto.

El número de electrones y huecos en sus respectivas bandas, y por lo tanto la conductividad del semiconductor, puede ser controlado mediante la introducción específica de impurezas o dopantes, llamados donores y aceptores. Por ejemplo, cuando el silicio es dopado con fósforo, un electrón de cada átomo de fósforo introducido es donado a la banda de conducción. El fósforo está en la columna V de la tabla periódica y por lo tanto tiene cinco electrones de valencia. Cuatro de éstos se utilizan para satisfacer los cuatro enlaces covalentes de la red de silicio y el quinto está disponible para llenar un estado vacío en la banda de conducción. Si el silicio se dopa con boro (valencia tres), cada átomo de boro acepta un electrón de la banda

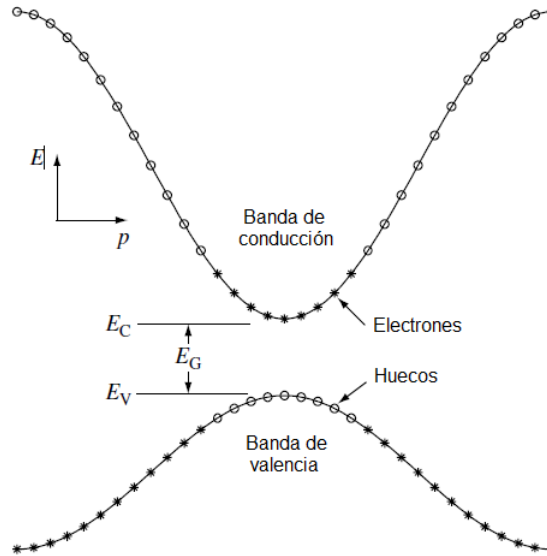


Figura 2.3: Esquema simplificado de un diagrama de energía de un semiconductor a $T > 0$ K. Los electrones cercanos al máximo en la banda de valencia fueron térmicamente excitados a los estados vacíos cerca del mínimo de la banda de conducción, dejando huecos tras de sí.

de valencia y deja un hueco en la misma. Todas las impurezas introducen estados electrónicos localizados adicionales en la estructura de bandas, a menudo dentro de la banda prohibida. La introducción controlada de impurezas donoras y aceptoras en un semiconductor permite la creación de semiconductores tipo n (los electrones son la fuente primaria de conducción eléctrica o portadores mayoritarios) y tipo p (los huecos son los portadores mayoritarios), respectivamente. Esta es la base para la construcción de todos los dispositivos semiconductores, incluyendo las celdas solares.

2.2. Absorción de luz

La creación de pares electrón-hueco a través de la absorción de la luz del sol es fundamental para el funcionamiento de las celdas solares. La excitación de un electrón directamente de la banda de valencia (lo que deja un hueco detrás) a la banda de conducción se llama *absorción fundamental*. Tanto la energía total y el impulso de todas las partículas involucradas en el proceso de absorción deben ser conservados. Como el momento del fotón es muy pequeño comparado con el momento cristalino, se puede decir que la absorción del fotón debe conservar el momento del electrón.

En la figura 2.4 se muestra el proceso básico de absorción de fotones en semiconductores de *band gap* directos e indirectos. En el primer caso, como

el momento del electrón se tiene que conservar, el momento cristalino del estado inicial y final son el mismo. En cambio, en semiconductores de *band gap* indirectos, como el máximo de la banda de valencia está en un momento cristalino diferente del mínimo de la banda de conducción, es necesaria la participación de otra partícula: los fonones. Estas partículas son la representación de las vibraciones de la red cristalina del semiconductor e intervienen en este proceso porque tienen baja energía pero un momento comparable al del electrón. Como consecuencia, el coeficiente de absorción disminuye en estos casos debido a que es necesario la disponibilidad de fonones de momento adecuado para que el proceso sea posible. Esto se puede observar en la figura 2.5, donde se muestra el coeficiente de absorción del Si (*band gap* indirecto) y GaAs (*band gap* directo).

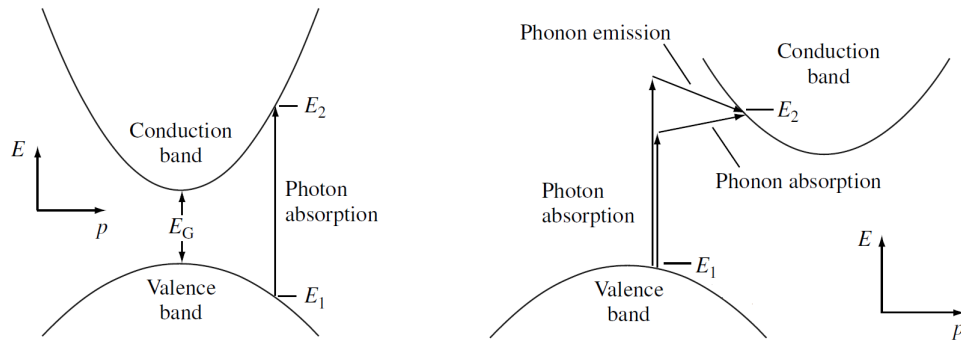


Figura 2.4: Absorción de fotones en semiconductores de *band gap* a) directos y b) indirectos [1].

2.3. Recombinación

Cuando a un semiconductor se lo saca del equilibrio térmico, por ejemplo iluminándolo o inyectándole corriente, las concentraciones de electrones y huecos tienden a relajarse hacia sus valores de equilibrio a través de un proceso llamado recombinación. En este proceso un electrón cae de la banda de conducción a la banda de valencia, eliminando así un hueco de la banda de valencia. Los mecanismos de recombinación pueden ser radiativos (emisión de fotones) y no radiativos. Estos últimos además se dividen en: recombinación Auger, por estados generados por defectos en el volumen y en superficie [8].

- **Recombinación radiativa:** es el proceso inverso al de la absorción y es mucho más eficiente en semiconductores de *band gap* directo que en indirectos. Cuando se produce la recombinación radiativa, la energía del electrón se transfiere a un fotón emitido (así es como operan los láseres de semiconductores y los diodos emisores de luz (LED)). En un

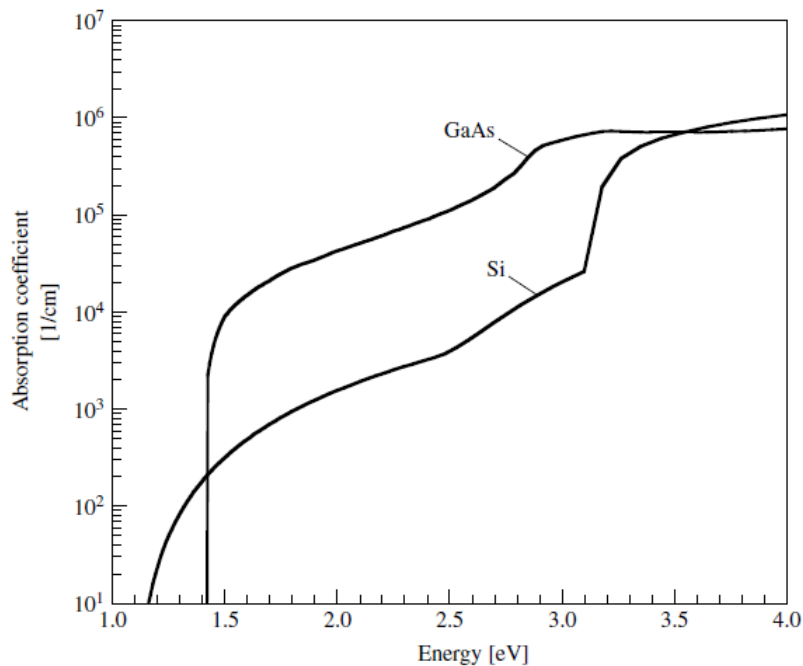


Figura 2.5: Coeficiente de absorción en función de la energía del fotón para el Si (*band gap* indirecto) y GaAs (*band gap* directo) a 300 K. Sus *band gaps* son 1.12 y 1.4 eV, respectivamente [1].

material de *band gap* indirecto, algo de la energía es compartida con un fonón.

■ Recombinación no radiativa:

- Recombinación Auger: la energía entregada por un electrón que se recombina es absorbida por otro electrón, que finalmente disipa su energía por medio de la emisión de fonones. Esta es una colisión de tres cuerpos donde no hay emisión de fotones. Este tipo de recombinación requiere una alta densidad de portadores y por lo tanto es el proceso dominante en condiciones de alta concentración de dopantes o alta inyección de portadores.
- Recombinación por defectos en volumen: la presencia de defectos en el material da lugar a la formación de trampas o centros de recombinación con niveles localizados de energía dentro del *gap*. Los portadores de carga pueden entregar su energía en colisiones con la entidad física que produce el nivel localizado y quedar atrapados o bien aniquilarse con partículas de carga opuesta utilizando ese nivel.
- Recombinación por defectos en superficie: es la producida por me-

dio de estados con energías en la zona prohibida debido a la superficie, los cuales son mediadores muy efectivos para la recombinación no radiativa. Se encuentran en la interfaz entre dos materiales diferentes, por ejemplo en la parte frontal de una celda solar así como en la interfaz aire-sólido, y tienen una alta concentración de defectos debido a la terminación abrupta de la red cristalina.

2.4. Ecuaciones de un semiconductor

La operación de la mayoría de los dispositivos semiconductores, incluidas las celdas solares, pueden ser descritas por las ecuaciones de transporte de carga, que en forma general se describen a continuación [1].

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q(p - n + N_d - N_a) \quad (2.3)$$

Esta es la ecuación de Poisson, donde ϵ es la permitividad eléctrica del semiconductor, p y n la densidad de huecos y electrones respectivamente, N_d y N_a son las densidades de los dadores y aceptores, y q la carga del electrón.

Las ecuaciones de continuidad de los electrones y huecos son

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q \left(G_p - R_p - \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q \left(R_n - G_n + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

donde G_p y G_n es la tasa de generación de electrones y huecos, respectivamente, mientras que R_p y R_s son las tasas de recombinación respectivas.

Las densidades de corrientes de electrones y huecos están dadas por [9]

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \vec{E} - qD_p \nabla p \quad (2.6)$$

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \vec{E} + qD_n \nabla n \quad (2.7)$$

donde μ_p y μ_n son las movilidades de los electrones y huecos, respectivamente. Las constantes de difusión (D_n y D_p) en semiconductores no degenerados están relacionados con la movilidad por $D_i = (kT/q)\mu_i$. El primer término en las densidades de corrientes es la componente de arrastre y el segundo corresponde a la difusión.

Las ecuaciones (2.3)-(2.7) forman un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que no tiene solución analítica. Para poder resolverlas hay que hacerlo numéricamente o bien hacer una serie de aproximaciones, las cuales se mostrarán más adelante.

2.5. Junturas P-N

Cuando un semiconductor tipo n se pone en contacto con un semiconductor tipo p, se forma una juntura p-n. Como existe una diferencia de concentración de huecos y electrones entre los dos tipos de semiconductores, los huecos difunden desde la región tipo p a la región de tipo n y, análogamente, los electrones difunden del material tipo n a la región tipo p. Sin embargo, los electrones que dejan el lado tipo n crean un desbalance de carga en esta región por exposición de impurezas donoras ionizadas (cargas positivas). Similarmente, los huecos que dejan el lado tipo p exponen carga negativa. Estas cargas expuestas crean un campo eléctrico que se opone a la difusión de los electrones y huecos, y cuando se alcanza el equilibrio no hay flujo neto de corriente.

La región de transición entre la zona p y n se denomina región de carga espacial o de vaciamiento (*depletion region*). Si suponemos que esta región es suficientemente fina, las regiones a ambos lados se pueden considerar eléctricamente neutras. La diferencia de potencial creada en la juntura se conoce como *built-in potential*, V_{bi} .

Cuando las concentraciones de las impurezas en un semiconductor cambia abruptamente de impurezas aceptoras a donoras, se obtiene una juntura abrupta. Esto se muestra en la figura 2.6, donde además se detallan las distribuciones de densidad de carga ρ , el campo eléctrico y las bandas de energía.

2.5.1. Capacidad de la juntura

Bajo la aproximación de juntura abrupta, un cambio en el voltaje aplicado en la celda (polarización eléctrica o tensión de polarización) causará un cambio en la carga almacenada sobre el borde de la juntura, como se muestra en la figura 2.7. Esta situación es idéntica a la de un capacitor de placas paralelas. Por lo tanto, la capacidad de la región de vaciamiento, C , se puede expresar como [10]:

$$C = A \sqrt{\frac{q\epsilon}{2(V_{bi} - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}} \quad (2.8)$$

Cuando la celda está polarizada positivamente, existe también una capacidad de difusión debido al almacenamiento de los portadores minoritarios en las regiones cuasi-neutras de la juntura [9].

2.6. Curva característica corriente-voltaje (I-V)

Para encontrar una solución analítica sencilla del sistema de ecuaciones 2.3-2.7, es necesario realizar las siguientes aproximaciones [9]:

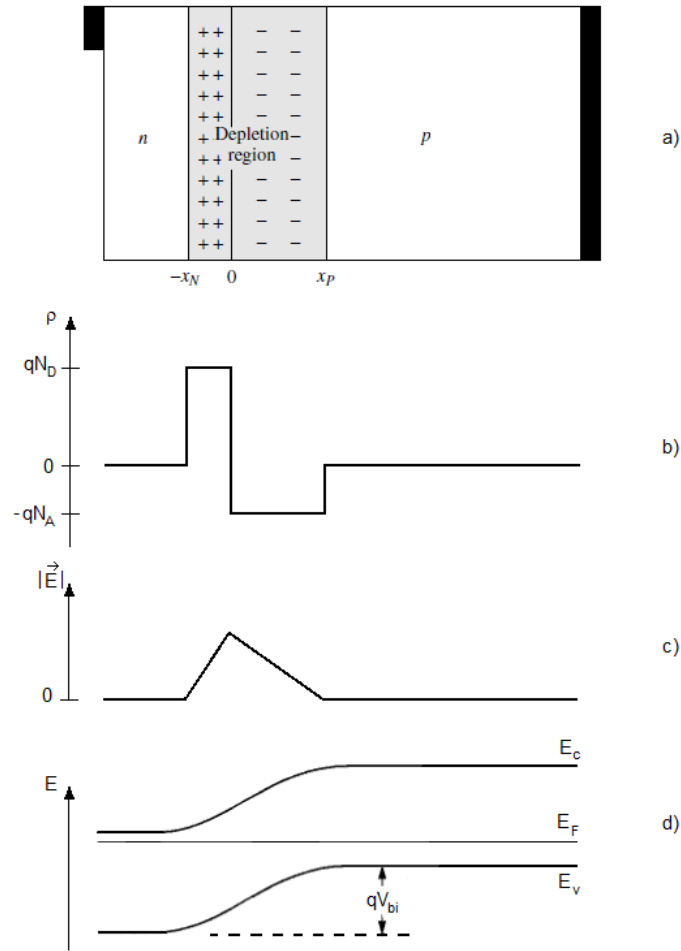


Figura 2.6: a) Esquema de una juntura p-n abrupta. b) Distribución de la densidad de carga. c) Campo eléctrico. d) Diagrama de las bandas de energía [1].

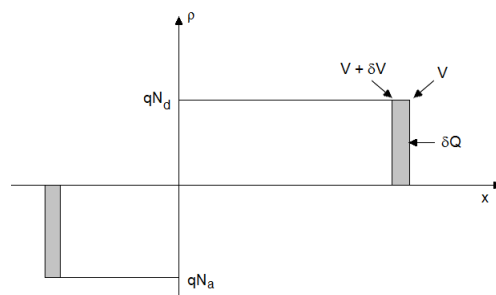


Figura 2.7: Cambio en la carga almacenada en la región de vaciamiento cuando se incrementa el voltaje aplicado [10].

1. Juntura abrupta.
2. En la región de vaciamiento son válidas las relaciones del Boltzman:

$$\begin{aligned} n &= n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \\ p &= p_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

donde E_F y E_i es la energía de Fermi y la energía de Fermi intrínseca, respectivamente, k la constante de Boltzman y T la temperatura.

3. Baja inyección, es decir, la densidad de portadores minoritarios es pequeña comparada con la densidad de portadores mayoritarios.
4. No existe generación de corriente en la zona de vaciamiento, y las corrientes de electrones y huecos son constantes en esta zona.

Usando estas aproximaciones en las ecuaciones diferenciales se obtiene la densidad de corriente total en condiciones de oscuridad ($G = 0$) [9]:

$$\begin{aligned} J_{total} &= J_0(e^{qV/kT} - 1) \\ J_0 &= \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \end{aligned} \quad (2.10)$$

donde n_{p0} es la densidad de electrones en equilibrio en la región p, p_{n0} es la densidad de huecos en equilibrio en la zona n, L_p y L_n son las longitudes de difusión de los portadores minoritarios, V la tensión de polarización. La ecuación 2.10 es la ecuación del diodo ideal, y a J_0 se denomina densidad de corriente de saturación del diodo.

Al iluminar la celda se crean pares electrón-hueco, cuya tasa de generación está dada por G . Una ulterior aproximación es asumir que esta tasa es uniforme a través de todo el dispositivo. Esto da como resultado la misma solución que en oscuridad más un término constante, J_L , denominado densidad de corriente fotogenerada [10]:

$$J_{total} = J_0(e^{qV/kT} - 1) - J_L \quad (2.11)$$

Estos resultados se muestran en la figura 2.8. La corriente se relaciona con la densidad de corriente a partir del área de la celda solar (A) como $I = AJ$. Algunos parámetros que se definen para caracterizar eléctricamente a una celda solar son [10]:

- **Corriente de cortocircuito (I_{cc}):** es el punto de la curva cuando $V=0$ e idealmente es igual a I_L .

- **Tensión de circuito abierto (V_{ca}):** corresponde a $I = 0$ y se puede calcular de la ec. (2.11) como:

$$V_{ca} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.12)$$

- **Factor de forma (FF):** se calcula a partir del punto de máxima potencia (I_{mp} y V_{mp}) como

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{I_{cc} V_{ca}} \quad (2.13)$$

- **Eficiencia (η):** está dada por

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} \quad (2.14)$$

donde P_{in} es la potencia de la luz incidente sobre la celda.

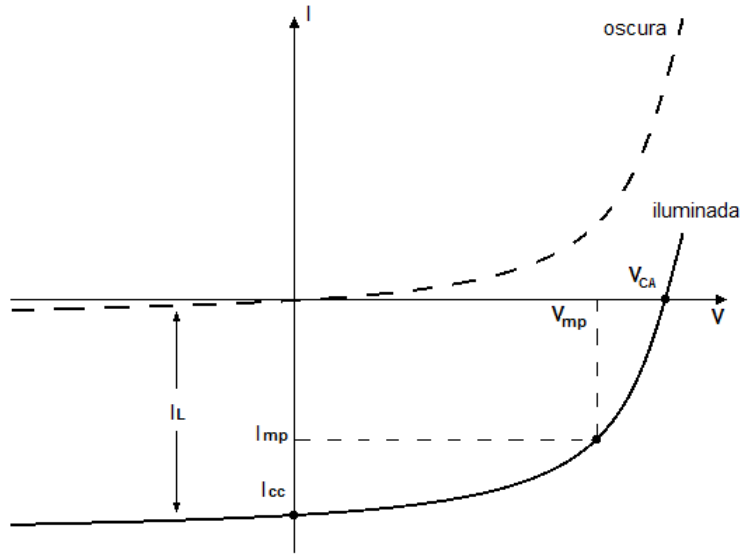


Figura 2.8: Curva I-V característica de una celda solar, en oscuridad (línea punteada) e iluminada (línea llena).

2.7. Circuito equivalente

Eléctricamente, la celda solar es equivalente a un generador de corriente en paralelo con una resistencia no lineal, es decir, un diodo (fig. 2.9a). Cuando es iluminada, la celda ideal produce una fotocorriente proporcional a la

intensidad de la luz. Esa fotocorriente se divide entre la resistencia variable del diodo y la carga, en una proporción que depende de la resistencia de carga y el nivel de iluminación. Para resistencias grandes, la mayor parte de la corriente fotoeléctrica fluye a través del diodo, resultando en una mayor diferencia de potencial entre los terminales de la celda, pero con una corriente pequeña a través de la carga [11].

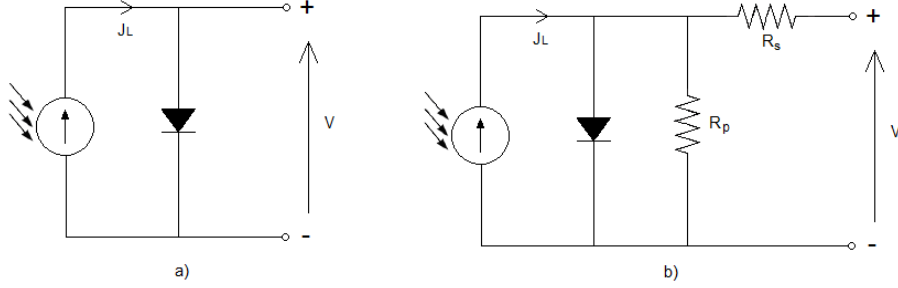


Figura 2.9: Circuito equivalente de una celda solar a) ideal y b) incluyendo resistencia serie (R_s) y paralelo (R_p).

En las celdas reales parte de la potencia se disipa a través de la resistencia de los contactos y en corrientes de fuga. Estos efectos son equivalentes eléctricamente a dos resistencias parásitas: una en serie (R_s) y otra en paralelo (R_p) con la celda (fig. 2.9b). La resistencia en serie surge de la resistencia del material de la celda al flujo de corriente, la resistencia de contacto metal-semiconductor y resistencia de los contactos en sí. Esta resistencia es un problema particular a grandes corrientes, por ejemplo, bajo luz concentrada. La resistencia paralelo surge de fugas de corriente a través de la juntura, alrededor de los bordes del dispositivo y entre los contactos eléctricos.

Las resistencias serie y paralelo reducen el factor de forma (FF) como se muestra en la figura 2.10. Para una celda solar eficiente se desea que R_s sea pequeña y R_p tan grande como sea posible.

Cuando las resistencias parásitas son consideradas, la ecuación del diodo ideal (ec. 2.11) se corrige según:

$$J = J_0(e^{q(V-JAR_s)/kT} - 1) - J_L + \frac{V - JAR_s}{R_p} \quad (2.15)$$

2.8. Respuesta espectral

La respuesta espectral, $SR(\lambda)$, de una celda solar indica como los fotones de diferente longitud de onda (energía) contribuyen a la corriente de cortocircuito. Se puede definir como la densidad de corriente de cortocircuito generada por una luz monocromática por unidad de potencia incidente [1]:

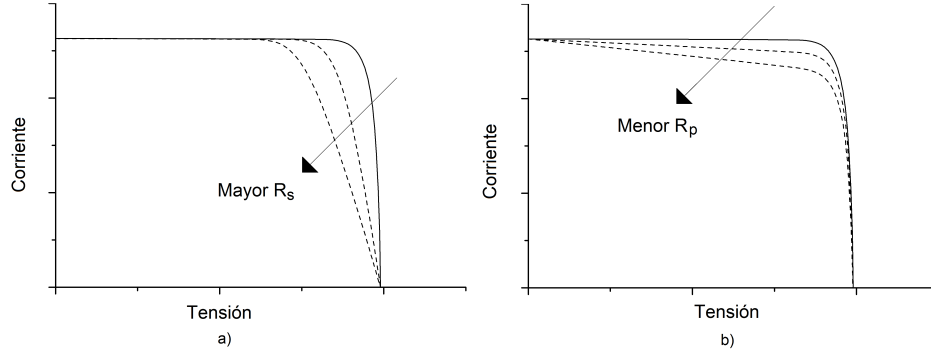


Figura 2.10: Efecto de a) incrementar la resistencia serie (R_s) y b) reducir la resistencia paralelo (R_p). En ambos casos, la curva con línea continua corresponde a $R_s = 0$ y $R_p = \infty$ [11].

$$SR(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{AE(\lambda)} \quad (2.16)$$

donde A es el área de la celda y $E(\lambda)$ la irradiancia con que se ilumina para una longitud de onda λ .

Despejando $I_{cc}(\lambda)$ de la ecuación anterior e integrando en λ , se obtiene:

$$I_{cc} = A \int SR(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (2.17)$$

Esta ecuación permite calcular la corriente de cortocircuito que una celda puede generar para un espectro arbitrario ($E(\lambda)$) si a priori se conoce su respuesta espectral. Además, como la relación entre la corriente de cortocircuito y la irradiancia es en términos generales lineal, si la intensidad del espectro se aumenta o disminuye M veces la corriente será afectada en la misma proporción:

$$I_{cc}^{Msoles} = MI_{cc}^{1sol} \quad (2.18)$$

Esto es válido siempre que los parámetros de la celda no sean afectados por el aumento de la irradiancia.

Capítulo 3

Celdas solares III-V

Los semiconductores III-V son los materiales creados a partir de los elementos de la tabla periódica de las columnas III y V, como por ejemplo: BN, BP, BAs, AlK, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, ZnN, InP, InAs y InSb. Estos semiconductores tienen varias características que los hacen especialmente adecuados para las celdas solares. Varios de ellos disponen de *band gaps* directos, y por lo tanto altos coeficientes de absorción, entre 1-2 eV que es de interés para las celdas solares; el GaAs con un *band gap* de 1,42 eV, y $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$, con un *band gap* de 1,85 eV, son los más importantes en el estado actual de las celdas comerciales. Dopar tipo n y tipo p estos materiales es relativamente sencillo, y pueden realizarse estructuras complejas con buenas cualidades cristalinas y optoelectrónicas por técnicas de crecimiento que permiten grandes volúmenes de producción, como MOCVD. Como resultado, las celdas III-V han alcanzado las eficiencias más altas en juntas simples (homojuntas). Aunque la eficiencia de la conversión de las juntas simples es sólo ligeramente superior a la alcanzada por las mejores celdas de silicio, la facilidad de crear estructuras complejas basadas en semiconductores III-V hace posible la fabricación de celdas multijuntura con eficiencias que exceden el 30 %, superando a cualquier dispositivo de junta simple [1].

Además, como estas celdas poseen una alta resistencia al daño por radiación, son particularmente aptas para aplicaciones espaciales. Como contra, tienen un alto costo de fabricación. En el marco de una misión satelital este costo se justifica, pero en aplicaciones terrestres no es viable a menos que se utilice con concentración de la radiación solar mayor a 400 soles. De hecho, es una de las tecnologías emergentes que con buena probabilidad tenga una inserción significativa en el mercado mundial.

3.1. Celda triple junta (TJ)

El concepto de la multijuntura requiere que los fotones incidentes sean dirigidos hacia la subcelda adecuada para la energía del fotón. La configuración más común es organizar las subceldas (homojunturas) en forma apilada, como se muestra en la figura 3.1, fabricándolas monolíticamente sobre un mismo sustrato, por ejemplo Ge. En este arreglo, la luz solar primero es absorbida por la subcelda de mayor *band gap* y luego, progresivamente, por las subceldas con menor *band gap*. Cada junta actúa como un filtro pasa bajos de energía de fotón, transmitiendo sólo la luz *sub-band gap*. Por lo tanto, tomando como ejemplo una triple junta como la de la fig. 3.1, los fotones con energía $h\nu > E_{g3}$ son absorbidos por esta junta, fotones con $E_{g2} < h\nu < E_{g3}$ son absorbidos por la segunda junta, y así siguiendo. Los *band gaps* deben ser decrecientes de la celda superior a la inferior y además todas las subceldas, exceptuando la última, tienen que ser transparentes a la luz debajo de sus *band gaps*.

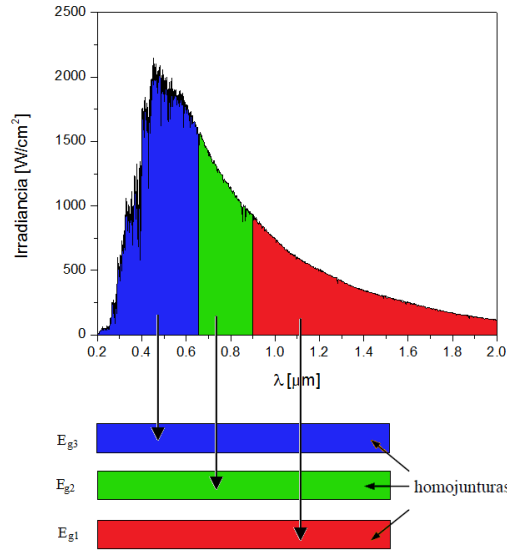


Figura 3.1: Esquema de una celda de triple junta

Dado que en una estructura monolítica un conjunto de m subceldas se encuentran conectadas en serie, si su respectiva curva I-V es $V_i(I)$ para el i -ésimo dispositivo, la curva I-V de la celda multijuntura está dada por:

$$V(I) = \sum_{i=1}^m V_i(I) \quad (3.1)$$

$$I = \min\{I_i\} \quad (3.2)$$

es decir, la tensión a una dada corriente es la suma de las tensiones de cada subcelda y, como están conectadas en serie, la corriente es la misma para todas y limitada por la subcelda que menos genera.



Figura 3.2: Celda solar de triple juntura InGaP/GaAs/Ge de la empresa *Emcore Photovoltaics* utilizada en este trabajo.

Unas de las celdas utilizadas en este trabajo es una celda comercial de triple juntura InGaP/GaAs/Ge *advanced triple junction* (ATJ) fabricada por la empresa *Emcore Photovoltaics* [12] (figura 3.2), diseñada para aplicaciones espaciales y la cual fue utilizada para los paneles solares del satélite SAC-D/Aquarius [13]-[16]. Cada subcelda está formada por varias capas semiconductoras, las que están crecidas monolíticamente sobre un sustrato de germanio (Ge). La celda solar posee tres junturas principales, conectadas en serie mediante junturas túnel, que aprovechan cada región del espectro. Un corte transversal de esta celda se muestra en la figura 3.3. Las subceldas *top* y *middle* tienen además una capa superior llamada ventana y una inferior denominada BSF (*back surface field*). La función de la ventana es pasivar los estados superficiales asociados a la superficie del emisor, los cuales constituyen trampas para los portadores minoritarios. A su vez, la capa BSF sirve para pasivar la interfaz entre la subcelda y la juntura túnel, reduciendo la difusión de dopantes desde la juntura túnel [17].

Las celdas ATJ tienen una eficiencia BOL (*beginning of life*) mínima promedio de 27.5 % y una superficie de 27,54cm². Los valores típicos de sus parámetros eléctricos, iluminadas con el espectro AM0 y a 28°C, son: $I_{cc}=474\text{mA}$, $V_{ca}=2.6\text{V}$ y $\text{FF}=84\%$. La celda ATJ utilizada en este trabajo fue adquirida con un certificado de calibración, tanto de la corriente de cortocircuito en condiciones normalizadas como en la respuesta espectral de cada subcelda. En condiciones BOL la subcelda de InGaP está diseñada para que sea la subcelda que limite en corriente (bajo el espectro AM0) y que en condiciones EOL (*end of life*, 1MeV electrones, $1\times 10^{15}\text{ e/cm}^2$), las subceldas *top* y *middle* posean la misma corriente.

La respuesta espectral dada por el fabricante de la celda de triple juntura se muestra en la figura 3.4. Se puede observar cómo cada subcelda tiene un rango definido de absorción entre 350-1800nm.

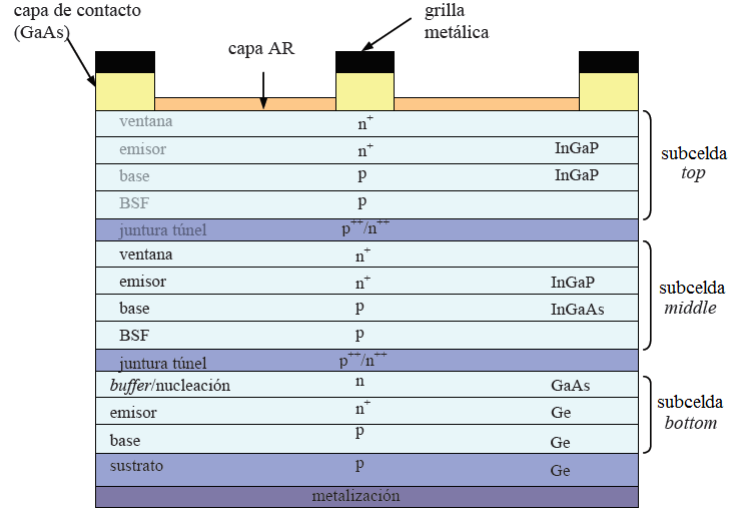


Figura 3.3: Estructura de una celda ATJ InGaP/GaAs/Ge Emcore [17].

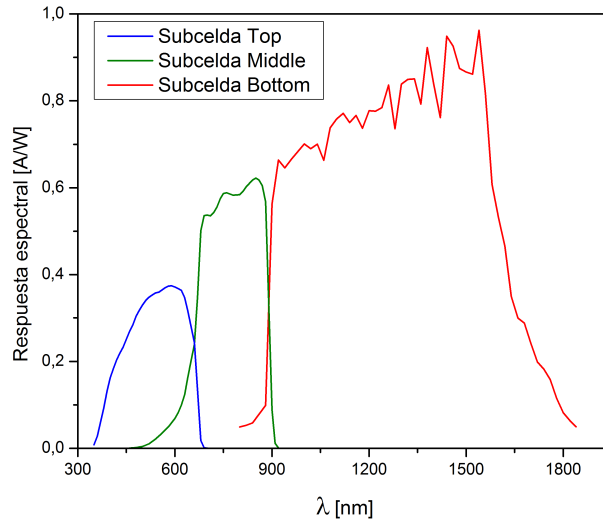


Figura 3.4: Respuesta espectral de la celda de triple junta InGaP/GaAs/Ge Emcore dada por el fabricante.

3.2. Celdas isotipo

Las celdas isotipo son celdas de una única juntura que tienen la misma respuesta espectral relativa que cada subcelda de la TJ. Es decir, hay una celda isotipo *top*, una *middle* y una *bottom*. Este tipo de celdas fueron provistas por el mismo fabricante de la celda TJ y también están calibradas en I_{cc} y respuesta espectral. Sus corrientes de cortocircuito calibradas (espectro AM0 y 28°C) son: $I_{cc}^{top} = 463\text{mA}$, $I_{cc}^{mid} = 517\text{mA}$ y $I_{cc}^{bot} = 879\text{mA}$.

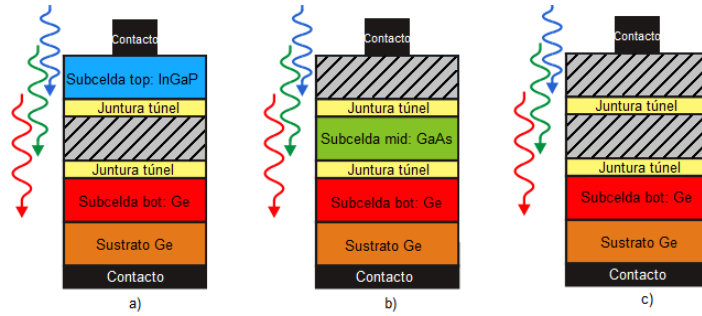


Figura 3.5: Esquema de las estructuras de las celdas isotipo a) *top*, b) *middle* y c) *bottom*. Las subceldas en color gris no aportan a la fotocorriente ni a la tensión de la celda.

Una esquema de la estructura de estas tres celdas se muestra en la figura 3.5. Básicamente son celdas TJ a las cuales se les “desactivaron” las subceldas (es decir, no aportan a la fotocorriente ni a la tensión de la celda) no deseadas. Sin embargo, por algún motivo no informado, el fabricante dejó activa la subcelda de Ge en las celdas isotipo *top* y *middle*, por lo que estas celdas en realidad son doble juntura y la celda isotipo/subcelda *bottom* es una homojuntura. A pesar que algunas subceldas están deshabilitadas desde el punto de vista eléctrico, funcionan como filtros ópticos absorbiendo la misma porción del espectro que en una celda TJ. Esto hace que su comportamiento sea prácticamente el mismo que cada subcelda en la TJ.

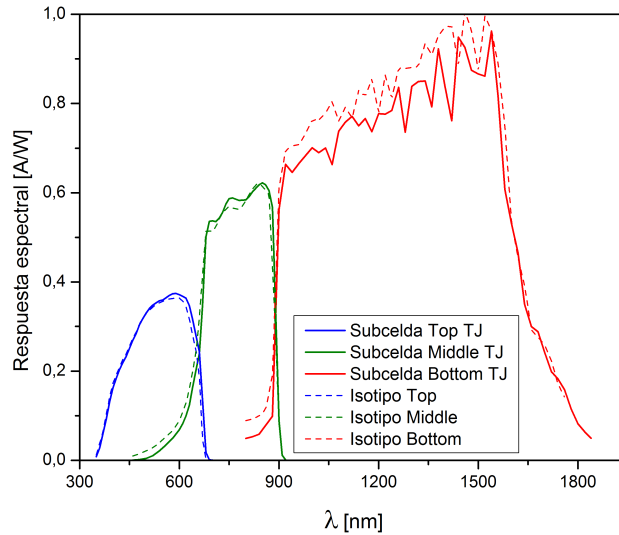


Figura 3.6: Comparación entre la respuesta espectral de las celdas isotipo y la triple juntura.

En la figura 3.6 se muestran las respuestas espectrales de las celdas isotipo

comparadas con las de las subceldas de la triple juntura. La subcelda *top* y *middle* de la TJ tiene prácticamente la misma respuesta espectral que las celdas isotipo correspondientes. En cambio, la celda isotipo *bottom* tiene una mayor respuesta espectral que la misma subcelda en la TJ. Esto tiene como consecuencia que frente al mismo espectro de iluminación, la celda isotipo *bottom* generará una mayor corriente que la misma subcelda en la TJ. Por ejemplo, para el espectro AM0 la diferencia en la I_{cc} es del 9 %.

Capítulo 4

Mediciones con simuladores solares de luz continua

En este capítulo se expondrán las primeras mediciones de las curvas I-V realizadas con las celdas isotipo y la celda TJ. Las fuentes luminosas utilizadas fueron una lámpara dicróica y un simulador solar basado en lámparas de Xe e incandescentes. También se realizaron mediciones a oscuras. A partir de las mediciones realizadas con la lámpara dicróica sobre las celdas isotipo se estimaron las curvas de las tres subceldas de la triple juntura y, sumándolas, se hicieron las estimaciones de la curva I-V de la celda TJ con los distintos espectros utilizados. Finalmente, se muestra un modelo eléctrico semiempírico de la celda TJ.

4.1. Generación de la curva I-V de una triple juntura a partir de celdas isotipo

El objetivo fue tratar de reconstruir la curva I-V de la celda triple juntura a partir de mediciones realizadas con las celdas isotipo. Para esto, se va hacer uso de un método similar al realizado en la referencia [18].

Dada una fuente de luz continua, se miden las curvas I-V de las 3 celdas isotipo a temperatura controlada. Debido a que las celdas isotipo *top* y *middle* tienen la subcelda de germanio (*bottom*) activa, hay que restársela. Para realizar esto, se supone que dicha subcelda no está limitando en corriente (lo que ocurre para cualquier espectro de iluminación similar al solar). Por lo tanto, para estimar la curva I-V de la subcelda *top* a partir de las curvas I-V de las celdas isotipo *top* y *bottom*, se restan las tensiones de estas dos curvas para valores de corrientes constantes. Análogamente para la subcelda *middle*.

De esta manera se tienen las 3 curvas I-V de cada subcelda, de las cuales 2 fueron estimadas y 1 medida directamente. Cabe aclarar que la forma de

estas curvas no dependen del espectro utilizado, el cual modifica la corriente de cortocircuito desplazando la curva verticalmente (ec. (2.18)).

Finalmente, para obtener la estimación de la curva I-V de la celda triple junta, hay que sumar estas 3 curvas. Esto se realiza sumando las tensiones de las 3 curvas para niveles de corrientes constantes.

Para estimar la curva I-V de la triple junta bajo otro espectro de iluminación, no hace falta realizar todo el procedimiento de nuevo. Solamente basta medir las corrientes de cortocircuito de cada celda isotipo¹ y desplazando las 3 curvas de las subceldas anteriores a dichos valores, se suman y se obtiene la curva deseada. Esto es válido siempre que se mantenga la condición que la subcelda *bottom* no sea la que limite en corriente.

La similitud entre la curva I-V medida y la estimada se puede calcular utilizando el error cuadrático medio de las desviaciones de cada punto I-V. La corriente se usa para calcular diferencias en la zona plana de la curva I-V y el voltaje se usa después del punto de máxima potencia [19]:

$$\begin{aligned} \text{Error RMS} = & \left[\frac{1}{N_{mp}} \sum_{i=1}^{N_{mp}} \left(\frac{I(V_i) - \hat{I}(V_i)}{I(V_i)} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{N - N_{mp}} \sum_{i=N_{mp}+1}^N \left(\frac{V(I_i) - \hat{V}(I_i)}{V(I_i)} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde N es el número de puntos entre I_{cc} y V_{oc} , N_{mp} es la cantidad de puntos utilizados para evaluar las diferencias en corriente, y $N - N_{mp}$ es el número de niveles de corriente al cual la diferencia del voltaje es evaluado. Los puntos de 1 a N_{mp} cubren la zona de la curva I-V desde la corriente cortocircuito al punto de máxima potencia. El símbolo circunflejo ($\hat{}$) indica los valores estimados.

4.2. Medición con una lámpara dicroica

El primer simulador solar utilizado para realizar las mediciones fue una lámpara dicroica de 250W-24V montada sobre un brazo flexible, la cual es alimentada por una fuente de tensión continua (regulada y estabilizada de 0-50V, 50A). Además cuenta con 2 ventiladores instalados para su correcta refrigeración.

4.2.1. Homogeneidad

Primero se realizó un análisis para determinar si la lámpara dicroica puede ser considerada un simulador solar en condiciones normalizadas de

¹O calcularlas mediante la ecuación 2.17 si el espectro es conocido.

acuerdo con la norma ASTM E927 [20]. Esta norma indica una serie de parámetros a medir para determinar la clase de simulador solar (A, B o C), a saber:

1. Contenido espectral
2. Estabilidad temporal
3. Uniformidad espacial

El contenido espectral no fue posible evaluarlo porque no se contaba con el espectro de dicha lámpara. Sin embargo, estas lámparas tienen un reflector que refleja la luz visible pero no la infrarroja. Por lo que es esperable que el espectro sea pobre en esas longitudes de ondas.

Como el tiempo de medición de una curva I-V típicamente es de un 1seg, se despreciaron las variaciones de intensidad que pueda haber en ese tiempo.

Por lo tanto, de las 3 condiciones, se puso mayor énfasis en la uniformidad espacial.

Para la medición de la homogeneidad se utilizó un sensor de silicio de $6.8mm^2$, fabricado en el DES, como se muestra en la figura 4.1. Se le conectó una resistencia de 20Ω para que se polarice en un punto próximo a la corriente de cortocircuito. Dicha corriente fue medida con un multímetro a través de la caída de tensión de la resistencia. La altura de la lámpara dicróica se estableció para que la celda de triple juntura calibrada tenga una corriente de cortocircuito similar a la dada por el fabricante.

La medición consistió en desplazar el sensor por la superficie de la base termostatzada (a temperatura ambiente) obteniendo los valores de corriente en diferentes puntos de la misma. Con estos valores se realizó un gráfico de curvas de nivel normalizado al máximo valor medido, que se muestra en la figura 4.2.

Para calcular la no uniformidad sobre el área de trabajo, la norma ASTM E927 establece la siguiente relación:

$$\text{no uniformidad} = \pm 100 \left(\frac{\text{irradiancia máxima} - \text{irradiancia mínima}}{\text{irradiancia máxima} + \text{irradiancia mínima}} \right) \quad (4.2)$$

y los simuladores se clasifican como $A \leq \pm 2\%$, $B \leq \pm 5\%$ y $C \leq \pm 10\%$.

Utilizando esta relación y tomando un área similar a la de las celdas, se obtuvo una no uniformidad de $\pm 14\%$. En principio no llega a clasificar como simulador solar C, pero si se tiene mayor cuidado de centrar el spot de la lámpara en la base podría alcanzarse una mejor uniformidad.

Se puede decir que las mediciones con la lámpara dicróica están fuera de norma, pero esto no es esencial ni presenta ningún inconveniente para este trabajo.

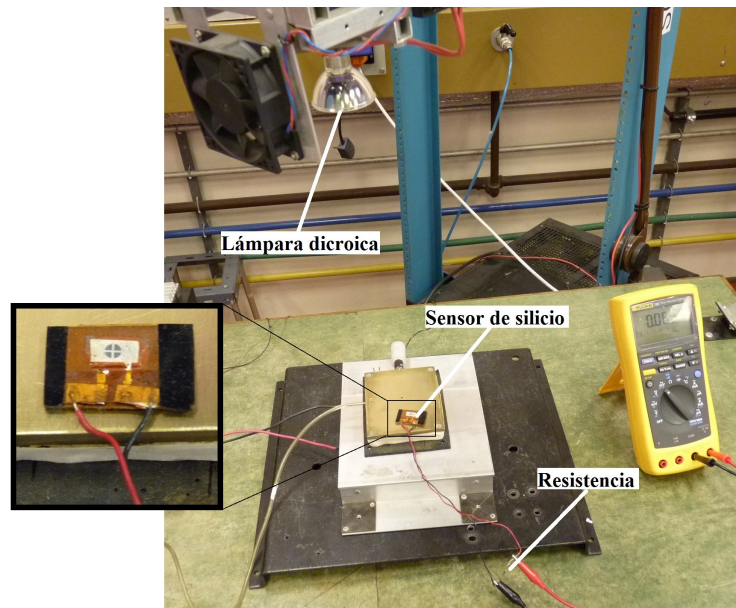


Figura 4.1: Imagen de la lámpara dicroica y el sensor de silicio utilizado para medir la homogeneidad sobre la base termostatizada, donde luego se colocan las celdas a medir.

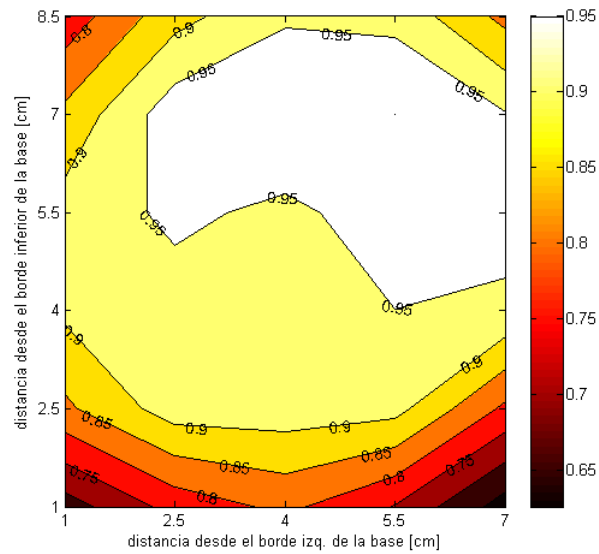


Figura 4.2: Gráfico de la homogeneidad de la lámpara dicroica medida sobre la base donde se coloca la celda.

4.2.2. Curvas I-V

Para las mediciones de las curvas I-V se utilizó el método de 4 puntas, el cual elimina las resistencias de los cables obteniéndose una medición más

confiable. Mediante dos de las puntas se aplica una tensión a la celda, y con las otras dos se mide la corriente que genera. Un esquema de conexiones se muestra en la figura 4.3.

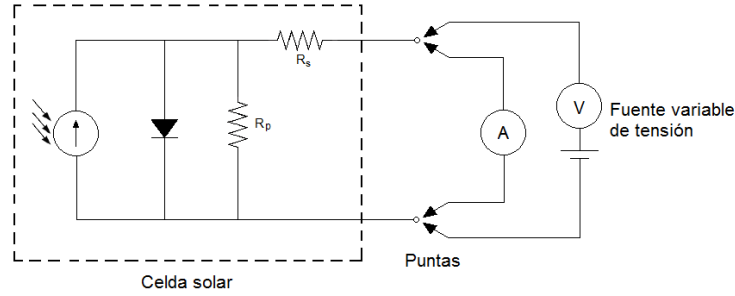


Figura 4.3: Esquema de conexión de 4 puntas utilizado para la medición de la curva I-V de las celdas solares, iluminándolas con una fuente de luz continua.

Antes de realizar las mediciones, se deja estabilizar la lámpara dicroica y los elementos de medición por unos 20min aprox. Para medir la curva I-V de una celda, la misma se apoya sobre la base termostatzada de bronce, teniendo el cuidado de que el spot de la lámpara esté centrado con la celda. El contacto eléctrico frontal se realiza mediante dos puntas, que hacen una cierta presión, colocadas sobre dos de los cuatro contactos frontales de la celda (ver fig. 3.2), y el contacto eléctrico posterior se realiza con la base de bronce, generando vacío entre ambos por un orificio practicado en dicha base. El arreglo experimental se muestra en la figura 4.4.

El control de la temperatura de la base de bronce se realiza con una celda Peltier ubicada debajo de dicha base y tomando mediciones de un sensor (termoresistencia) colocado en el interior de la base. De esta manera mantiene a la celda en la temperatura de trabajo deseada.

Se utilizó un SMU (*source-meter unit*) Keithley 2602A como fuente de tensión variable y amperímetro al mismo tiempo. Posee cuatro puntas, con dos de las cuales aplica la tensión a la celda y con el otro par mide la corriente generada por ella. Este dispositivo se conecta a una PC (que no se alcanza a observar en la figura 4.4) mediante un cable de red, y con el *software* de adquisición del SMU, es posible configurar y realizar la medición de la curva I-V. El *software* permite establecer la tensión inicial, la tensión final y el paso de la misma, entre otros parámetros. Una medición típica de una celda con 100 puntos demora ~ 1 seg.

Se midieron las 4 celdas, las 3 isotipo y la triple juntura, a una temperatura de 28°C. Las curvas obtenidas se muestran en la figura 4.5. Se puede observar que la subcelda que limita en corriente es la *middle*. Es esperable que la corriente de cortocircuito de dicha celda y la triple juntura sean iguales, sin embargo la pequeña diferencia apreciable en el gráfico ($\sim 1\%$)

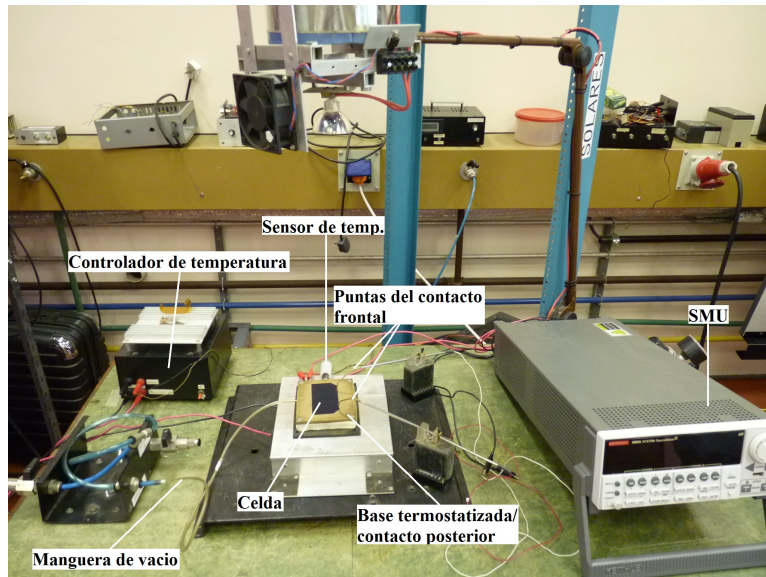


Figura 4.4: Fotografía del arreglo experimental de la medición con la lámpara dicróica.

puede ser debido a pequeñas diferencias en la RE de la celda isotipo y la correspondiente subcelda en la TJ, o bien a una fluctuación de intensidad de la lámpara entre las mediciones.

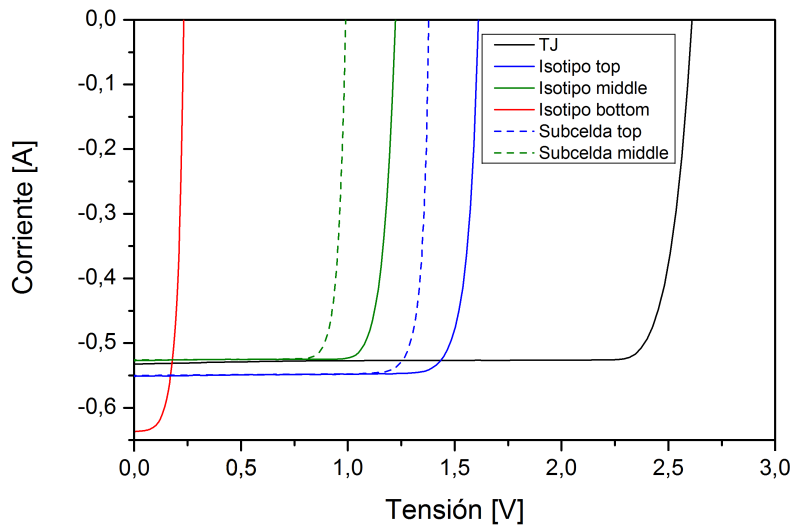


Figura 4.5: En línea llena se muestran las curvas medidas de las celdas isotipo y la TJ con la lámpara dicróica a 28°C; y con línea punteada las curvas estimadas de las subceldas *top* y *middle*.

En la tabla 4.1 se muestran los parámetros extraídos de las curvas me-

didadas. La resistencia serie (R_s) y la resistencia paralelo (R_p) se obtuvieron ajustando linealmente los puntos cercanos a V_{ca} y a I_{cc} , respectivamente.

Tabla 4.1: Parámetros de las curvas I-V medidas con la lámpara dicroica

Celda	$I_{cc}^{\dagger}$ [mA]	$V_{ca}^{\S}$ [V]	R_s [m Ω]	R_p [Ω]
Isotipo top	551	1,61	130 $\pm$ 10	310 $\pm$ 10
Isotipo middle	527	1,22	140 $\pm$ 10	470 $\pm$ 30
Isotipo bottom	636	0,23	50 $\pm$ 2	45 $\pm$ 10
TJ	532	2,61	220 $\pm$ 10	350 $\pm$ 20

† Error menor a 0,3 %.

§ Error menor a 0,2 %.

Se creó un código en Matlab para realizar la sustracción de la curva de la subcelda *bottom* a las curvas isotipo *top* y *middle*, de acuerdo a lo explicado en la sección 4.1. De esta manera se obtuvo una estimación de las curvas de dichas subceldas, las cuales se muestran en la figura 4.5. Similarmente se hizo otro código en Matlab para sumar estas 2 curvas junto con la subcelda *bottom* para estimar la curva I-V de la celda TJ bajo estas condiciones de iluminación. El resultado se muestra en la figura 4.6. La diferencia entre ambas curvas en V_{ca} es de 10mV ($< 1\%$) y en el punto de máxima potencia de 0,01W ($< 1\%$). Utilizando la ecuación 4.1, el error total RMS fue de 0,45 %. Este valor es muy bueno, ya que en otros trabajos los mejores valores obtenidos fueron de 0,53 % [19], aunque realizados bajo otras condiciones de medición.

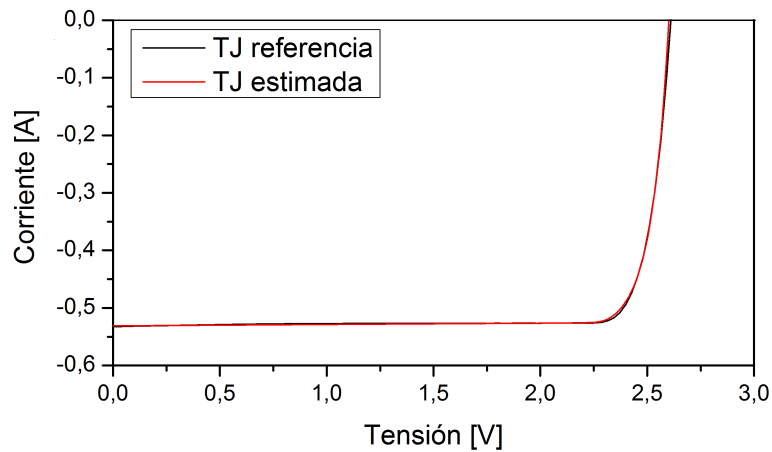


Figura 4.6: Curva I-V de la celda TJ de referencia iluminada con una lámpara dicroica a 28°C y la curva estimada a partir de las celdas isotipo.

A partir de las curvas de las subceldas *top*, *middle* y *bottom* obtenidas en esta sección, se intentará predecir la curva I-V de la celda TJ bajo otros espectros de iluminación. Esto es lo que se detalla en el resto del trabajo.

4.3. Medición con el simulador TS-Space

El DES dispone de un simulador solar TS-Space 'close match' AM0, que tiene 2 lámparas de xenón de 1kW que simulan el espectro solar entre 300 y 700nm, y 4 lámparas incandescentes que simulan el espectro entre 700 y 1900nm, como se muestra en la figura 4.7. Cada lámpara tiene una fuente de alimentación regulada, que tiene una realimentación óptica a partir de una muestra de la irradiancia que provee un prisma ubicado abajo de cada lámpara y una fibra óptica que lleva esta señal hasta el controlador. Tiene una estabilidad temporal y no uniformidad espacial de $\pm 2\%$.

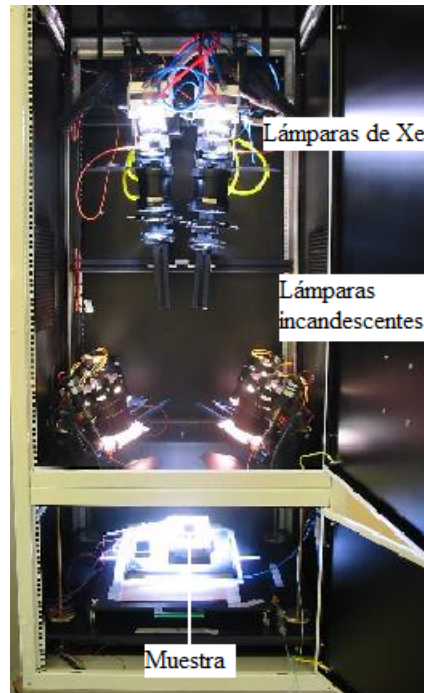


Figura 4.7: Foto del simulador solar TS-Space.

4.3.1. Curvas I-V

Al igual que con la lámpara dicróica, se midieron las 4 celdas solares (las 3 isotipo y la triple juntura) utilizando este simulador a una temperatura

controlada de 28°C y utilizando el mismo método de medición detallado anteriormente.

En la figura 4.8 se muestran las curvas medidas. Se puede observar que en este caso la que limita en corriente es la subcelda *top*, como era de esperar dado que este simulador reproduce bastante fielmente el espectro AM0, por lo que el espectro es cualitativamente diferente al de la lámpara dicróica donde limitaba la subcelda *middle*. Con este espectro la subcelda *bottom* está generando casi el doble de corriente que las otras 2 celdas. Las oscilaciones en las curvas se deben a pequeñas fluctuaciones en la intensidad de las lámparas de Xe. Esto no se observa en la celda isotipo *bottom* debido a que es sensible a la parte infrarroja del espectro, que es aportada por las lámparas incandescentes del simulador.

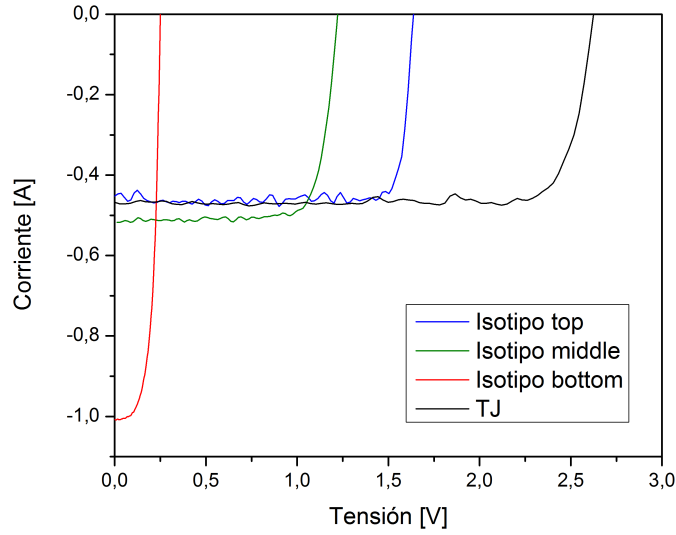


Figura 4.8: Curvas I-V medidas con el simulador solar TS-Space a 28°C.

En la tabla 4.2 se muestran los parámetros extraídos de las curvas de la figura 4.8. La corriente de cortocircuito se calculó promediando los puntos cercanos a $V = 0$ por las fluctuaciones de las mediciones.

Para predecir la curva de la celda TJ bajo este nuevo espectro, se usaron las curvas de las 3 subceldas estimadas con la lámpara dicróica y se les asignaron los valores de I_{cc} medidos con este simulador. Luego, se utilizó el código de Matlab para sumar estas 3 curvas y obtener la triple juntura. El resultado obtenido se muestra en la figura 4.9. Se observa una diferencia en las pendientes cerca de V_{ca} , es decir, en la resistencia serie (R_s). Eso se puede explicar, si se compara el valor de R_s de la TJ de esta medición (tabla 4.2) con el de la dicróica (tabla 4.1), por una diferencia de $0,1\Omega$ aprox. en dicha resistencia. Esta discrepancia puede ser debido a diferencias en el contacto eléctrico de la cara posterior de la celda con la base, cuya resistencia de

Tabla 4.2: Parámetros de las curvas I-V medidas con el simulador TS-Space.

Celda	I_{cc} [mA]	V_{oc} [†] [V]	R_s [m Ω]
Isotipo top	464 $\pm$ 14	1,64	160 $\pm$ 10
Isotipo middle	513 $\pm$ 6	1,22	200 $\pm$ 10
Isotipo bottom	1008 $\pm$ 5	0,25	46 $\pm$ 2
TJ	469 $\pm$ 5	2,62	330 $\pm$ 13

[†] Error menor al 0,2 %.

contacto no puede ser evitada por la configuración de puntas utilizada. Por lo tanto, se hizo una corrección a la curva estimada restándole a la tensión de cada punto de la curva el producto $I.R$, con I el valor de la corriente de dicho punto y $R=0,1\Omega$. La curva corregida se muestra en la figura 4.9 y se observa que la estimación mejora sensiblemente.

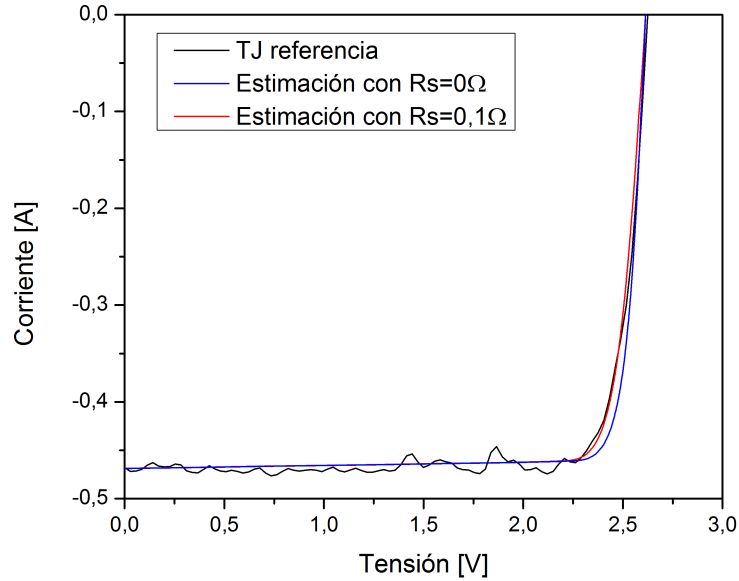


Figura 4.9: Curva I-V de la celda TJ de referencia iluminada con el simulador TS-Space a 28°C y las curvas estimadas con y sin resistencia serie adicional.

4.3.2. Análisis espectral

Como simple verificación, se calcularon las corrientes de cortocircuito de cada subcelda a partir de los datos de RE de las celdas y el espectro del

simulador, y se las compararon con los valores medidos de las celdas isotipo.

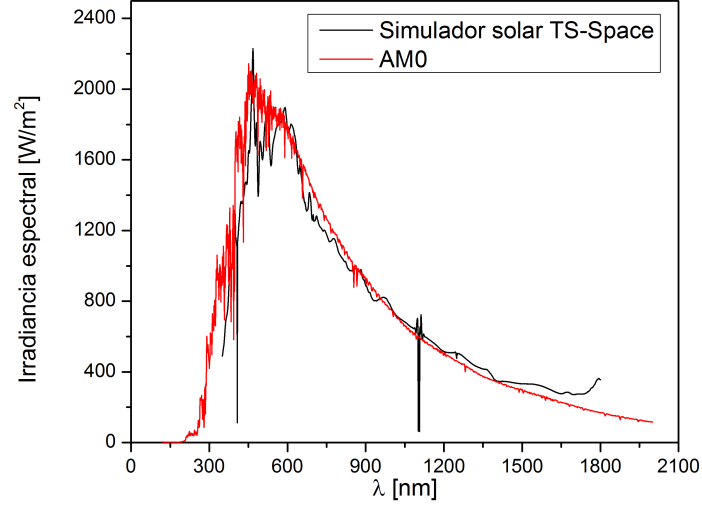


Figura 4.10: Espectro del simulador solar TS-Space comparado con AM0.

Esto se realizó haciendo uso del espectro dado por el fabricante del simulador solar (figura 4.10) y de las respuestas espectrales de las celdas isotipo. Utilizando la ecuación (2.17), se calcularon las corrientes de cortocircuito realizando la integral de forma numérica utilizando Matlab, con el método de integración trapezoidal. Estos resultados se muestran en la tabla 4.3 y se los compara con los valores de corrientes de cortocircuito medidos con cada celda isotipo. Si bien los valores son muy similares, las pequeñas diferencias observadas pueden deberse a que el simulador solar se calibra antes de realizar las mediciones utilizando celdas isotipo calibradas en su corriente de cortocircuito, que definen por lo tanto un valor para la integral del espectro en la sección en que responden. Por lo tanto, la distribución espectral real no necesariamente es exactamente igual a la proporcionada por el fabricante.

Tabla 4.3: Corrientes de cortocircuito de las subceldas calculadas con los datos del fabricante y las medidas con el simulador solar TS-Space.

Subcelda	Ec. 2.17 [mA]	Exp. [mA]
Top	466	464±14
Middle	533	513±6
Bottom	1032	1008±5

4.4. Medición en oscuridad

Otra forma de poner a prueba la predicción del modelo, fue estimar la curva I-V de la celda TJ en oscuridad. En este caso, se puede estimar la curva de la celda TJ de dos maneras: a) de las curvas de las subceldas obtenidas con la lámpara dicróica, se desplazan sus corrientes de cortocircuito a 0 y se suman para obtener la estimación; y b) se miden las celdas isotipo en oscuridad, se obtienen las curvas de las subceldas (como se hizo con las mediciones de la lámpara dicróica) y sumándolas se obtiene la estimación.

Por lo tanto, se procedió a medir las curvas I-V de las celdas isotipo y la TJ en oscuridad de la misma manera en que se realizaron las mediciones con la lámpara dicróica (figura 4.4), pero cubriendo a las celdas de la luz ambiente. Cabe destacar que en este caso, a diferencia de cuando la celda está iluminada y generando tensión y corriente, el SMU deberá entregar la corriente necesaria a la celda de acuerdo a la polarización que se aplique, es decir, actúa como fuente de tensión y corriente.

A partir de las mediciones de las celdas isotipo en oscuridad, se obtuvieron las curvas de las tres subceldas a oscuras utilizando el procedimiento descrito en la sección 4.1. Luego, se sumaron con el código de Matlab y se obtuvo la primera estimación de la celda TJ en oscuridad. La segunda estimación se realizó sumando las curvas de las subceldas obtenidas con la lámpara dicróica, previo desplazamiento de las mismas a corriente 0 para $V=0$. Ambas estimaciones y la medición de la celda TJ en oscuridad, se muestran en la figura 4.11. De las 2 estimaciones, la que mejor ajusta es la realizada con las subceldas iluminadas, pero hay una diferencia apreciable entre ambas estimaciones.

La medición en oscuridad es muy distinta a medir con luz incidiendo sobre la celda, pues en el primer caso uno está inyectándole corriente a la celda y en el segundo caso la celda la está generando. Por lo tanto el comportamiento físico de la celda es totalmente distinto, y puede haber diferencias en las mediciones.

4.5. Modelo eléctrico de la celda triple juntura

Como un paso intermedio para luego hacer un modelo dinámico de la celda TJ (bajo luz pulsada), primero se consideró un modelo eléctrico estacionario de la celda, es decir, simulando estar iluminada bajo luz continua. Para esto, se partió del modelo de un diodo y se utilizó un *software* de simulación de circuitos utilizado en electrónica llamado Pspice [21]. Como la celda a modelar contiene tres subceldas, se propuso un modelo como el de la figura 4.12 [19], donde I_L^{top} , I_L^{mid} , I_L^{bot} son las corrientes fotogeneradas en cada subcelda y V_{top} , V_{mid} , V_{bot} sus voltajes internos.

Este modelo es muy simple para algunos propósitos de modelado, ya

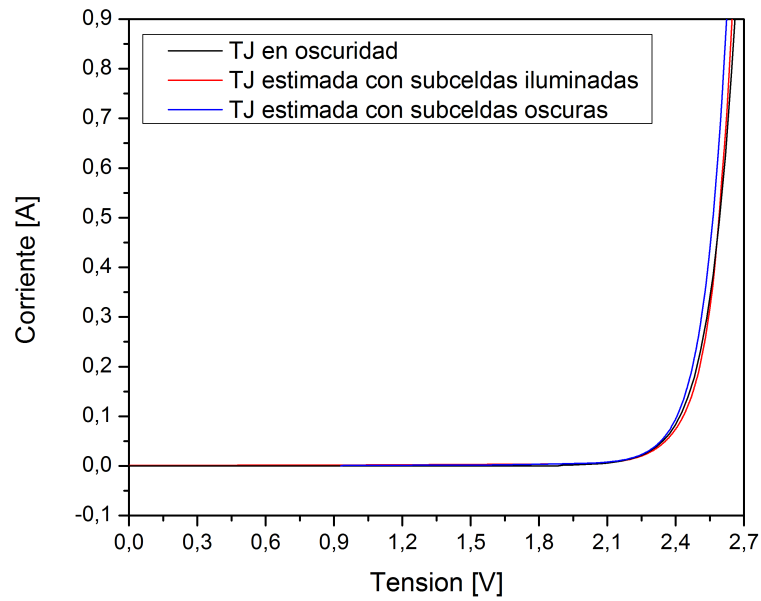


Figura 4.11: Curva I-V de la celda TJ medida en oscuridad y 2 estimaciones de la misma.

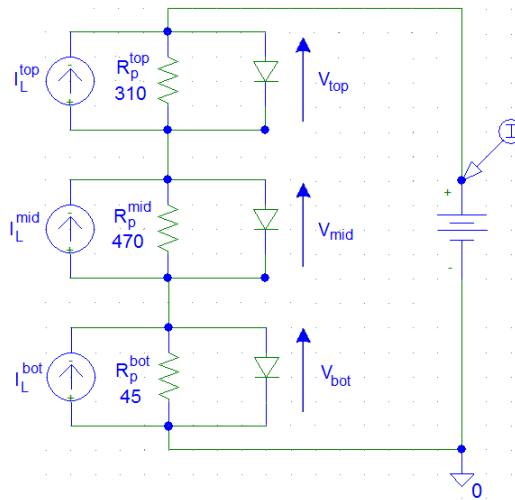


Figura 4.12: Circuito eléctrico utilizado en Pspice para simular la celda TJ.

que no tiene en cuenta las junturas túnel o efectos distribuidos en la celda que son necesarios para la optimización de la estructura. Sin embargo, el modelo es sensible a cambios de irradiancia y espectro, permitiendo predecir el comportamiento de la celda solar para diferentes condiciones.

El *software* Pspice permite modelar la curva I-V de los diodos a partir de una curva que el usuario ingresa en el programa. Por lo tanto, se modelaron los 3 diodos con las curvas de las subceldas obtenidas con la lámpara dicroica (figura 4.5), para que cada uno represente adecuadamente cada subcelda de la celda TJ bajo estudio. Este modelado de los diodos lo realiza el programa extrayendo de las curvas experimentales diferentes parámetros que definen la curva I-V de un diodo, como por ejemplo: factor de idealidad, resistencia serie, corriente de saturación, entre otros. Como la resistencia paralelo de cada subcelda no es tomada en cuenta en el modelado de los diodos, se agrega explícitamente en el modelo eléctrico, no así la resistencia serie.

En el modelo eléctrico de la celda TJ (figura 4.12) se agregó una fuente de tensión continua, la cual permite hacer el barrido de tensión y con un amperímetro medir la corriente que circula.

Para verificar si el modelo funciona correctamente, se colocaron los valores de los generadores de corriente iguales a las corrientes de cortocircuito de las subceldas medidas con la lámpara dicroica y se comparó esta simulación con la curva estimada de la TJ realizada con Matlab. El resultado se muestra en la figura 4.13. Como se puede apreciar, la simulación del Pspice es prácticamente la misma a la estimada con Matlab, lo cual era esperable pues sólo se cambió la forma de sumar las curvas de las subceldas: en un caso numéricamente y en otro por medio de la simulación circuital.

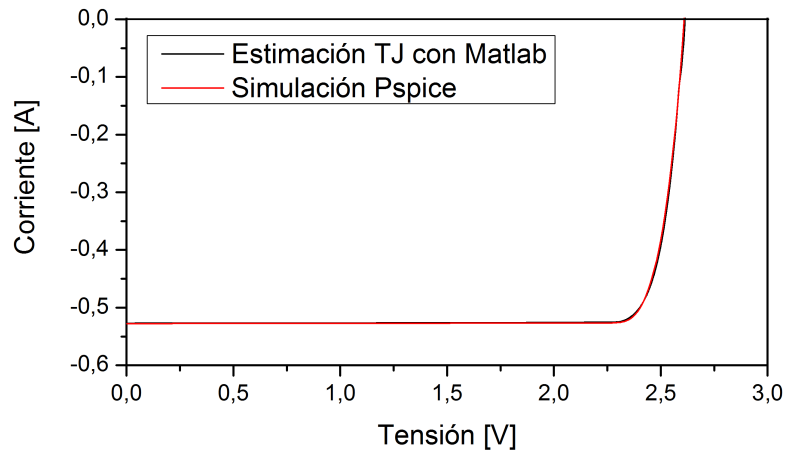


Figura 4.13: Comparación entre la curva I-V de la celda TJ estimada con Matlab y con la simulación del Pspice.

De esta manera se tiene un modelo eléctrico de la celda TJ que representa razonablemente bien la celda en estudio. Luego, este modelo se va a modificar para tratar de predecir su comportamiento bajo un pulso de iluminación del orden del milisegundo, tal como se verá en el capítulo 6.

Capítulo 5

Mediciones con un simulador solar de luz pulsada

En este capítulo se puso a prueba el método de predicción de la curva I-V de la celda TJ bajo el espectro de un flash de Xe pulsado. Como se trata de un pulso de luz, hay que cambiar ligeramente la forma de medición utilizada con los simuladores solares de luz continua. A continuación, se describe el procedimiento de medición, y se muestra la curva I-V de la celda TJ obtenida con este espectro. Finalmente se la compara con la predicción del método desarrollado, obteniéndose resultados satisfactorios.

5.1. Flash de Xe pulsado

A la hora de medir paneles solares relativamente grandes es común la utilización de flashes pulsados, ya que pueden generar mucha potencia a la vez que iluminan grandes áreas, aunque solo pueden hacerlo durante un tiempo muy corto.



Figura 5.1: Flash de Xe similar al utilizado en este trabajo.

El DES cuenta con un flash con lámpara de arco de Xe de 1500W (modelo XOP 15-OF), similar al de la figura 5.1. Este tipo de lámparas pueden emitir radiación UV y además generar ozono, por lo que suelen tener un tratamiento en el vidrio de las lámparas para bloquear estas longitudes de onda. Este tipo de lámparas se denominan “*Ozone Free*”. Un espectro típico de esta lámpara se muestra en la figura 5.2.

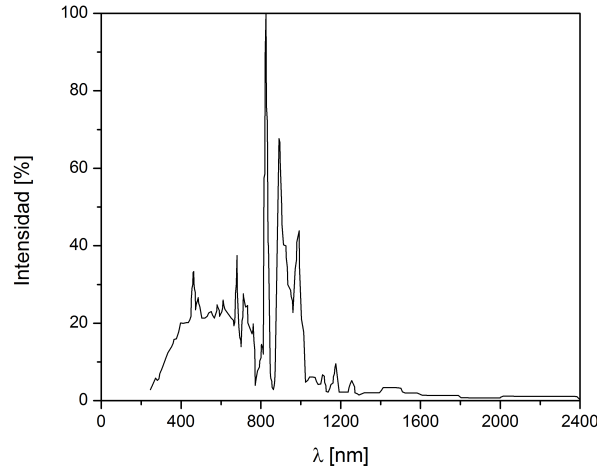


Figura 5.2: Espectro típico de un flash de Xe [22].

La forma de realizar la medición de una curva I-V depende de la forma de pulso de la lámpara (ver figura 5.3). En el caso a) el pulso tiene una región donde la intensidad es prácticamente constante, por lo que es posible realizar la medición de una curva I-V sin efectos transitorios asociados al cambio de intensidad. Si la duración de esta región es suficientemente larga, es posible medir la curva I-V completa con un solo pulso.

Por otro lado, el caso b), se tiene un pulso no constante y la medición debe hacerse en el máximo de la señal. Por cada pulso se obtiene un punto de la curva I-V, midiendo con un osciloscopio simultáneamente la tensión y la corriente de la celda para una dada carga del circuito externo. Es necesario disparar el flash las veces necesarias hasta completar la curva, cambiando entre cada medición la resistencia de carga de la celda. Este método se lo conoce como multiflash y es el que se usó en este trabajo. Con esta forma de pulso, las mediciones pueden tener errores asociados debido a efectos transitorios si la duración del pulso es del orden o menor que el tiempo de respuesta de la celda. Hay trabajos que muestran errores en la medición del factor de forma (FF) de celdas de junta simple debido a efectos dinámicos cuando se utiliza simuladores solares pulsados [23][24].

Supongamos por un instante que tenemos una celda con un tiempo de respuesta muy rápido o un pulso lento, de modo que se pueden dejar de lado

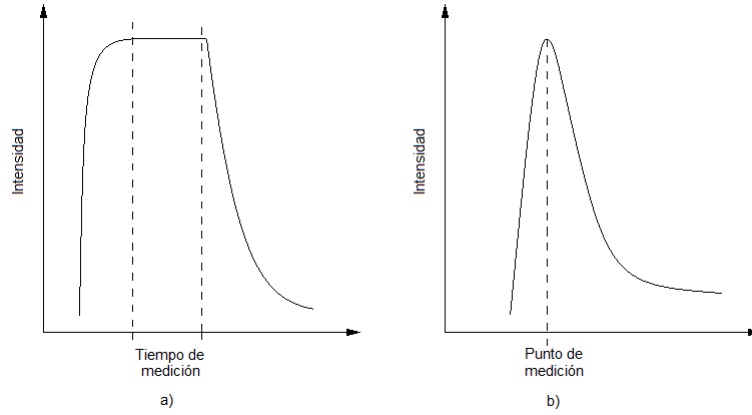


Figura 5.3: Formas típicas de la intensidad de una lámpara de flash de Xe.

los efectos transitorios; a medida que el pulso de luz aumenta de intensidad, la celda aumenta su corriente de cortocircuito proporcionalmente hasta llegar al máximo y luego empieza a decrecer. Esto se esquematiza en la figura 5.4a. Si se le conecta a la celda una resistencia de carga y durante el pulso del flash se mide su caída de tensión o la corriente que circula, la señal que se va a medir es la evolución temporal de la intersección de la recta de la resistencia con la curva I-V de la celda. Esto se muestra con los puntos 1, 2 y 3 en la figura 5.4a. Si esta resistencia de carga es lo suficientemente pequeña (R_1), la señal medida va a ser proporcional al pulso de luz del flash, ya que la celda estará en condiciones de polarización cercanas a cortocircuito (figura 5.4b). En cambio, si se le conecta una resistencia lo suficientemente grande (R_2), la señal será más ancha que la anterior (figura 5.4c) debido a que la celda pasa más tiempo en una zona cercana a la condición de circuito abierto. Para otros valores de resistencias, se obtienen señales con formas de onda intermedias a las descritas.

5.2. Análisis espectral

Primero se hizo un análisis espectral del flash de Xe similar al realizado en la sección 4.3.2. Como en este caso se tiene un espectro relativo y no uno absoluto, la manera de evaluar las corrientes de cortocircuito de las subceldas fue de forma relativa. Se midieron las I_{cc} de las celdas isotipo *middle* y *bottom* relativas a la *top* y se las comparó con la integral (2.17) a partir del espectro de la figura 5.2.

Las mediciones se realizaron conectando a las celdas una resistencia de $100\text{m}\Omega$ para que estén en régimen de cortocircuito (o próximo a él), sobre la cual se midió la caída de tensión (proporcional a I_{cc}) durante el pulso del flash con un osciloscopio Tektronik TDS 3054 C. Como cada celda fue

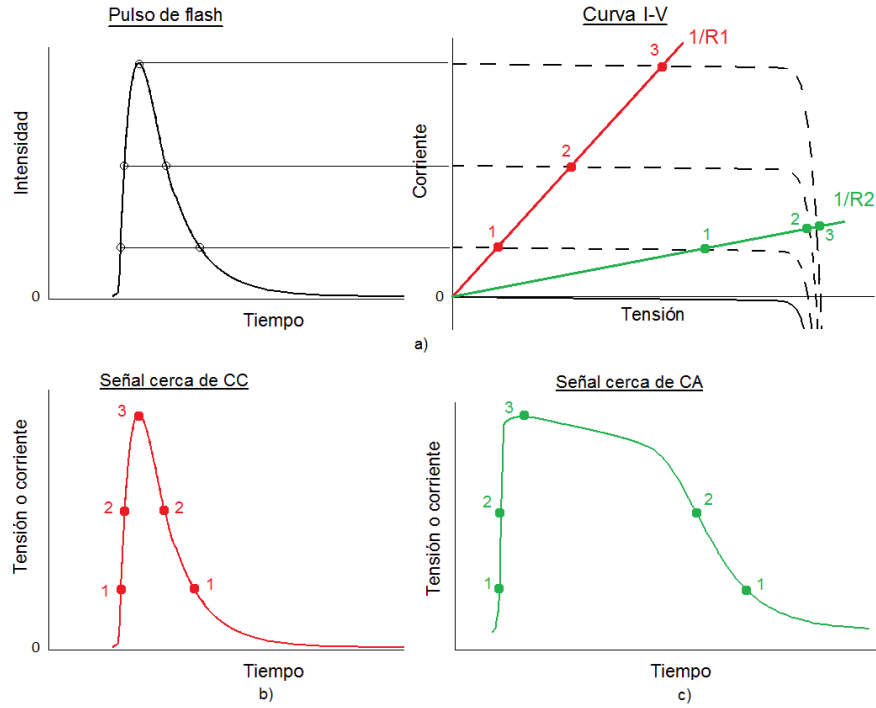


Figura 5.4: a) Pulso del flash y la evolución temporal de la curva I-V de una celda iluminada por este pulso, b) señal medida con una pequeña resistencia R_1 , y c) señal medida con una resistencia grande R_2 .

medida individualmente, para considerar las variaciones de intensidad que pudiera haber entre cada medición, se utilizó un sensor de silicio (el mismo utilizado para medir la homogeneidad de la lámpara dicróica, figura 4.1). El arreglo experimental se muestra en la figura 5.5.

Los pulsos generados por cada celda isotipo en condición de cortocircuito, se muestran en la figura 5.6. Estos pulsos ya fueron corregidos por diferencia de intensidad entre mediciones, amplificando o reduciendo la señal de acuerdo a lo medido por el sensor de silicio. Estas correcciones fueron del orden del 2%. El ruido al comienzo de las señales (cerca de $t = 0$) se debe a la descarga del banco de capacitores que posee el flash.

De los picos máximos de estas señales se obtuvieron los valores relativos de las corrientes de cortocircuito, los cuales se muestran en la tabla 5.1. También se muestran los valores calculados a partir de los datos del fabricante. El valor relativo de la subcelda *middle* se corresponde bastante bien con el valor experimental, no así la subcelda *bottom* donde el valor experimental es inferior al calculado. Esto podría indicar que la parte infrarroja del espectro es un poco menor al de la figura 5.2.

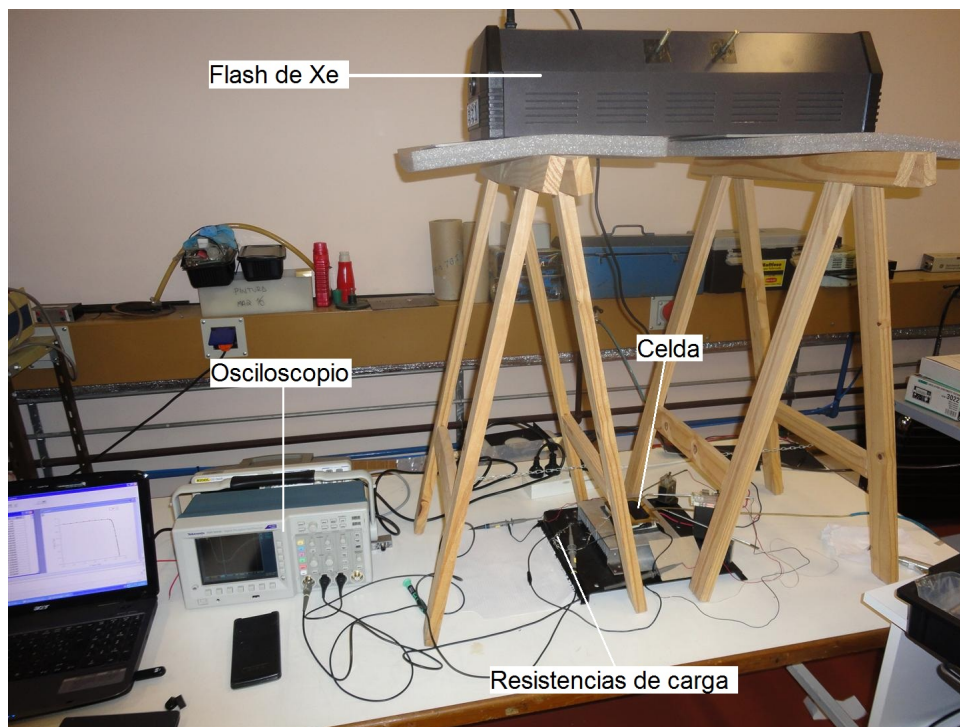


Figura 5.5: Imagen del arreglo experimental de la medición con el flash de Xe.

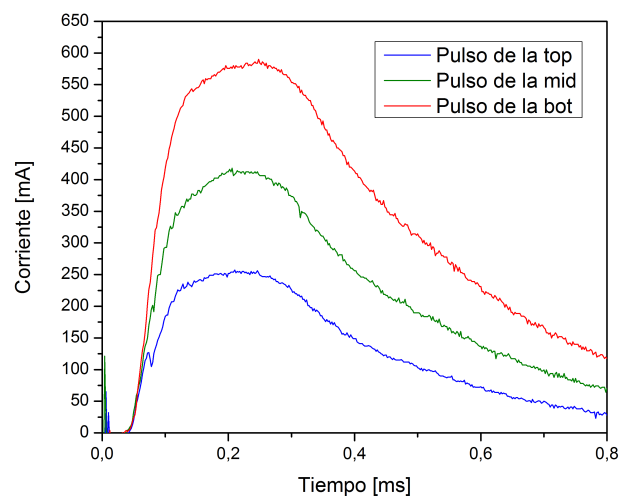


Figura 5.6: Señales de las corrientes de las celdas isotipo en cortocircuito cuando son iluminadas por el flash de Xe.

Tabla 5.1: Comparación de las corrientes de cortocircuito relativas a la subcelda *top* entre los datos del fabricante y las mediciones experimentales realizadas con el flash de Xe.

Subcelda	Ec. 2.17	Exp.
Top	1.00	1.00
Middle	1.70	1.61 ± 0.03
Bottom	2.60	2.27 ± 0.05

5.3. Pulsos medidos con la celda TJ

Como se explicó anteriormente, para medir la curva I-V de una celda con el flash hay que conectarle diferentes resistencias de carga y medir en cada caso el pulso generado de tensión y corriente. El esquema de conexión utilizado se muestra en la figura 5.7. Con un canal del osciloscopio se midió la tensión generada por la celda directamente sobre sus contactos eléctricos, simbolizado en la figura con el voltímetro V_1 ; mientras que la corriente se midió con otro canal del osciloscopio, de forma proporcional a la caída de tensión (V_2) sobre una resistencia de carga (R_s) conocida. Técnicamente, este método de medición no es de 4 puntas porque las tierras del osciloscopio son las mismas en todos los canales, por lo tanto las mediciones fueron hechas con 3 puntas.

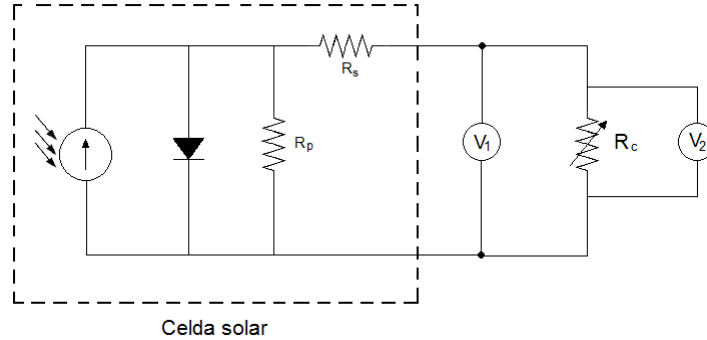


Figura 5.7: Esquema de conexión utilizado para medir los pulsos de tensión (V_1) y corriente (V_2) generados por la celda cuando es iluminada por el flash de Xe.

En la figura 5.8 se muestran tres pulsos de corriente de la celda TJ medidos en las zonas de la curva I-V de cortocircuito, circuito abierto y máxima potencia. Como se puede ver, el pulso va cambiando de forma de acuerdo a lo explicado en la sección 5.1.

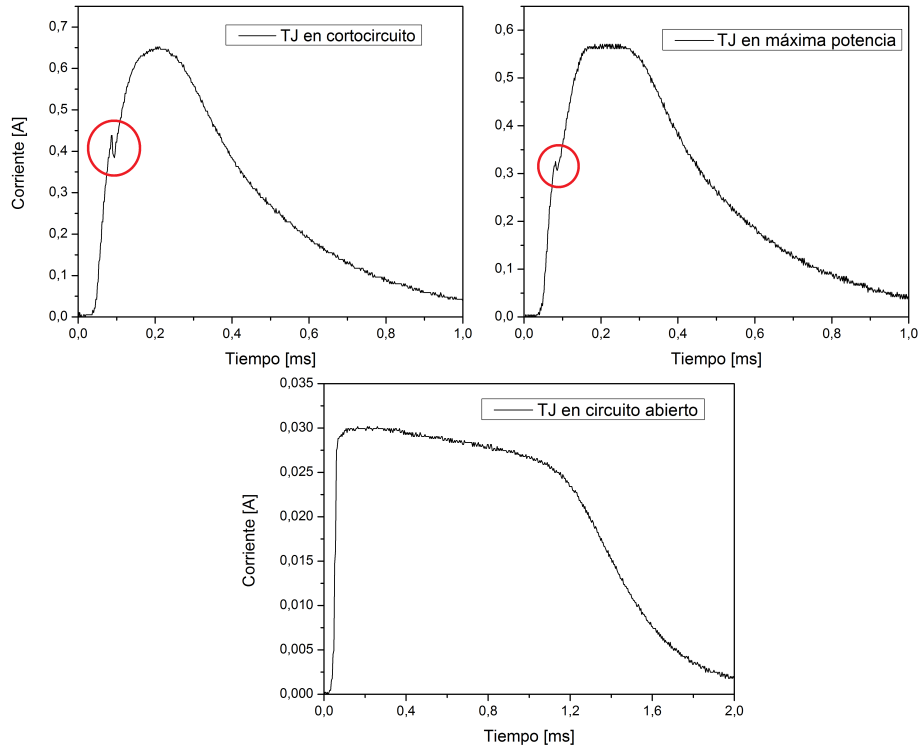


Figura 5.8: Pulsos medidos con la celda TJ iluminada por el flash de Xe en cortocircuito, máxima potencia y circuito abierto. Con círculo rojo se muestran los picos anómalos.

Al realizar las primeras mediciones de la celda triple junta, se observó un pequeño pico al comienzo del pulso en las mediciones entre cortocircuito y máxima potencia. Esto se muestra con un círculo rojo en la figura 5.8. Se descartó que fuera producido por el flash de manera eventual o ruido externo, dado que las mediciones eran reproducibles. Este efecto también fue observado en la celda isotipo *top*, pero menos visible. Cabe aclarar que no se encontraron trabajos publicados que muestren algún efecto similar a éste. Aunque tampoco es común que muestren los pulsos medidos con los flashes pulsados.

Una posible explicación es que sea debido al proceso dinámico de la medición en sí, ya que las juntas p-n de las celdas actúan como capacitores (ver sección 2.5.1). Para tratar de explicar esto, se realizó un análisis dinámico de la celda TJ que se desarrollará en el próximo capítulo.

5.4. Medición de la curva I-V de la celda TJ con el flash

Para medir la curva I-V de la celda TJ con el flash de Xe, se utilizaron resistencias de carga con valores comprendidos entre 0,25 y 88,8 Ω . Con estas resistencias se obtuvieron pulsos similares a los de la figura 5.8, de los cuales se utilizó el máximo de cada uno para construir la curva I-V. El resultado se muestra en la figura 5.9. Se estimó esta curva I-V utilizando las curvas de las subceldas *top*, *middle* y *bottom* obtenidas con la lámpara dicróica y los valores de corriente de cortocircuito medidos con las celdas isotipo con el flash (tabla 5.1). Esta curva se muestra en la figura 5.9, y el error RMS obtenido fue de 0.84 %.

Además de que la estimación fue buena y se verificó una vez más que el método de predicción funcionó como se esperaba, se puede extraer aún más información de la figura 5.9. Como se explicó en la sección 5.1, puede haber errores asociados a efectos transitorios en la medición de una curva I-V con un pulso de luz. Sin embargo, la estimación realizada fue hecha a partir de curvas medidas con luz continua, es decir, que la predicción no puede tener errores transitorios debido a cambios de intensidad¹. Por lo tanto, se puede deducir que la medición de la curva I-V de la celda TJ medida con el flash de Xe tiene efectos transitorios despreciables, y por lo tanto es posible medir la curva I-V con el método multiflash para dichas celdas de manera confiable.

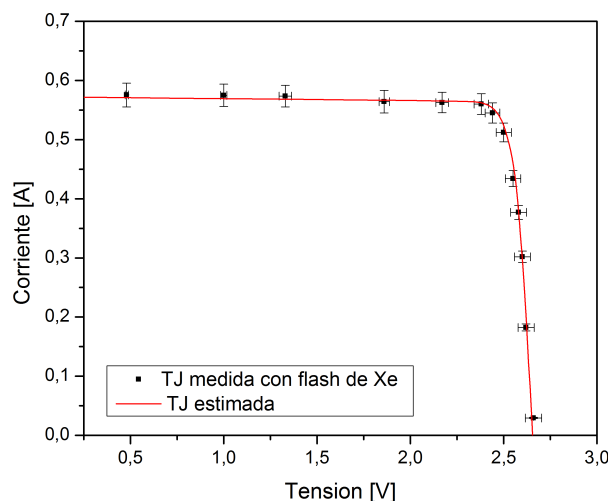


Figura 5.9: Curva I-V de la celda TJ medida con el flash de Xe y la estimación realizada a partir de las curvas de las subceldas medidas con la lámpara dicróica.

¹Las mediciones de curvas I-V con luz continua pueden tener errores transitorios asociados al barrido en tensión, si éste se realiza muy rápido [25].

Capítulo 6

Análisis dinámico de la celda TJ

En las mediciones de la celda TJ con el flash de Xe, se observó un pico anómalo (figura 5.8). Para tratar de explicar esto, se realizó un modelo eléctrico de la celda TJ considerando su capacidad interna. Dicha capacidad se estimó a partir de mediciones de C-V de las celdas solares. Como se verá a continuación, las simulaciones realizadas con este modelo ajustan correctamente dicho pico.

6.1. Mediciones de C-V

Para realizar análisis dinámico de la celda TJ, es necesario tener una estimación de las capacidades de cada subcelda. Por lo tanto se efectuaron mediciones de capacidad-tensión (C-V) de las 4 celdas en estudio. Estas mediciones se realizaron utilizando un equipo LCR Agilent E4980A.

Todas las mediciones de C-V se hicieron en oscuridad, debido a la imposibilidad de iluminar las celdas en el lugar de medición. Sin embargo, hay trabajos donde midieron C-V con iluminación y se observa que la capacidad máxima disminuye conforme aumenta la intensidad lumínica [26]. Como sólo se quiere estimar su orden de magnitud, la medición a oscuras fue considerada suficiente.

Las mediciones de C-V se realizaron a diferentes frecuencias y de -1V de polarización hasta la V_{ca} de cada celda, dado que este es el rango de polarización posible de las subceldas en la TJ. Las curvas obtenidas se muestran en la figura 6.1. Se puede apreciar en las 4 celdas que la capacidad disminuye cuando aumenta la frecuencia, pero se mantienen en el orden de los pocos μF . Salvo la celda isotipo *middle*, las otras 3 presentan un comportamiento similar con un pico máximo cuando están polarizadas positivamente. Esto concuerda con la teoría, que predice un pico máximo de capacidad cerca del *built-in potential* (ecuación 2.8). Otros trabajos reportan curvas similares en

celdas doble y triple juntura [26][27].

Como la celda isotipo *bottom* es una homojuntura, la curva de capacidad medida es directamente la de la subcelda. En cambio, como las isotipo *top* y *middle* son dobles junturas, las curvas representan la capacidad equivalente de las dos subceldas en serie. En este caso hay que estimar la capacidad teniendo en cuenta que la inversa de la capacidad total es la suma de las inversas de la capacidad de cada subcelda.

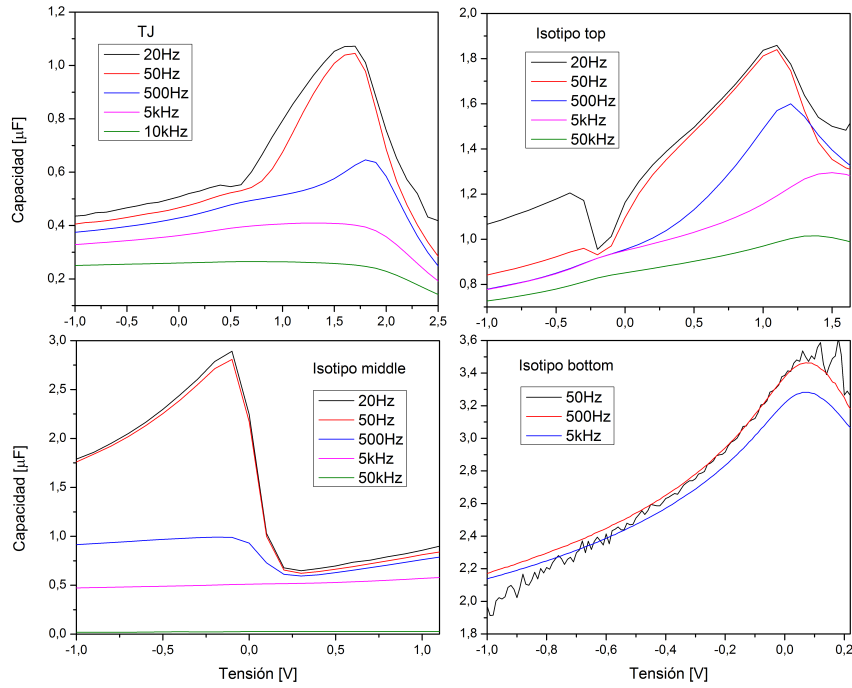


Figura 6.1: Curvas C-V de las 4 celdas a diferentes frecuencias y en oscuridad.

La frecuencia utilizada para calcular la capacidad fue de 500Hz, dado que la transformada de Fourier de los pulsos de la figura 5.6 tiene un máximo entre 400-500Hz.

La capacidad depende de la tensión de polarización de cada subcelda a lo largo de la curva I-V. Como determinar dicha polarización es complicado, sólo se estimaron las capacidades a circuito abierto. Cuando la celda triple juntura está polarizada en circuito abierto, las 3 subceldas también lo están, por lo tanto sus tensiones son 1.39V, 0.97V y 0.25V para las subceldas *top*, *middle* y *bottom* respectivamente ¹.

La capacidad de la subcelda *bottom* se lee directamente de su curva C-

¹Estos valores son los medidos con el simulador TS-Space (tabla 4.2). Si bien el espectro del flash es diferente y modifica ligeramente estos valores, la diferencia es despreciable para el cálculo de la capacidad.

V y su valor en circuito abierto es $C_{bot}=3.2\mu F$. Recordando que las celdas isotipo *top* y *middle* tienen activa la subcelda *bottom* (es decir, hay que sumarle su tensión y las capacidades están en serie) se obtienen: $C_{top}=2.3\mu F$ y $C_{mid}=1.0\mu F$.

6.2. Simulación dinámica de la celda TJ

Para simular la celda bajo el pulso del flash con el programa Pspice, se modificó el circuito eléctrico de la figura 4.12 por el de la figura 6.2, agregando un capacitor en paralelo en cada subcelda. Este capacitor representa la capacidad de la juntura y la de difusión [28][29]. Este modelo sigue siendo bastante sencillo, ya que además de las simplificaciones comentadas anteriormente, en este caso no se considera la variación de la capacidad con la tensión, dado que no fue posible introducir en el Pspice un capacitor variable por tensión.

Como pulso de entrada se utilizó un pulso medido con la celda isotipo *middle* en condiciones de cortocircuito. Se eligió dicha celda porque la duración del pulso era ligeramente inferior a la de la *bottom* y no tiene el pequeño pico al comienzo del pulso como la *top*. Esto es representado por el generador de tensión V1. Este generador alimenta las 3 subceldas, con sendos convertidores de tensión-corriente G1, G2 y G3 para transformar este pulso de tensión en corriente. Además, estos convertidores tienen la posibilidad de asignarle un factor de amplificación, el cual fue elegido de acuerdo a las mediciones de la tabla 5.1.

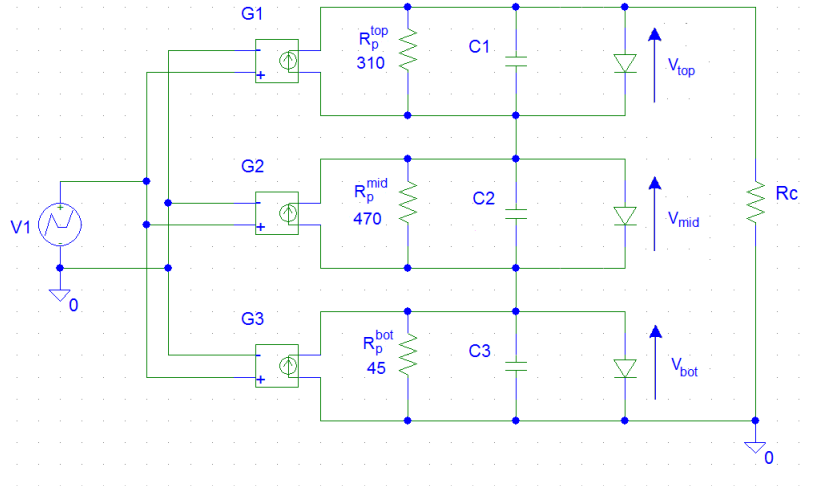


Figura 6.2: Circuito eléctrico utilizado para simular dinámicamente la celda triple juntura.

En la figura 6.3 se muestra la curva medida de la celda TJ cerca del punto de cortocircuito ($R_c=0,75\Omega$) y la simulación utilizando los valores de capacidad calculados en la sección anterior. Como se puede apreciar, la simulación reproduce el mismo pico al comienzo del pulso pero la ubicación temporal del mismo no es exactamente igual a la medida. Por esta razón se variaron los valores de capacidad a fin de obtener un mejor ajuste de la curva medida. Los valores encontrados fueron de $3\mu F$, $2\mu F$ y $3\mu F$ para la subcelda *top*, *middle* y *bottom*, respectivamente y la curva se muestra en la figura 6.3. Si bien hay una diferencia entre los valores calculados y los que mejor ajustan, lo importante es que son del mismo orden ya que el cálculo de la capacidad era sólo estimativo.

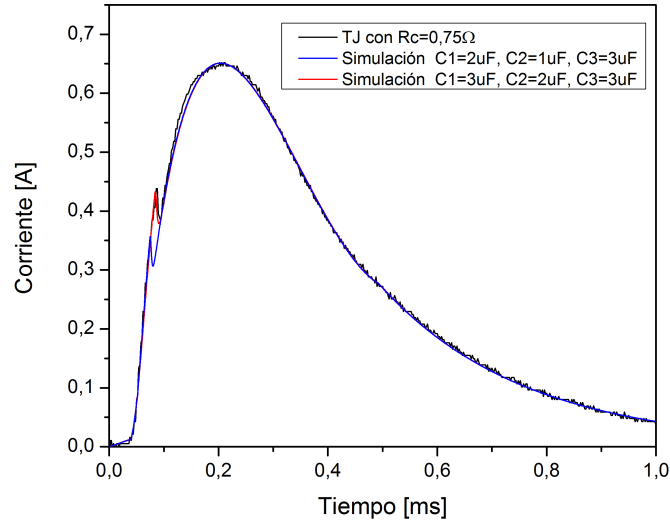


Figura 6.3: Señal de la celda TJ iluminada por el flash de Xe cerca de cortocircuito y 2 simulaciones dinámicas realizadas con el Pspice.

El origen de este pico al comienzo del pulso se puede explicar de la siguiente manera. Cuando la celda empieza a generar corriente producto de la iluminación del flash, los capacitores de cada subcelda comienzan a cargarse. Entonces, por un instante muy breve, puede circular una corriente mayor a la corriente de la subcelda que esté limitando, pasando a través de su capacitor. Con este espectro, la subcelda que limita es la *top*, por lo tanto, la corriente total de esta subcelda será la que genera más la que puede atravesar por su capacitor. Este proceso dura hasta que dicho capacitor se termina de cargar y la corriente cae abruptamente hasta alcanzar el valor de la corriente fotogenerada de la subcelda, produciendo el pico observado.

En la figura 6.4 se muestra el mismo análisis realizado con la celda polarizada en máxima potencia ($R_c=4,41\Omega$) y cerca de circuito abierto ($R_c=88,8\Omega$). En el caso de máxima potencia las simulaciones tienen el mismo compor-

tamiento que la medición, pero el pico al comienzo del pulso no se alcanza al mismo tiempo que la medición. Esto puede ser debido a que los valores de capacidad de cada subcelda pueden ir variando en diferentes puntos de la curva I-V. En cambio, cerca de circuito abierto este pico ya desaparece y la forma de la señal pasa a ser más cuadrada. En este caso las simulaciones también la reproducen.

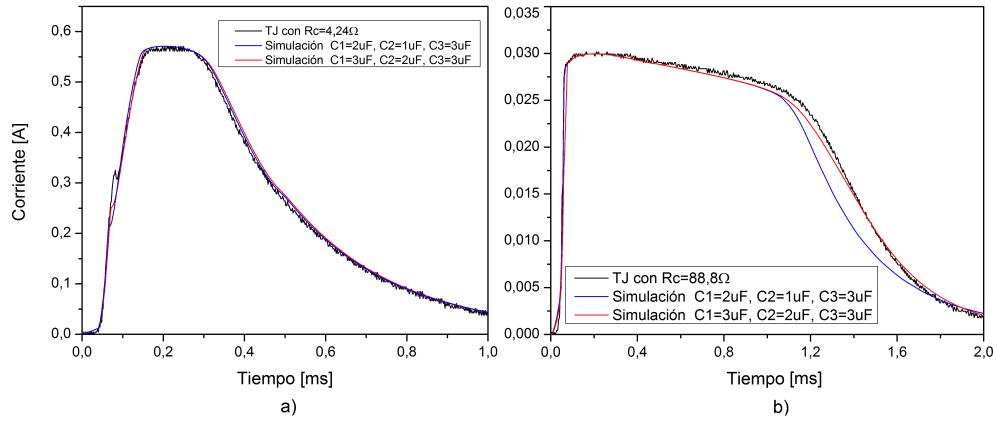


Figura 6.4: Señal de la celda TJ iluminada por el flash de Xe cerca de a) máxima potencia y b) circuito abierto. También se muestran las simulaciones dinámicas realizadas con Pspice.

Se observó que cuando la celda TJ está cerca de cortocircuito e iluminada con una intensidad menor, el tamaño relativo entre pico y el pulso aumenta. Esto se muestra en la figura 6.5 junto con la simulación. Nuevamente la simulación reproduce razonablemente bien el pico.

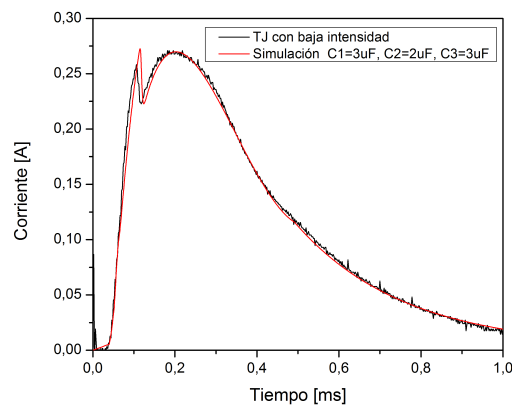


Figura 6.5: Señal de la celda TJ iluminada con el flash con baja intensidad y la simulación realizada con el Pspice.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el origen de este pico es esencialmente capacitivo debido a la corta duración del pulso de luz con la que es iluminada la celda.

Capítulo 7

Simulación de un módulo solar

La celda solar triple juntura utilizada en este trabajo, fue del mismo tipo que las utilizadas para integrar los paneles solares del satélite Aquarius/SAC-D, lanzado el 10 de junio de 2011. Los paneles solares están formados por módulos, y cada módulo está integrado por 6 cadenas en paralelo, cada una con 18 celdas en serie y un diodo de bloqueo. Durante las campañas de calificación y testeo de los paneles solares, se realizaron verificaciones eléctricas de los módulos para comprobar su correcto funcionamiento. Estas verificaciones consistían en medir sus curvas I-V con un flash de Xe pulsado similar al utilizado en este trabajo y con el mismo método de medición, a una temperatura controlada de 22°C. Cabe aclarar que estas mediciones no formaron parte de este trabajo, y sólo se van a utilizar sus resultados.

Para estimar la curva I-V de un módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

1. Generar una curva I-V de la celda TJ a partir de las subceldas estimadas con la lámpara dicróica y las corrientes de cortocircuito medidas con el flash de Xe (tabla 5.1).
2. Corregir esta curva por temperatura de 28°C a 22°C.
3. Multiplicar la curva 18 veces en tensión.
4. Restarle la curva I-V del diodo de bloqueo.
5. Multiplicar 6 veces en corriente.

Para el primer punto, se utilizó el código creado en Matlab. Para el segundo, se hizo uso de los datos del fabricante de la celda TJ que establece cómo varían los parámetros de la misma con la temperatura, tabla 7.1. Como las correcciones por temperatura por una diferencia de 6°C son del orden del

0,03 % en corriente y 1.5 % en tensión, sólo se van a considerar estas últimas. Por lo tanto, la corrección por temperatura a la curva I-V se realizó desplazando toda la curva 33mV hacia la izquierda, despreciando la pequeña diferencia de corrimiento entre la V_{ca} y V_{mp} . Luego, se la multiplicó 18 veces en tensión (para simular una cadena) y se le restó la medición de una curva I-V de un diodo de bloqueo. La medición del diodo de bloqueo se realizó utilizando el SMU y la resta de las curvas con Matlab. Por último, a esta curva se la multiplicó 6 veces en corriente, obteniendo finalmente la curva de un módulo. Si bien se está haciendo una simplificación bastante gruesa al utilizar una sola celda TJ y repetirla las veces necesarias, es un hecho que las celdas reales son muy similares entre sí, además de que las celdas utilizadas en el satélite fueron cuidadosamente elegidas para tener cadenas con un mínimo desajuste (*mismatch*) en corriente.

Tabla 7.1: Coeficientes de temperatura para la celda TJ en BOL (*Beginning of Life*) dados por el fabricante.

$V_{ca}/\Delta T$	$J_{cc}/\Delta T$	$V_{mp}/\Delta T$	$J_{mp}/\Delta T$
$[mV/^{\circ}C]$	$[\mu A/cm^2/^{\circ}C]$	$[mV/^{\circ}C]$	$[\mu A/cm^2/^{\circ}C]$
-5,48	+12	-5,93	+11

En la figura 7.1 se muestra las estimaciones realizadas de 4 módulos del satélite. En cada caso se estableció la corriente de cortocircuito de acuerdo a la medición y además se agregó una corrección por resistencia serie debido a las soldaduras y los cables de conexión de las cadenas y módulos. Este valor se lo encontró minimizando el error RMS. Las estimaciones ajustan bastante bien los datos medidos, con errores RMS menores a 1.05 %.

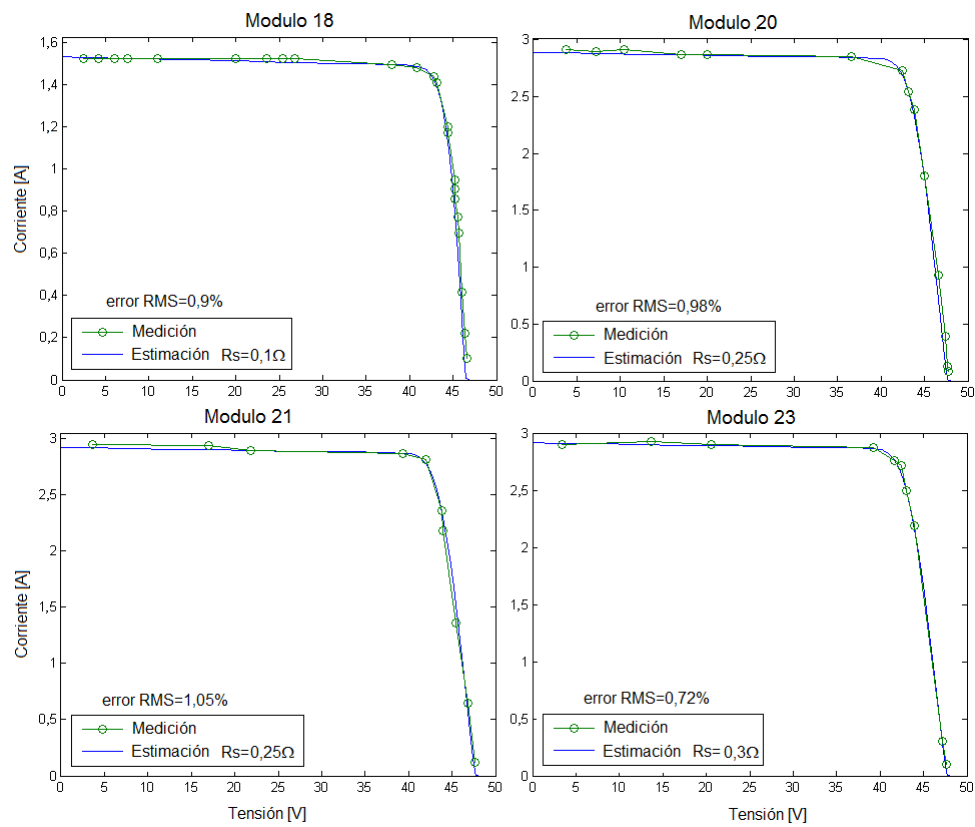


Figura 7.1: Cuatro curvas I-V de módulos de potencia del satélite Aquarius/SAC-D. Con línea azul se muestran las estimaciones de las mismas.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue predecir la curva I-V de una celda triple junta (TJ) comercial InGaP/GaAs/Ge bajo diferentes espectros de iluminación. Esto se realizó haciendo uso de tres celdas denominadas isotipo, que tienen el mismo comportamiento que cada una de las subceldas que componen la TJ. La primera medición realizada fue utilizando una lámpara dicróica, que si bien no cumplía con las normas de un simulador solar, como medición es igualmente útil. Con dicha lámpara se midieron las curvas I-V de las cuatro celdas. Como las celdas isotipo *top* y *middle* tenían activa la subcelda de germanio (*bottom*), se elaboró un algoritmo para descontarla. Este algoritmo utiliza la medición de la celda isotipo *bottom* y le resta su tensión a las curvas I-V de las celdas isotipo *top* y *middle*, para niveles de corrientes constantes. Esto se realizó usando el *software* Matlab. Se obtuvo así una estimación de las curvas de las subceldas *top* y *middle*. Utilizando estas curvas junto con la de germanio, se sumaron sus tensiones para niveles de corrientes constantes y se obtuvo la primera estimación de la celda TJ. Esta estimación reprodujo muy bien dicha celda, con un error RMS de 0,45 %.

El segundo espectro utilizado, fue el de un simulador solar TS-Space '*close match*' AM0. En este caso, el espectro fue cualitativamente diferente al anterior, pues la subcelda que limitaba en corriente fue la *top* y con la lámpara dicróica era la *middle*. En estas mediciones, se utilizaron sólo los valores de corriente de cortocircuito de las celdas isotipo. Con estos valores y las curvas de las subceldas medidas con la dicróica, se estimó la curva I-V de la celda TJ bajo este nuevo espectro. Nuevamente los resultados fueron satisfactorios.

Una tercera medición fue realizada en oscuridad. En este caso se hicieron 2 estimaciones de la curva I-V de la celda TJ oscuras: (1) utilizando las curvas de las subceldas medidas con la lámpara dicróica, trasladándolas a 0 de corriente y sumándolas, y (2) midiendo las curvas a oscuras de las celdas isotipo, descontándoles la subcelda *bottom* a la *top* y *middle* y sumándolas. De ambas estimaciones, la que mejor ajustó a la curva TJ medida fue la (1). La diferencias entre ambas estimaciones radica en que son situaciones físicas muy diferentes. En el primer caso la celda está generando corriente, mientras

que en el segundo es necesario inyectarle corriente a la celda para medir su curva. Por lo tanto, es posible que se pierda la validez de linealidad de las curvas I-V de las subceldas en el caso de oscuridad.

El último espectro utilizado fue el de una lámpara de descarga de Xe con un pulso del orden de 1ms. En este caso el método de medición fue totalmente distinto a los anteriores, pues por cada descarga del flash se puede medir un sólo punto de la curva I-V. Se realizó una estimación de la curva I-V de la celda TJ bajo el espectro del flash, midiendo nuevamente las corrientes de cortocircuito de las celdas isotipo. Igual que antes, utilizando estos valores y las curvas de las subceldas medidas con la lámpara dicróica, se estimó la curva de la celda TJ. En este caso, el error RMS entre esta estimación y la curva medida fue de 0.84 %. Estos resultados permitieron concluir que son despreciables los efectos transitorios en las condiciones en las que se realizaron la mediciones.

Intentando forzar este método de predicción un poco más, se simularon módulos de potencia de los paneles solares del satélite Aquarius/SAC-D, que fueron medidos con un flash de Xe similar. Estas simulaciones se hicieron a partir de la estimación de una sola celda TJ, que se repitió las veces necesarias para reproducir el módulo. Los resultados fueron satisfactorios, obteniendo errores RMS inferiores al 1.05 %.

Las primeras mediciones con el flash de Xe mostraron un pico no esperado en las mediciones de la respuesta de la celda TJ frente al pulso de luz. Para tratar de justificar esta anomalía, se realizó un modelo eléctrico de la celda TJ utilizando el *software* Pspice. Dicho modelo tuvo en cuenta la capacidad de la celda, la cual fue estimada mediante mediciones de C-V. Aunque el modelo utilizado fue muy simple, pudo explicar la causa del pico anómalo observado en las mediciones. Su origen se debe a que por un tiempo muy breve, los capacitores asociados a cada subcelda se cargan y puede circular una corriente mayor a la corriente fotogenerada en cada una de las subceldas. Finalizado este proceso, la corriente desciende abruptamente hasta alcanzar el valor la corriente fotogenerada de la subcelda, produciendo el pico observado.

Se puede concluir que el método desarrollado, donde a partir de 3 curvas primarias I-V (las de las subceldas) fue posible determinar la curva I-V de la celda de TJ en diferentes condiciones espectrales, con resultados satisfactorios. A futuro, se podría poner a prueba este método por ejemplo, variando la irradiancia de iluminación de manera significativa sobre cada una de las subceldas y determinar algún rango de validez para este método.

Referencias

- [1] A. Luque y S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2003
- [2] M. A. Green et al., Solar cell efficiency tables (versión 39). Prog. Photovolt: Res. Appl., 20:12-20, 2012
- [3] REN21, Renewables global status report (<http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/tabid/5434/Default.aspx>), 2011
- [4] Ch. Breyer and A. Gerlach, “Global overview on grid-parity event dynamics”, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 5283, 2010
- [5] ASTM E490-00. Standard extraterrestrial spectrum reference (<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>), 2000
- [6] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, inc., 7th edition, 1996
- [7] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt-Saunders, 1976
- [8] P. Würfel, *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005
- [9] S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, John Wiley & Sons, 1981
- [10] M.A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982
- [11] J. Nelson, *The Physics of solar cells*, Imperial College, 2003
- [12] Emcore photovoltaics, http://www.emcore.com/solar_photovoltaics/space_solar_cells
- [13] M. Alurralde et al, “Development of solar arrays for Argentine satellite missions”, Aerospace Science and Technology, 2012, doi:10.1016/j.ast.2012.02.012

- [14] M. Alurralde et al, "Flight Model for Aquarius/SAC-D satellite mission", Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 695, 2009
- [15] M. Alurralde et al, "Solar array qualification models for Aquarius/SAC-D satellite mission", Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 785, 2008
- [16] M. Alurralde et al, "Development of photovoltaic modules for space applications in Argentina", Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 538, 2005
- [17] M. P. Barrera, *Simulación y caracterización de celdas solares multijun-
turas y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales*, Tesis doctoral, UNSAM, 2009
- [18] S. R. Kurtz et al, "Methods for analysis of two-junction, two-terminal photovoltaic devices", Proceedings of the 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1733-1737, 1994
- [19] C. Dominguez et al, "Multijunction solar cell model for translating I-V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature", Prog. Photovolt: Res. Appl., 18:272-284, 2010
- [20] ASTM E927-91. Standard Specification for Solar Simulation for Terrestrial Photovoltaic Testing spectrum reference, 1991
- [21] L. Castaner, S. Silvestre, *Modelling photovoltaic systems using Pspice*, Ed. Wiley, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España, 2003
- [22] <http://www.ecat.lighting.philips.es/1/lamparas-profesionales/lamp.-de-descarga-alta-intensidad/xenon/broadway-xop-xenon-pulsado/928376905102.eu/?seoCatId=26454>
- [23] W. M. Keogh et al, "Constant voltage I-V curve flash tester for solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, 81:183, 2004
- [24] H. A. Ossenbrink et al, "Do multi-flash solar simulators measure the wrong fillfactor?", Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1194-1196, 1993
- [25] M. Seapan et al, "Effects of dynamic parameters on measurements of IV curve", Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1-3, 2008
- [26] C. M. Ruiz et al, "Capacitance measurements for subcell characterization in multijunction solar cells", Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 708-711, 2010

- [27] C. M. Ruiz et al, "Aplication of capacitance-based techniques to the characterization of multijunction solar cells", Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1600-1603, 2009
- [28] C. Monokroussos et al, "The Effects of Solar Cell Capacitance on Calibration Accuracy When using a Flash Simulator ", Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2231-2234, 2006
- [29] P. Merhej et al, "Effect of capacitance on the output characteristics of solar cells", 6th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics & Electronics (PRIME), 1-4, 2010