

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”

***Caracterización y elaboración de dispositivos
fotovoltaicos para uso espacial***

por Ing. Hernán Pablo Socolovsky

Director: Dr. Juan Plá

(*)Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencia y
Tecnología, Mención Física

República Argentina

2015

Resumen

El Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CNEA) realiza actividades de investigación y desarrollo relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar mediante conversión fotovoltaica para aplicaciones espaciales y terrestres. El desarrollo de dispositivos solares para satélites comenzó en 1995, en el marco de una colaboración entre la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

A partir de marzo de 2001, luego de la firma del primer convenio de cooperación específica entre la CNEA y la CONAE, el DES del Centro Atómico Constituyentes (CAC) se encuentra trabajando en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional. Este convenio, encuadrado dentro de la Ley N° 23.877 de Promoción y Fomento a la Innovación Tecnológica, dio lugar a la iniciación en el CAC del Subproyecto Paneles Solares como parte de los Proyectos SAC-D y SAOCOM, para diseñar, fabricar y ensayar los paneles fotovoltaicos de ambas misiones a través de la firma de sucesivos contratos de asistencia tecnológica entre la CNEA y la CONAE. Las actividades previstas incluían, además del desarrollo de las tecnologías de fabricación y ensayo de los paneles, la elaboración de modelos teóricos que permitieran diseñar y simular el funcionamiento del sistema de generación de energía eléctrica (sistema de potencia) del satélite a lo largo de la vida útil de la misión.

La presente Tesis Doctoral fue realizada en el DES de la CNEA, en el marco de la colaboración institucional entre CNEA y CONAE mencionada anteriormente cuyo objetivo principal es el de contar en el país con técnicas específicas de diseño, simulación, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para usos espaciales.

Las actividades realizadas dentro de la Tesis se centraron en la caracterización tanto eléctrica como electrónica de dispositivos fotovoltaicos para uso espacial. En particular se estudiaron las celdas solares multijuntura basadas en semiconductores III-V, el componente principal de los paneles solares para aplicaciones espaciales.

Como parte del estudio de las celdas solares multijuntura III-V, se presentan en este trabajo el desarrollo, la puesta en operación y los primeros resultados de un equipo para la medición de respuesta espectral de dichas celdas, las mismas utilizadas en los paneles solares de las misiones SAOCOM y SAC-D.

En el siguiente capítulo se presenta un análisis detallado sobre la caracterización $I-V$ (tensión vs. corriente) de módulos fotovoltaicos integrados con estos dispositivos a través de la técnica denominada multiframe. Esta caracterización permite determinar experimentalmente la potencia generada por un módulo solar de uso espacial previo a ser utilizado en una misión. El análisis es abordado mediante el modelado y simulación de una celda solar de triple juntura (TJ) desde el punto de vista eléctrico con su consecuente contrastación experimental.

En el último capítulo se pasa revista a la integración eléctrica de los paneles solares de las misiones SAOCOM y SAC-D/Aquarius, llevada a cabo dentro del laboratorio de integración de paneles para uso espacial del DES, y a la elaboración de sensores solares gruesos de posición utilizados en las mismas misiones. Finalmente se presenta la caracterización *corriente de cortocircuito vs. ángulo de incidencia* para dichos sensores solares, así como sus aplicaciones en otras misiones espaciales.

Abstract

The Solar Energy Department (DES) of the Argentine National Atomic Energy Commission (CNEA) performs research and development activities related to the use of photovoltaic solar energy conversion for space and terrestrial applications. The development of solar arrays for spacecrafts began in 1995 as part of a collaboration between CNEA and the National Commission for Space Activities (CONAE).

Since March 2001, after the signing of the first agreement for specific cooperation between CNEA and CONAE, the DES, sited at Constituyentes Atomic Center (CAC) from CNEA, is working on the development of solar arrays for satellite missions in the frame of the national space plan. This agreement, framed within law No.

23,877 of promotion and foment for the Technological Innovation, led to the initiation at CAC of the Solar Panels Subproject as part of SAC- D and SAOCOM Projects in order to design, manufacture and test PV panels for both missions through the signing of successive technological assistance contracts between CNEA and CONAE. Planned activities include, in addition to the development of manufacturing and test technologies for space solar panels, the development of theoretical models that allow to design and simulate the operation of power generation (Satellite Power System) along the mission life. This Doctoral Thesis was executed at DES-CNEA, in the framework of the institutional collaboration between CNEA and CONAE aforementioned whose main objective is to have in Argentina specific techniques of design, simulation, fabrication, characterization and testing for space solar panels.

The activities within the thesis were focused on both electrical and electronic characterization of photovoltaic devices for space applications. In particular, multijunction solar cells based on III-V semiconductors (the main component of solar panels for space applications) were studied. As part of the study of triple junction solar cells are presented in this work the development, start-up and initial results of a setup for the measurement of spectral response of these cells, the same used in SAOCOM and SAC- D missions.

In the next chapter, a detailed analysis of the I - V characterization (current vs. voltage) of photovoltaic modules integrated with these devices through a technique called multflash is presented. This characterization allows to experimentally determining the power generated by a solar module prior to be used in a space mission. The analysis is approached by electrical modeling and simulation of a triple junction solar cell (TJ) with the PSpice software and their subsequent experimental validation.

In the last chapter are presented the electrical integration of the solar panels belonging to SAOCOM and SAC- D/Aquarius missions, performed in the integration lab at DES, and the production of coarse sun sensors used in the same missions. Finally, the characterization current vs. angle of incidence is presented for these solar sensors, as well as their application in different space missions.

ÍNDICE

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Indice	6
Capítulo 1 Introducción.....	9
1.1 Provisión de energía para satélites.....	9
1.2 Utilización de paneles solares en misiones espaciales. Historia	11
1.3 Antecedentes en Argentina y el Plan Espacial Nacional.....	13
1.4 Misiones SAC de la CONAE y su vínculo con el DES.....	15
1.5 Misiones SAOCOM y SARE.....	19
1.6 Otras misiones espaciales Argentinas.....	20
1.7 El recurso solar.....	22
1.8 Materiales de interés fotovoltaico.....	24
1.8.1 Silicio cristalino.....	27
1.8.2 Arseniuro de Galio y otros compuestos III-V.....	29
1.9 Referencias	30
Capítulo 2 Celdas solares fotovoltaicas.....	32
2.1 Introducción.....	32
2.2 Física de la celda solar.....	33
2.2.1 Propiedades fundamentales de los semiconductores.....	34
2.2.2 Absorción de luz.....	36
2.2.3 Recombinación.....	37
2.2.4 Ecuaciones de un semiconductor.....	39
2.2.5 Junturas p-n.....	40
2.2.5.1 Capacidad de la juntura.....	41
2.2.6 Curva característica corriente-tensión (I-V).....	42
2.2.7 Circuito equivalente.....	45
2.3 Respuesta espectral.....	46
2.4 Celdas solares III-V.....	47
2.4.1 Celda de triple juntura.....	48
2.5 Referencias.....	52
Capítulo 3 Medición de respuesta espectral en celdas solares III-V.....	53
3.1 Respuesta espectral, definición.....	53
3.2 Utilidad e importancia.....	53
3.3 Medición de respuesta espectral de una celda solar.....	55
3.4 Medición de respuesta espectral en celdas solares monojuntura.....	57
3.4.1 Método normalizado de medición de RE en celdas solares monojuntura.....	57
3.4.2 Equipo de medición de respuesta espectral para celdas monojuntura.....	60
3.4.3 Desarrollo del equipo de medición.....	60

3.4.3.1	Acondicionamiento de la luz monocromática.....	61
3.4.3.2	Preamplificación y medición de la señal.....	62
3.5	Mediciones de <i>RE</i> en celdas y sensores solares de silicio cristalino.....	64
3.5.1	Condiciones de medición – Polarización lumínica y eléctrica.....	64
3.5.2	Resultados en la medición de <i>RE</i> y <i>EQE</i> en celdas monojuntura de silicio.....	65
3.6	Medición de <i>RE</i> de celdas solares multijuntura.....	68
3.6.1	Introducción a la problemática de la medición de <i>RE</i> en celdas Multijuntura.....	68
3.6.2	Método normalizado de medición de <i>RE</i> de celdas multijuntura.....	71
3.6.3	Modificaciones realizadas en el equipo para medición de <i>RE</i> de celdas solares TJ	73
3.6.3.1	Inserción de una segunda rueda filtros	74
3.6.3.2	Polarización lumínica.....	74
3.6.3.3	Automatización del sistema.....	75
3.6.4	Condiciones experimentales para medición de la <i>RE</i> en celdas de triple juntura	79
3.6.4.1	Estudio de la polarización lumínica.....	79
3.6.4.1.1	Estudio de las lámparas utilizadas para la polarización lumínica.....	80
3.6.4.1.2	Cálculo de los espectros para la selección de las subceldas.....	81
3.6.4.1.3	Espectros de polarización para una celda triple-juntura <i>InGaP/GaAs/Ge</i>	83
3.6.4.1.4	Estudio de las condiciones de funcionamiento de las celdas bajo los espectros de polarización hallados.....	87
3.6.4.2	Polarización eléctrica.....	88
3.7	Medición de <i>RE</i> en celdas TJ	92
3.7.1	Transferencia del patrón de <i>RE</i>	92
3.7.2	Medición de celdas de doble y triple juntura comerciales y su <i>EQE</i>	94
3.7.3	Errores en la medición de <i>RE</i>	95
3.8	Evaluación del daño por radiación y degradación de la corriente de cortocircuito de las subceldas.....	96
3.9	Conclusiones.....	98
3.10	Referencias	100

Capítulo 4 Medición de la característica I-V de dispositivos FV mediante la técnica multiflash.

4.1	Introducción.....	104
4.2	Condiciones estándar para aplicaciones terrestres y espaciales.....	104
4.3	Simuladores solares.....	105
4.3.1	Espectro y tipos de simuladores solares pulsados.....	107
4.4	Técnica Multiflash.....	109
4.5	Característica I-V en función del espectro en celdas de triple juntura.....	111
4.5.1	Modelado numérico de una celda de triple juntura.....	114
4.5.2	Antecedentes.....	115
4.5.3	Obtención de los parámetros del modelo	116
4.5.3.1	Pasos a seguir para la obtención del modelo numérico de celdas Componentes.....	118
4.5.4	Validación del modelo para simuladores solares continuos.....	120
4.5.5	Utilización del método propuesto para el espectro de una lámpara de	

	Xenón.....	125
4.6.	Modelo dinámico de una celda TJ	131
4.6.1	Simulación de la respuesta temporal de una celda TJ.....	134
4.7	Simulación de un módulo de potencia del satélite SAC-D.....	138
4.8	Conclusiones.....	141
4.9	Referencias.....	142
Capítulo 5 Fabricación de dispositivos fotovoltaicos para uso espacial.....		145
5.1	Introducción.....	145
5.2	Integración eléctrica de un panel solar para uso espacial.....	146
5.2.1	Componentes utilizados.....	146
5.2.2	Fabricación de interconectores plateados.....	148
5.2.3	Celdas CIC.....	150
5.2.4	Armado de cadenas y pegado sobre el sustrato.....	151
5.2.5	Cableado.....	152
5.3	Elaboración y caracterización de sensores solares gruesos de posición para aplicaciones espaciales.....	154
5.3.1	Introducción.....	154
5.3.2	Experiencias en vuelo de sensores desarrollados en el DES.....	155
5.3.3	Caracterización I_{cc} vs ángulo de sensores.....	157
5.3.3.1	Medición de I_{cc} vs ángulo de incidencia.....	158
5.3.3.2	Medición de sensores solares para el vector VS-30.....	160
5.3.3.3	Sensores solares para las misiones Aquarius/SAC-D y AMAZONIA I.....	163
5.3.4	Errores de Medición.....	164
5.4	Conclusiones.....	164
5.5	Referencias.....	166
Capítulo 6 Conclusiones generales.....		168
6.1	Comentarios finales.....	168
Publicaciones y participaciones en congresos		172
Apéndice 1		176

Capítulo 1

Introducción

1.1 Provisión de energía para satélites

Un satélite artificial consta básicamente de dos partes que corresponden a dos funciones bien diferenciadas: los sistemas encargados de cumplir con la misión específica incluyendo instrumentos y equipamiento científico, y la plataforma de servicios, que incluye el subsistema de generación, almacenamiento y distribución de energía a los componentes del satélite.

La potencia eléctrica es uno de los recursos clave de los sistemas espaciales. La demanda de potencia ha ido aumentando con el correr de los años, siempre dentro de las limitaciones que impone una misión espacial en cuanto al peso admisible y disponibilidad de espacio para el subsistema de generación. Los generadores solares fotovoltaicos (FV) han sido y continuarán siendo la mejor opción como fuente de potencia para satélites de órbita baja (LEO – *Low Earth Orbit*) y geoestacionaria (GEO – *Geostationary Earth Orbit*). Las características de la órbita (altura, excentricidad, frecuencia y duración de los eclipses, etc.) determinan la disponibilidad de energía solar y, fundamentalmente, el tipo de radiación que deberán soportar los paneles FV.

Los principales parámetros que caracterizan un panel solar para uso espacial son la disponibilidad de potencia en condiciones de operación y la relación peso/potencia. La evolución del diseño de este tipo de paneles ha pasado por diversas variantes, aunque en general el avance ha sido relativamente lento (comparado con las aplicaciones terrestres de la energía FV) debido a los requerimientos de alta confiabilidad de las misiones espaciales.

Las celdas solares son generalmente la única fuente de potencia eléctrica del satélite y, en consecuencia, deben tener características apropiadas para esta aplicación ya que el éxito de la misión depende críticamente de la potencia suministrada por estos dispositivos. En muchos casos los costos de las celdas son poco significativos en comparación con los costos involucrados en la misión espacial (típicamente, alrededor

de decenas de millones de dólares). Por otra parte, los materiales utilizados para la fabricación de las celdas solares tienen una incidencia fundamental sobre las propiedades eléctricas y de resistencia a la radiación de las mismas y, en especial, sobre la eficiencia de conversión (η) de energía electromagnética en eléctrica.

A lo largo de la historia se han utilizado en el espacio distintos materiales y estudiado sus propiedades y resistencia al ambiente. Durante muchos años, el silicio ha abastecido la demanda de celdas solares para aplicaciones espaciales, aunque en la actualidad la tendencia es la utilización casi exclusiva de semiconductores III-V como los principales materiales para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial debido a su mayor eficiencia y mayor resistencia al daño por radiación [1].

Las aplicaciones fotovoltaicas para usos espaciales tienen características técnicas y perfiles productivos claramente diferenciados de las terrestres. En el espacio, las celdas solares están sometidas a condiciones ambientales mucho más severas que en la superficie terrestre. Por ello, las celdas deben ser capaces de soportar tanto el estrés mecánico durante el despegue como así también operar en distintas condiciones ambientales: bombardeo con partículas cargadas, degradación por la intensa radiación ultravioleta (UV), daño producido por el oxígeno atómico y variaciones bruscas de temperatura al entrar y salir de la sombra de la Tierra. Estos factores hacen que las características eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos se deterioren durante la misión, sufriendo pérdidas significativas en la potencia entregada. Por este motivo, los ensayos de daño por exposición al ambiente espacial que puedan efectuarse mediante su simulación en tierra son muy importantes, dado que permiten predecir en forma experimental dicha pérdida de potencia.

En este primer Capítulo se presenta, a modo de introducción, un breve repaso histórico sobre la aplicación de celdas solares en misiones espaciales. Se muestran, además, las primeras improntas nacionales en el espacio y el actual Plan Espacial Nacional, sus objetivos y alcances. Se considerarán en detalle las misiones de la serie SAC (Satélites de Aplicaciones Científicas) y SAOCOM (Satélite de Observación y Comunicaciones) y su vínculo con el DES de la CNEA como así también a otros emprendimientos espaciales nacionales fuera del marco de la CONAE.

Por último, se analiza el recurso solar fuera de la atmósfera terrestre y se realiza una breve descripción sobre los principales materiales de interés fotovoltaico.

1.2 Utilización de Paneles solares en misiones espaciales. Historia.

La exploración espacial comenzó el 4 de octubre de 1957 con el lanzamiento del satélite artificial Sputnik 1 (figura 1.1) por parte de la U.R.S.S. desde el Cosmódromo de Baikonur, Kazajistán. La nave obtuvo información acerca de la densidad de las capas altas de la atmósfera y la propagación de ondas de radio en la ionósfera. Los instrumentos y fuentes de energía eléctrica estaban alojados en una cápsula que también incluía transmisores de radio. El envío a tierra de la telemetría incluía datos de temperatura dentro y sobre la superficie de la esfera. Los transmisores funcionaron durante tres semanas, hasta que fallaron las baterías químicas de a bordo y a los 92 días después de su lanzamiento el satélite cayó [2].



Figura 1.1. Sputnik 1 (izquierda) y Explorer 1 (derecha), primer y segundo satélites puestos en órbita en 1957 y 1958 respectivamente, dando inicio a la carrera espacial.

El 2 de febrero de 1958, los EE.UU. pusieron en órbita el Explorer 1 (figura 1.1) desde el Complejo de Lanzamiento 26 de la Estación de la Fuerza Aérea de Cabo Cañaveral, Florida, EE.UU. Fue el primer vehículo espacial que detectó los cinturones de radiación de Van Allen, bautizados así en honor a James Van Allen, quien había dirigido el diseño y la construcción de la instrumentación científica del Explorer 1. Este satélite envió datos durante algo menos de cuatro meses, hasta que sus baterías (pilas de mercurio) se agotaron. El pequeño satélite permaneció en órbita hasta el 31 de marzo de

1970, cuando se produjo su reentrada en la atmósfera y se precipitó al océano Pacífico [3].

El segundo satélite puesto en órbita por los EE.UU (cuarto en orden mundial) el 17 de marzo de 1958, el Vanguard 1 (figura 1.2) fue diseñado para realizar diversos experimentos científicos, entre ellos el uso (por primera vez en la historia) de celdas solares para la alimentación de un transmisor para el rastreo del satélite vía radio. Este transmisor estuvo operativo durante más de seis años mientras que otro transmisor alimentado por baterías de mercurio registró los datos durante 16 días y envió señales de rastreo durante 20 días, momento en que se agotaron las baterías [4].



Figura 1.2. Vanguard 1, primer satélite con paneles fotovoltaicos, puesto en órbita en 1958 por los EE.UU.

Desde entonces y hasta el día de hoy varios países se sumaron a la conquista del espacio utilizando celdas solares en el diseño de los sistemas de potencia. Inicialmente incluían dispositivos FV basados en silicio cristalino (10%-15% eficiencia típica) y posteriormente utilizando celdas solares basadas en materiales semiconductores III-V (por ejemplo *GaAs*) alcanzando eficiencias de casi el 30% en el caso de las multijunturas. Estos desarrollos han permitido al día de hoy a tener sistemas de potencia de varios kW o decenas de kW. En la figura 1.3 se muestra a modo de ejemplo la estación espacial internacional cuyos paneles solares están fabricados con celdas de silicio, siendo esta una de las últimas aplicaciones de dicho material en misiones espaciales.

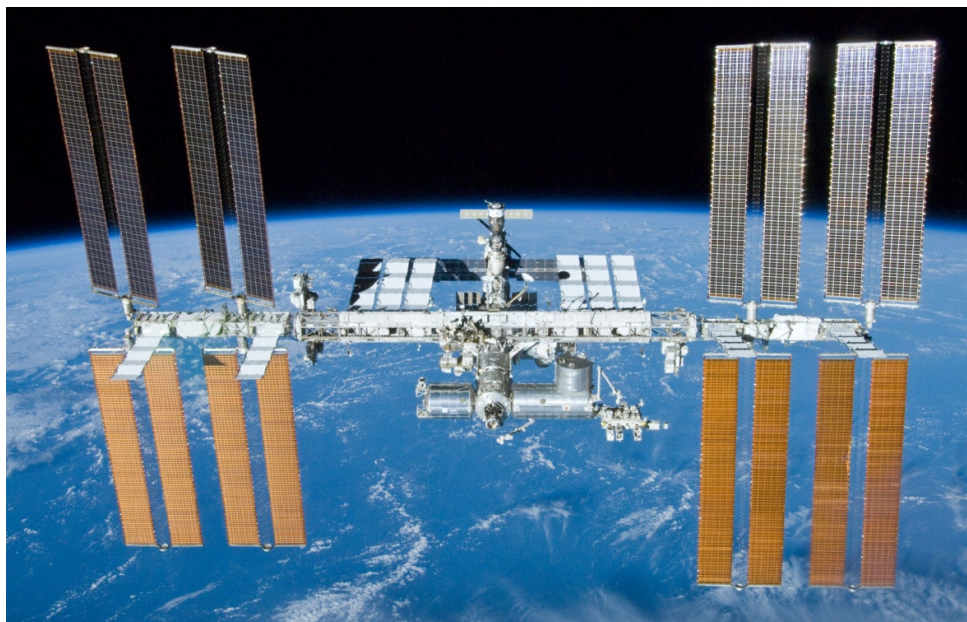


Figura 1.3. Vista desde el espacio de la estación espacial internacional. Sus módulos fotovoltaicos totalizan una potencia instalada de 120kW [5].

1.3 Antecedentes en la Argentina y el plan espacial nacional.

La Argentina comenzó a demostrar su vocación espacial a partir de 1960 cuando se establece la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) bajo la administración de la Fuerza Aérea y el mando del ingeniero Teófilo Tabanera [6]. Este organismo realizó actividades relacionadas con el desarrollo de cohetes sondas, la instalación de la antena de Mar Chiquita para recibir información del satélite Landsat (EE.UU.) y la instauración en el país del uso de imágenes satelitales. Entre sus hitos más importantes se destacan, el desarrollo de los cohetes Centauro, Orión, Canopus, Rigel (alcanzando éste último 300km de altura), y el proyecto Bio en el cual un mono realizó un vuelo suborbital el 23 de Diciembre de 1969 [7].

El primer satélite Argentino fue el LUSAT-1, que llevaba en su diseño paneles solares y fue obra de radioaficionados pertenecientes a la filial argentina de *radio amateur satellite* (AMSAT). El LUSAT-1, que se muestra en la figura 1.4, fue puesto en órbita por el cohete Ariane 4 desde Kourou, Guyana Francesa, el 22 de enero de 1990. A nuestros días, solamente su baliza de código Morse construida en la Argentina permanece activa emitiendo telemetría, mientras que el resto de las funcionalidades del satélite dejaron de funcionar al agotarse la vida útil de las baterías [8].



Figura 1.4. LUSAT 1, primer satélite argentino puesto en órbita en 1990.

La CNIE finalizó sus actividades en 1991 cuando el gobierno nacional decidió crear un organismo civil, descentralizado y especializado dedicado al uso pacífico del espacio: la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), único organismo competente de la Argentina para promover el desarrollo de las actividades relacionadas con la utilización civil del espacio en todo el ámbito de la República. Dentro de sus actividades más importantes estuvo la de proponer el Plan Espacial Nacional de la Argentina [9], el cual define a la Argentina como un "país espacial" entendido como la expresión de un pueblo pacífico que quiere reencontrarse con sus tradiciones científicas. Esto implica el uso intensivo de los productos de la ciencia y tecnología espacial con el principal objetivo de generar ciclos de información que consisten en el sensado, generación, transmisión, procesamiento, almacenamiento, disseminación y utilización de la información espacial en beneficio de todos para la utilización y aprovechamiento de la ciencia y tecnología con fines pacíficos. A mediados de los 1990, y en el marco de los objetivos de la CONAE, se comenzó el estudio de la primera serie profesional de satélites, destinada a cumplir funciones concretas mediante la transmisión de datos, imágenes y otros registros físicos durante largos períodos: la serie SAC.

1.4 Misiones SAC de la CONAE y su vínculo con el DES

El primer satélite de aplicaciones científicas fue el SAC-B, lanzado en cumplimiento del Plan Espacial de la CONAE el 4 de noviembre de 1996 por el lanzador Pegasus XL. Sus objetivos fueron el estudio avanzado de la física solar y astrofísica mediante la observación de fulguraciones solares, erupciones de rayos gamma, radiación X del fondo difuso y átomos neutros de alta energía. Esta misión fracasó debido a una falla en el sistema eléctrico de la tercera etapa del lanzador; sin embargo, los paneles solares pudieron ser desplegados permitiendo el encendido de uno de los transmisores y de algunos equipos. Durante los cinco contactos del satélite con las estaciones terrenas, todos los comandos enviados y la telemetría recibida mostraron la respuesta nominal esperada de los equipos encendidos de modo que el acontecimiento se consideró un éxito para la tecnología empleada y para INVAP S.E. (Investigaciones Aplicadas Sociedad del Estado) como constructor de satélites de observación terrestre o astronómica [10].

La misión SAC-A (figura 1.5), concebida como modelo tecnológico de la misión SAC-C, puso a prueba una serie de instrumentos desarrollados en el país potencialmente aplicables en otras misiones. Estuvo también dedicado a probar, experimentalmente, tanto la infraestructura material como la humana de los equipos de telemetría, telecomando y control. La misión permitió el entrenamiento de un grupo humano importante tanto para la preparación de los centros de control (*hardware* y *software*) como para el control de los satélites [11]. El sistema de Control de Actitud del satélite incluyó también una rueda de inercia desarrollada en la Argentina. Además, llevaba el primer experimento de celdas solares argentinas en el espacio [12] mediante dispositivos íntegramente elaborados en el DES de la CNEA:

- 2 pequeños paneles, compuestos por 7 celdas solares de silicio cristalino cada uno, para estudiar el comportamiento eléctrico de las celdas en el ambiente espacial.
- 4 celdas individuales y 1 en cada panel, distribuidas en diferentes caras del satélite, como sensores de posición angular, formando parte fundamental del sistema de orientación con respecto al Sol.

Puesto en órbita por el transbordador espacial Endeavour el 14 de diciembre de 1998, el SAC-A excedió su vida útil prevista (8 meses) sin presentar problemas técnicos. El satélite se quemó al entrar en la atmósfera en octubre de 1999, habiendo transmitido de manera correcta datos e imágenes.



Figura 1.5. *Satélite SAC-A visto desde el transbordador con los paneles aún replegados.*

El SAC-C fue un satélite argentino de teleobservación de la Tierra y de mediciones con fines científicos: temperatura y vapor de agua de la atmósfera, campo magnético y onda larga del campo gravitatorio terrestre, y estudio de la estructura y la dinámica de la atmósfera y de la ionósfera. Se lanzó el 21 de noviembre de 2000 con un vector Delta II desde la base estadounidense de Vandenberg (California, EE.UU.). El 15 de agosto del 2013, tres meses antes de celebrarse su decimotercer aniversario, llegó al final de su vida útil, superando ampliamente la vida media mínima de 4 años para la cual fue diseñado [13].

A fines de 1995, el Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica inició actividades relacionadas con el desarrollo de celdas y paneles

solares para satélites artificiales, dentro del marco de un acuerdo de cooperación entre la CNEA y la CONAE.

A partir de marzo de 2001, luego de la firma de un convenio de cooperación específica entre la CNEA y la CONAE, el DES se encuentra trabajando en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional. Este convenio, encuadrado dentro de la Ley N° 23.877 de innovación tecnológica, dio lugar a la iniciación en el CAC del Subproyecto Paneles Solares como parte de los Proyectos SAC-D y SAOCOM, para diseñar, fabricar y ensayar los paneles fotovoltaicos de ambas misiones. Las actividades previstas incluían, además del desarrollo de las tecnologías de fabricación y ensayo de los paneles, la elaboración de modelos teóricos que permitan diseñar y simular el funcionamiento del subsistema de generación de energía eléctrica (subsistema de potencia) del satélite a lo largo de la vida útil de la misión [14].

La misión SAC-D / Aquarius se encuadró en un programa de cooperación entre la CONAE, el Centro Goddard y el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), estos últimos parte de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) estadounidense. Su objetivo científico estaba orientado a obtener nueva información climática a partir de mediciones a nivel global de la salinidad del mar con el fin de tener una nueva visión de la circulación y procesos de mezcla en el océano, así como detectar focos de alta temperatura en la superficie terrestre para la obtención de mapas de riesgo de incendios y humedad del suelo para dar alertas tempranas de inundaciones. Fue puesto en órbita por la NASA el 10 de Junio de 2011 con un cohete Delta II 7320 en Vandenberg, California, EE.UU. [15]. El satélite fue diseñado y construido en su totalidad en el país; en particular, los paneles solares que lo alimentan fueron diseñados y fabricados en el DES de la CNEA de acuerdo a los requerimientos específicos de la misión. En la figura 1.6 pueden observarse los paneles solares del satélite SAC-D en el laboratorio de integración de paneles espaciales del DES e integrados al satélite en la Base Aérea de Vandenberg previo a su lanzamiento

La misión SAC-D/Aquarius transportó ocho instrumentos, siendo el principal de ellos el Aquarius, aportado por la NASA, que se encargó de medir la salinidad

superficial de los océanos y la humedad de suelo. Las cargas más importantes que llevaba la misión fueron:

- radiómetro de Microondas (CONAE),
- sensor Infrarrojo de nueva tecnología (CONAE),
- cámara de Alta Sensibilidad (INVAP S.E.),
- sistema de Recolección de Datos (CONAE),
- sensores de Demostración Tecnológica (CONAE),
- sonda atmosférica por radio-ocultación (Agencia Espacial Italiana (ASI)),
- CARMEN-1. Estudio de los efectos de la radiación sobre componentes electrónicos y sensor para detectar el daño ocasionado por macropartículas presentes en el espacio (Agencia Espacial Francesa (CNES)).

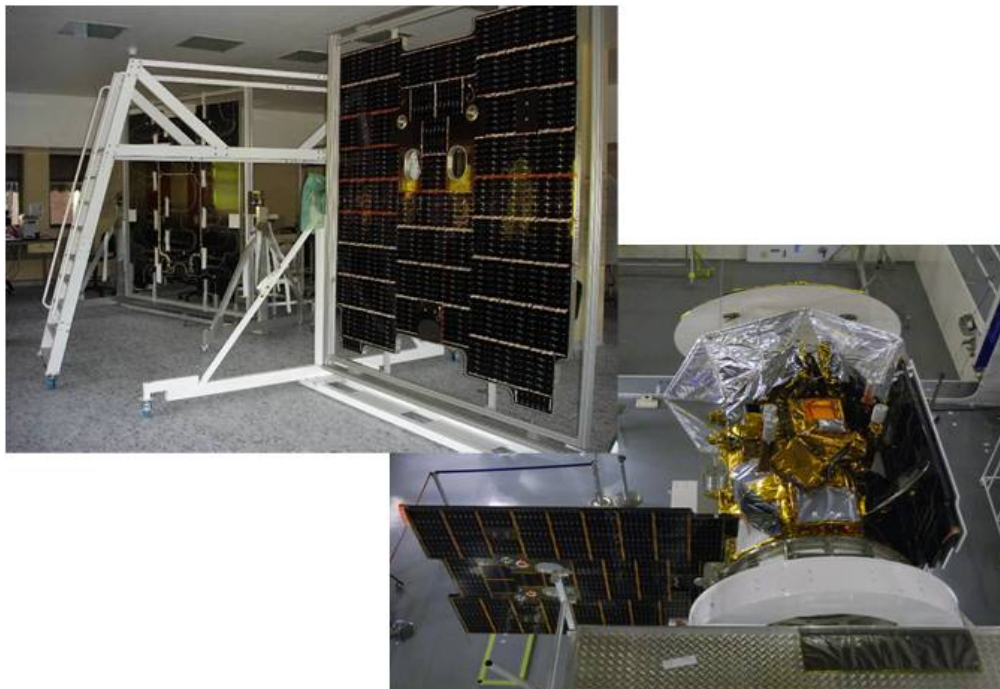


Figura 1.6. Paneles solares del satélite SAC-D en el laboratorio del DES (izquierda) e integrados al satélite (derecha).

1.5 Misiones SAOCOM Y SARE

Los satélites de la constelación SAOCOM se hallan en fase de desarrollo para ser lanzados a partir de 2016, estimando un tiempo de vida útil de al menos 5 años para cada satélite. El objetivo central de los satélites SAOCOM de observación de la Tierra es la provisión de productos específicos, en particular mapas de humedad de suelos y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones, independientemente de las condiciones meteorológicas y de la hora del día, con una resolución espacial entre 10 y 100 metros. Este proyecto consiste en la puesta en órbita de dos constelaciones, SAOCOM 1 y SAOCOM 2, donde la segunda serie tendrá los correspondientes avances tecnológicos como resultado de la primera. Cada constelación está compuesta a su vez por dos satélites A y B, básicamente iguales, por la necesidad de obtener la revisita adecuada. SAOCOM 1A y SAOCOM 1B comparten los mismos requerimientos de diseño, de funcionalidad y operatividad, por lo que su desarrollo se está llevando a cabo en simultáneo [16]. Esta serie de satélites abarca el desarrollo de instrumentos activos que operan en el rango de las microondas. Los paneles solares están siendo fabricados en el DES de la CNEA. Este proyecto es desarrollado en colaboración con la Agencia Espacial Italiana (ASI) para el sistema SIASGE (Sistema Ítalo Argentino de Satélites para Beneficio de la Sociedad, Gestión de Emergencias y Desarrollo Económico). Los satélites de las series SAC y SAOCOM fueron o están siendo construidos por INVAP S.E. para la CONAE en el marco del Plan Espacial Nacional.

La CONAE también tiene previsto el proyecto **SARE**, compuesto por dos grupos [17]:

- La serie SARE Pasivo que tendrá como carga útil instrumentos centrados en el rango óptico y de microondas pasivo. Esta instrumentación deberá tener características determinadas por las misiones que se vayan definiendo a lo largo del Plan Espacial Nacional para satisfacer los requerimientos de los ciclos. Las primeras misiones de esta serie estarán formadas por un grupo de satélites con cámaras de resolución espacial métrica y submétrica y cámaras de alta sensibilidad, en lanzamientos sucesivos, incluyendo también un sistema de colección de datos

- La serie SARE Activo contendrá como carga útil instrumentos de microondas activo, dando continuidad al programa SAOCOM e incluyendo un sistema láser LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*)

1.6 Otras misiones espaciales Argentinas.

El 16 de octubre de 2014, el satélite Arsat-1, perteneciente a la empresa argentina ARSAT, fue puesto en órbita por un cohete Ariane 5. Este satélite geoestacionario de telecomunicaciones ofrecerá una amplia variedad de servicios (telefonía, internet y televisión, por ejemplo) con cobertura completa en Argentina, Chile, Uruguay y Paraguay, zona que será ampliada a todo el continente con la puesta en órbita de los satélites Arsat-2 y Arsat-3 [18]. El Arsat-1 fue el primer satélite geoestacionario construido íntegramente en el país, por la empresa INVAP S.E., y su vida útil proyectada es de 15 años. En la figura 1.7 se muestra el satélite dentro del laboratorio de integración satelital de INVAP previo a ser ensayado en el centro de ensayos de alta tecnología (CEATSA) perteneciente a ARSAT e INVAP. En la misma figura se muestra el momento del lanzamiento del Arsat-1 desde la Guayana Francesa.



Figura 1.7. Der.: Satélite Arsat-1 en el área limpia de INVAP. Izq.: lanzamiento del Arsat-1 desde la Guyana Francesa el 16 de Octubre de 2014

El 26 de abril de 2013 la Argentina puso en órbita el pico-satélite CubeBug-1 (figura 1.8). Fue lanzado desde el Centro Espacial de Jiuquan en China. Sólo tiene dos kilos de peso y posee tres equipos de estudio: una rueda de inercia (para controlar actitud), un *startracker* [19] (obtiene fotos para determinar su posición) y una computadora para su navegación. Orbita la Tierra cada 93 minutos a una altitud de 650

km permitiendo que radioaficionados de todo el mundo descarguen los datos que genera y transmite. Se lo concibió con fines educativos y es monitoreado desde el Radio Club Bariloche [19]. Los paneles solares de este pequeño satélite fueron también fabricados por el DES.

El 21 de noviembre de 2013 se puso en órbita el nanosatélite CubeBug-2. Fue lanzado desde una plataforma en Rusia desde un vector Proton. Está fabricado con más de 80% de componentes argentinos entre los que se cuenta la computadora de a bordo. Posee una cámara fotográfica de 20 megapíxeles para obtener fotografías de la Tierra, un GPS desarrollado por la empresa argentina Satellogic y una carga para que los radioaficionados puedan localizarlo y enviar mensajes. Será monitoreado desde dos estaciones terrestres ubicadas en Bariloche (provincia de Río Negro) y en Tortuguitas (provincia de Buenos Aires) [20]. Parte de los paneles solares fueron fabricados en el DES.

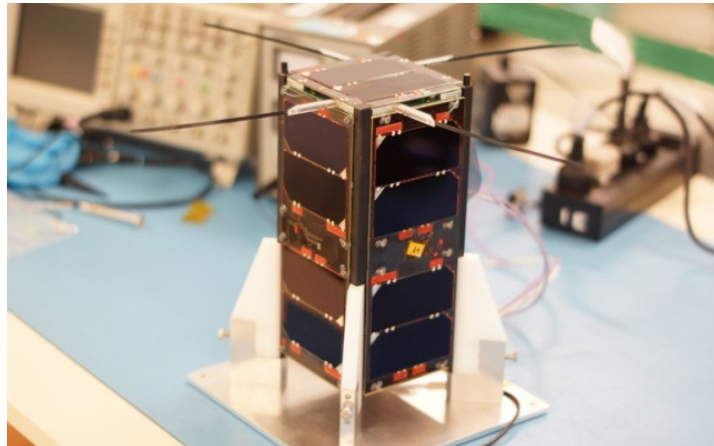


Figura 1.8. Satélite Cubebug-1 de Satellogic

El 20 de junio de 2014, el nanosatélite BugSat-1, desarrollado totalmente por la empresa argentina Satellogic, fue lanzado al espacio desde la ciudad rusa de Yasny y poco después alcanzó su posición orbital final desde donde tomará imágenes durante tres años para censar la Tierra. Los paneles solares de este satélite fueron fabricados por el DES y lleva tres equipos de estudio: una rueda de inercia (control de actitud en el espacio), un *startracker* (control de posición) y una computadora (control de navegación) [21]

1.7 El recurso Solar

El Sol es una fuente de energía con un flujo radiante de $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$ equivalente a una densidad de $62,5 \text{ MW}$ por cada m^2 de superficie solar. De esta emisión solar llega a la Tierra aproximadamente 1400 W/m^2 , debido a la distancia a la que se encuentra del Sol. La radiación recibida por unidad de superficie procedente de una fuente puntual de flujo radiante constante varía en razón inversa al cuadrado de la distancia entre la fuente y el receptor (Sol y Tierra respectivamente).

El Sol emite radiación electromagnética con una distribución espectral que abarca mayormente desde 100 nm hasta 2500 nm , similar a la emisión de radiación de un cuerpo negro a 6000 K . Es por ello que el uso de la energía solar a través de sus aplicaciones diversas requiere de la caracterización de la radiación tanto en su densidad de energía como en su distribución espectral.

Los parámetros que caracterizan la radiación solar se establecen para condiciones de distancia media Tierra-Sol y estos, como se mencionó, son: la constante solar y la distribución espectral de la radiación.

Se entiende por constante solar a la irradiancia sobre una superficie orientada normalmente a la dirección Tierra-Sol y situada fuera de la atmósfera terrestre a la distancia astronómica unidad ($1 \text{ AU} = 1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$, distancia media Sol-Tierra)

El valor estándar admitido por la NASA para los criterios de diseño de vehículos espaciales y por la ASTM (*American Society for Testing Materials*) hasta 1986 era de 1353 W/m^2 , con un error estimado de $\pm 1,5\%$ [22]. Es el resultado de medidas efectuadas a una altura de $11,6 \text{ km}$ sobre la superficie terrestre y corregida por los efectos atmosféricos de las capas superiores. Medidas más recientes efectuadas desde satélites así como la aplicación de nuevos métodos correctivos toman como valor aceptado internacionalmente al presente [23] de:

$$G_s = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (1.1)$$

El Sol tiene una temperatura superficial de 5762°K [24] y su espectro de radiación puede ser aproximado por el de un cuerpo negro a dicha temperatura. Justo encima de la atmósfera de la tierra la distribución espectral se conoce como de radiación *air mass zero* (AM0). Se define masa de aire AM, al espesor de atmósfera atravesado por la radiación solar para una dirección angular dada respecto del espesor correspondiente al Sol en el cenit (vertical del lugar). La masa de aire es una medida de cómo la absorción y dispersión en la atmósfera afectan el contenido espectral e intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra. El número de la masa de aire está dado por la aproximación (1.2) y puede aplicarse para apartamientos de hasta 60° con respecto a la vertical.

$$AM = 1/(\cos \theta) \quad (1.2)$$

donde θ es el ángulo de incidencia respecto a la dirección normal a la superficie (figura 1.9).

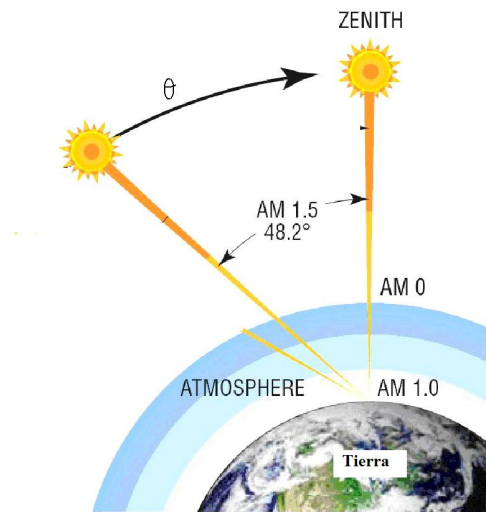


Figura 1.9. El espectro AM1 se obtiene en la superficie terrestre con el Sol en el cenit. El ángulo θ mide el apartamiento con respecto a la normal y sirve para calcular la masa atmosférica.

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 1kW/m². El contenido espectral de la luz solar en la superficie de la

Tierra, además de dar cuenta de la absorción debida a distintos gases que componen la atmósfera, también tiene una componente difusa (indirecta) debido a la dispersión en la atmósfera y a la reflexión en el 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 a la componente difusa, lo cual tiene importancia cuando se trata de sistemas que utilizan concentración óptica, donde la componente difusa no interviene. El espectro AM1,5g (*global*) incluye la componente difusa, mientras que el espectro AM1,5d (*direct*) no lo hace. Los espectros de radiación de un cuerpo negro ($T=5762\text{ K}$) AM0 y AM1,5g se muestran en la figura 1.10.

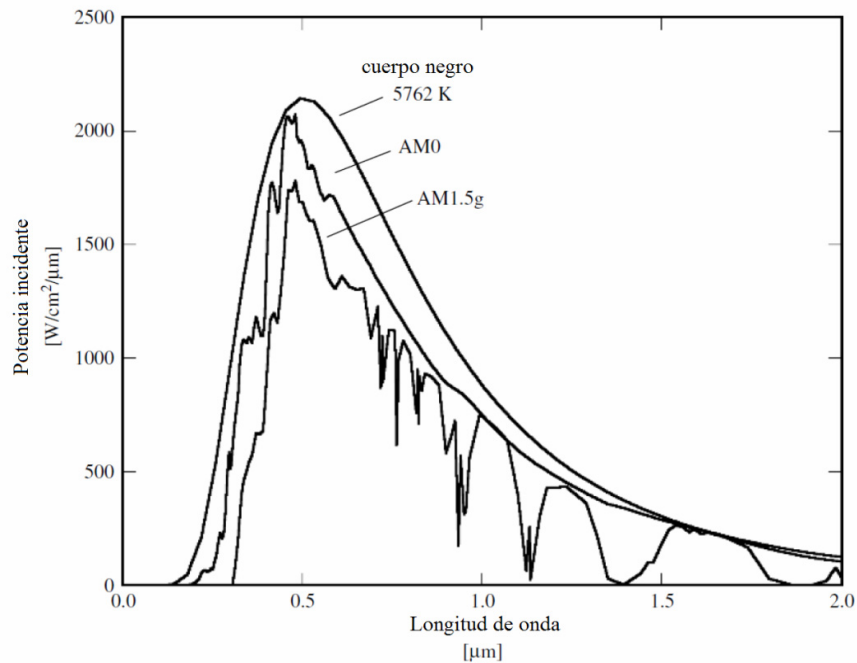


Figura 1.10. Comparación entre los espectros AM0, AM1,5g y radiación de cuerpo negro a la temperatura de 5762K.

1.8 Materiales de interés fotovoltaico.

El elemento básico de un módulo fotovoltaico es la celda solar. Las celdas solares basan su funcionamiento en el efecto fotovoltaico, descubierto por Henry Becquerel en 1839. La celda fotovoltaica de silicio (*Si*), la más utilizada a nivel global, se conoce a partir de 1941, pero recién en 1954 fue instrumentada como fuente de potencia marcando una evolución considerable por ser la primera estructura fotovoltaica

que lograba convertir luz en electricidad con una eficiencia razonable (6% reportado por RCA y *Bell Telephone Laboratories*) [25].

En lo que se refiere al funcionamiento de los dispositivos, la conversión fotovoltaica de la energía solar se basa en la propiedad que tienen algunos materiales de absorber radiación electromagnética y convertirla en portadores de carga eléctrica libres. Estos materiales, que son la base de las celdas solares, son los llamados semiconductores.

Los semiconductores (SC) son materiales sólidos cuyas bandas de valencia y conducción se encuentran separadas por un *gap* de energía, el cual es menor que en el caso de los aislantes. La cantidad de electrones disponibles a 0 K es tal que ocupan todos los niveles de la banda de valencia, dejando la banda de conducción vacía. Esto significa que el nivel de Fermi se encuentra dentro de la banda prohibida (*band gap*, o sencillamente *gap*), es así que un semiconductor puro y perfecto, a 0K, se comporta como un aislante.

Con el aumento de la temperatura, algunos electrones se liberan del enlace dejando un estado de energía vacío (hueco) el cual puede ser ocupado por un electrón vecino. El movimiento de un electrón de valencia a un hueco como así también de los electrones en la banda de conducción es lo que permite generar una corriente eléctrica [26].

En semiconductores absolutamente puros, la conducción por electrones y huecos es el producto de la rotura de los enlaces entre sus átomos. Entonces, la concentración de electrones n es igual a la concentración de huecos p ; a estas concentraciones se denominan concentraciones intrínsecas de portadores, n_i , de un semiconductor.

Cuando un tipo particular de impurezas, conocidas como dopantes, se introducen en un semiconductor, pueden controlar la concentración relativa de electrones en la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia. Estas impurezas pueden ser donoras (cuando aportan electrones a la banda de conducción) o bien aceptoras (por defecto de electrones en la banda de valencia). En el primer caso, la concentración de electrones es mucho mayor que la de huecos, y debido a que la corriente se debe esencialmente a los electrones se denomina semiconductor tipo n (negativo). En el segundo caso, la concentración de huecos es mucho mayor que la concentración de

electrones, los portadores de la corriente son los huecos y el semiconductor es tipo *p* (positivo).

Existen distintos tipos de semiconductores. Los semiconductores covalentes son elementos de la columna IV de la tabla periódica, como el *Si* y el Germanio (*Ge*). Otros semiconductores son los compuestos formados por relaciones estequiométricas de elementos de las columnas III y V (*GaAs*, *InSb*, *InAs*), por elementos de los grupos II y VI (*ZnSe*, *CdTe*); así como compuestos ternarios (*GaInP₂*, *GaInAs₂*), entre otros.

Los semiconductores cuyas propiedades físicas dependen de la presencia de impurezas se denominan extrínsecos. Para obtener semiconductores de este tipo se introduce en el cristal cierto número de impurezas con una concentración mucho menor que la del constituyente básico. A este proceso se lo llama dopaje.

Si bien el desarrollo tecnológico de la industria microelectrónica trajo aparejado el mayor énfasis en la investigación y desarrollo de las celdas solares de *Si*, existen otros materiales más apropiados que el *Si* con los cuales se obtienen celdas de eficiencias de conversión muy buenas. Los materiales semiconductores que tradicionalmente han sido utilizados y que continúan en investigación para usos fotovoltaicos son [27]:

- silicio cristalino (mono y policristalino)
- silicio amorfo y micro-cristalino hidrogenado (*a-Si:H* y *μc-Si:H*)
- materiales del tipo III-V como *GaAs*, *InP*, *GaInP*, *AlGaAs*
- materiales del tipo II-VI: *CdS*, *CdTe*
- materiales compuestos: *Cu₂InGaSe₄* (CIGS), *CuInSe₂* (CIS)
- materiales orgánicos
- Perovskita

La Tabla 1.1 muestra las eficiencias de conversión de energía solar en electricidad de las celdas de mayor interés en la actualidad.

Materiales FV	Estado Actual	Eficiencias máxima de las celdas en la Actualidad
		Comercial - laboratorio
<i>Si</i> monocristalino	Producción	18% - 25%
<i>Si</i> policristalino	Producción	16% - 20%
<i>Si</i> amorfo	Producción	10% - 16%
Multijunturas III-V	Producción (uso espacial)	30% - 35%
Multijunturas III-V	Producción (uso terrestre con concentración)	35% - 46,5%
<i>CuInGaSe</i> (CIGS)	Producción	12% - 20%
<i>CdTe</i>	Producción	9% - 14%

Tabla 1.1. *Eficiencias de conversión de las celdas de mayor interés en la actualidad.*

A continuación se describen los dos materiales más utilizados en la industria fotovoltaica, tanto en lo que se refiere a usos terrestres como a aplicaciones espaciales.

1.8.1 Silicio cristalino

Debido al desarrollo tecnológico de los dispositivos electrónicos, las celdas de *Si* cristalino son las más desarrolladas y usadas comercialmente, aunque las características electrónicas de este material no son las óptimas para aplicaciones fotovoltaicas. En cuanto a los requerimientos de pureza del *Si* para celdas solares, es menor que el que se requiere en la industria electrónica, pudiéndose utilizar el material de descarte de ésta última para los dispositivos fotovoltaicos. Esto fue así hasta 2006, cuando dado el explosivo crecimiento de la industria fotovoltaica fue necesaria la producción de *Si* grado solar para acompañar este crecimiento. Otra de las razones de la mayoritaria utilización y desarrollo de las celdas de *Si* es que éste es uno de los elementos más abundantes en la Tierra.

Tanto las celdas de *Si* monocristalino como las de policristalino se elaboran a partir de obleas cortadas de lingotes (mono o policristalinos). Los lingotes de *Si* monocristalino pueden ser de dos tipos: Czochralski (CZ) o Zona Flotante (FZ) [27]. El crecimiento CZ consiste en fundir el *Si* en un crisol con trazas del dopante (por ejemplo boro para obtener un material tipo *p*), y usando una semilla cristalina con la orientación requerida, y bajo condiciones controladas de temperatura y en ambiente de argón se extraen de la fundición lingotes cristalinos de hasta 20 pulgadas de diámetro y 2 metros de largo.

Los cristales tipo zona flotante son mucho más costosos y de mayor pureza. Estos se obtienen por una refundición en forma localizada ($\cong 2$ a 3 cm) del lingote. De esa forma las impurezas del cristal son segregadas hacia el extremo del mismo, de tal manera que eliminando éstas se obtiene un lingote de mayor calidad que el original.

Una vez obtenido el lingote se cortan las obleas de un espesor de 200 μ m aproximadamente, siendo el desperdicio ocasionado por el corte uno de los problemas que inciden en el costo de las celdas de este material.

El *Si* monocristalino se ha utilizado también para fabricar celdas de alta eficiencia para usos espaciales, aunque presentan el inconveniente de un peso relativamente elevado debido al espesor requerido. La eficiencia más alta alcanzada en celdas a nivel laboratorio de *Si-FZ* es de 25% y en *Si-CZ* es de 22% (1 sol, AM1.5g, 25°C).

Las técnicas de fabricación de silicio policristalino son, en general, más sencillas que las requeridas para producir silicio monocristalino, mientras que la pureza del material de partida es similar.

Las ventajas de las celdas de *Si* cristalino (mono y poli) se resumen a continuación:

- el *Si* es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre,
- su estabilidad temporal en la eficiencia es superior a 20 años,
- son las celdas más desarrolladas y estudiadas debido a los avances tecnológicos de la industria electrónica y de la propia industria fotovoltaica.
- la industria está bien establecida y son celdas utilizadas comercialmente,
- sus cualidades eléctricas, químicas y mecánicas son uniformes,
- en comparación con otros materiales fotovoltaicos (celdas de *a-Si:H*, *CdTe* y *CIS*), las celdas solares basadas en silicio tienen una eficiencia relativamente alta.

Entre las desventajas del silicio mono y policristalino se enumeran las siguientes:

- el sustrato de *Si* es todavía relativamente caro debido a las pérdidas en el corte y al proceso de purificación.

- los módulos no pueden obtenerse por integración monolítica, ya que las celdas están limitadas por las dimensiones de las obleas y deben soldarse e interconectarse en serie.
- el *Si* tiene *gap* indirecto lo cual hace que las obleas deban ser relativamente gruesas ($\cong 200\mu\text{m}$).

1.8.2 Arseniuro de galio (*GaAs*) y otros compuestos III-V

El arseniuro de galio (*GaAs*) es un semiconductor cuyo ordenamiento es similar a la estructura diamante y del *Si* cristalino pero con dos átomos diferentes por celda unidad del cristal.

Sus propiedades electrónicas permiten lograr celdas con mayor eficiencia de conversión. En particular, poseen un *gap* más apropiado y un coeficiente de absorción de la radiación solar más elevado. Dado que el *GaAs* es un semiconductor de *gap* directo, la luz es absorbida muy cerca de la superficie del dispositivo, y por lo tanto se requieren solo unos pocos micrones de espesor para la fabricación de una celda.

En la actualidad las celdas solares con mayor eficiencia son las celdas multijunturas basadas en materiales III-V que incluyen la utilización de este material. En aplicaciones espaciales (AM0) se alcanzaron eficiencias superiores al 30% mientras que en aplicaciones terrestres con concentración se obtuvieron eficiencias al día de hoy de 46% [28].

Estos dispositivos fotovoltaicos basados en materiales compuestos derivados del *GaAs* se fabrican mediante el crecimiento de estructuras cristalinas sobre un sustrato de germanio (*Ge*) que tiene un parámetro de red muy similar al *GaAs*. Esto se logra mediante una técnica denominada MOCVD (*metal-organic chemical vapor deposition*) la cual puede ser aplicada en forma secuencial a fin de elaborar estructuras más complejas, denominadas multijuntura, como es el caso de las celdas de triple juntura (TJ) utilizadas en las misiones SAC-D y SAOCOM. Dichas celdas tienen estructura *InGaP/GaAs/Ge* y son en la actualidad las más utilizadas en aplicaciones espaciales debido a su alta eficiencia y su alta resistencia a la radiación.

Como desventajas se pueden mencionar la escasez del galio en la naturaleza, lo que hace que el *GaAs* sea un material costoso, y la toxicidad del arsénico involucrado en

la fabricación. Por ello es importante estudiar cuidadosamente las consecuencias ambientales de la instalación de grandes sistemas solares basados en este semiconductor.

1.9 Referencias

1. J. Plá. Influencia de nuevas tecnologías en celdas solares en el costo de un sistema fotovoltaico para aplicaciones espaciales. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 20, pág. 45-50, 2007. ISSN 0328-932X
2. <http://www.history.nasa.gov/sputnik>
3. <http://www.jpl.nasa.gov/missions/explorer-1>
4. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft>
5. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/solar_arrays.htm#VZQcSFLzZFs
6. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/sobre-conae/quienes-somos/antecedentes>
7. Los nuevos satélites argentinos. National Geographic en español. Edición especial. Junio 2015. ISSN 1665-7764
8. <http://www.lusat.com.ar/>
9. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/sobre-conae/plan-espacial-nacional>
10. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/sac-b/objetivos>
11. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/sac-a/objetivos>
12. C.G. Bolzi, et al., First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 73, pág. 269 (2002).
13. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espa%C3%B1ol/misiones-satelitales/sac-c/objetivos>
14. M. Alurralde et al., “Development of solar arrays for argentine satellite missions,” Aerospace Science and Technology, vol. 26, pp. 38–52, (2013).

15. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espa%C3%B1ol/misiones-satelitales/sac-d/objetivos>
16. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espa%C3%B1ol/misionessatelitales/saocom/objetivos>
17. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/sare/objetivos>
18. <http://www.satellitesarsat.com.ar>
19. <http://www.pe0sat.vgnet.nl/satellite/cube-nano-picosats/cubebug-1/>
20. <http://www.pe0sat.vgnet.nl/satellite/cube-nano-picosats/cubebug-2/>
21. <http://www.telam.com.ar/notas/201406/68034-tita-el-tercer-nanosatelite-argentino-fue-lanzado-con-exito.html>
22. ISO/TC 20/SC 14 N 165. ISO/DIS 15387 (1997). Compilado por C.Wehrli, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium World Radiation Center, Davos, Suiza (1985).
23. ASTM-2000: ASTM E490 Solar Constant and zero air mass solar spectral irradiance tables; ASTM West Conehohocken US, pp. 1–16 (2000).
24. A. Luque y S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003. Chapter 3 “The Physics of the Solar Cell” Jeffery L. Gray
25. S. J. Fonash. Solar Cell Device Physiscs, Academic Press (1981).
26. A. Haug. Theoretical Solid State Physics 2, Pergamon Press (1979).
27. M.A. Green. Solar cells-Operating Principles, Technology and System Applications, Published by The University of New South Wales (1996).
28. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

Capítulo 2

Celdas solares fotovoltaicas

2.1 Introducción

Las celdas solares son, en principio, dispositivos semiconductores 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 homojuntura 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 térmica o implantación iónica 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.

En este capítulo se presenta la física de una celda solar basada en semiconductores cristalinos (como el *Si* o el *GaAs*), las ecuaciones que gobiernan los fenómenos de transporte de carga en su interior, y los parámetros característicos que se obtienen al resolver dichas ecuaciones y que caracterizan un dispositivo solar fotovoltaico. Por último se explicará el funcionamiento de las celdas solares multijuntura basadas en semiconductores compuestos formados por elementos III-V de la tabla periódica. Estas últimas son las utilizadas en las misiones espaciales de la CONAE.

2.2 Física 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 una dada longitud de onda, que se encuentra relacionada con la energía del fotón, E_λ por:

$$E_\lambda = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.1)$$

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 *bandgap* (E_G) del semiconductor, contribuirán al proceso de conversión de energía.

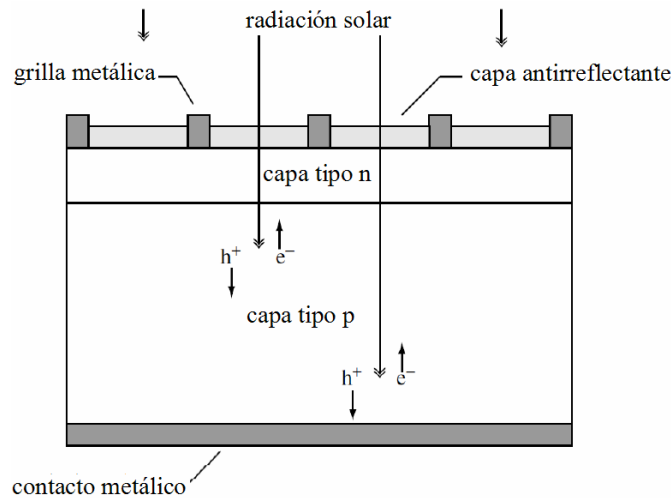


Figura 2.1. Esquema de una celda solar convencional. La creación de pares electrón-hueco, e^- y h^+ respectivamente, es representada [1].

Como fuera mencionado en el capítulo 1, las celdas solares pueden ser fabricadas a partir de una serie de materiales semiconductores, donde históricamente el más común ha sido el 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 ($GaAs$, $GaSb$, $InGaAs$, $InGaP$), 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 rango de absorción coincide razonablemente bien con el espectro solar, su abundancia en la corteza terrestre, y a que la tecnología de fabricación de dispositivos basados en silicio está bien desarrollada como resultado de la industria de semiconductores para aplicaciones en electrónica.

2.2.1 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 [2]. La solución define estructuras de bandas de estados de energía permitidos, 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 *bandgap*.

Los sólidos con una banda prohibida son aislantes a temperatura $T=0\text{K}$. 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 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 aquellos 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 $10^{22} \Omega\cdot\text{cm}$) [3].

Las bandas de energía en un semiconductor se muestran esquemáticamente en la figura 2.2. Los electrones (representados por asteriscos en la misma figura) llenan los

estados permitidos de abajo hacia arriba, y los estados cerca de la parte superior de la banda de valencia están vacíos, ya que algunos electrones son excitados 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 (es decir cuando no hay diferencia en el momento cristalino) como en el caso de la figura 2.3, se dice que es un semiconductor de *gap* directo. Cuando no están alineados, se denomina semiconductor de *gap* indirecto.

Como fuera mencionado en la sección 1.7 del capítulo anterior, el número de electrones y huecos en sus respectivas bandas, y por lo tanto la conductividad del semiconductor, puede ser controlado mediante la introducción de impurezas específicas (dopantes) en la red cristalina, llamados donores o aceptores. Por ejemplo, cuando el *Si* es dopado con fósforo, un electrón de cada átomo de fósforo introducido es donado a la banda de conducción (donor). 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 *Si* 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 de valencia y deja un hueco en la misma (aceptor). 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.

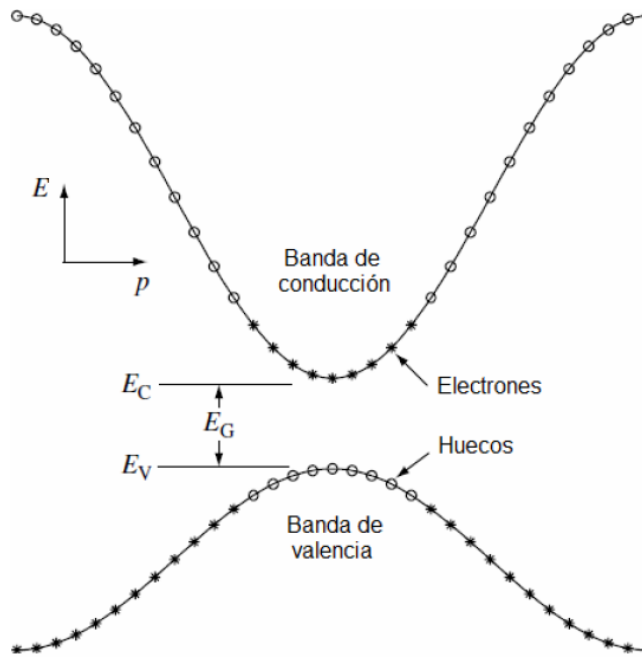


Figura 2.2. Esquema simplificado de un diagrama de energía de un semiconductor a $T > 0$ K. Los electrones cercanos al máximo en la banda de valencia fueron térmicamente excitados a los estados vacíos cerca del mínimo de la banda de conducción, dejando huecos tras de sí.

2.2.2 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 el proceso de absorción del fotón debe conservar el momento del electrón.

En la figura 2.3 se muestra el proceso básico de absorción de fotones en semiconductores de *bandgap* directo e indirecto. En el primer caso, como el momento del electrón se tiene que conservar, el momento cristalino del estado inicial y final es el mismo. En cambio, en semiconductores de *bandgap* indirecto, 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 cuántica 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 necesaria la disponibilidad de fonones de momento adecuado para que el proceso sea posible. Esto se puede observar en la figura 2.4, donde se muestra el coeficiente de absorción del *Si* (*bandgap* indirecto) y el *GaAs* (*bandgap* directo).

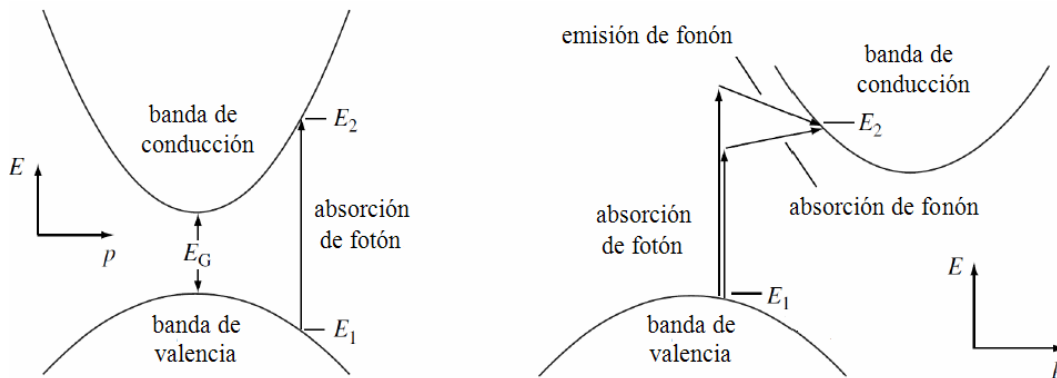


Figura 2.3. Absorción de fotones en semiconductores de *bandgap* a) directos y b) indirectos [1].

2.2.3 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 (con emisión de fotones) y no radiativos. Estos últimos además se dividen en: recombinación Auger y recombinación asistida por estados generados por defectos en el volumen y en superficie (trampas) [4].

Recombinación radiativa: es el proceso inverso al de la absorción y es mucho más eficiente en semiconductores de *bandgap* 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 material de *bandgap* indirecto, parte de la energía es compartida con un fonón.

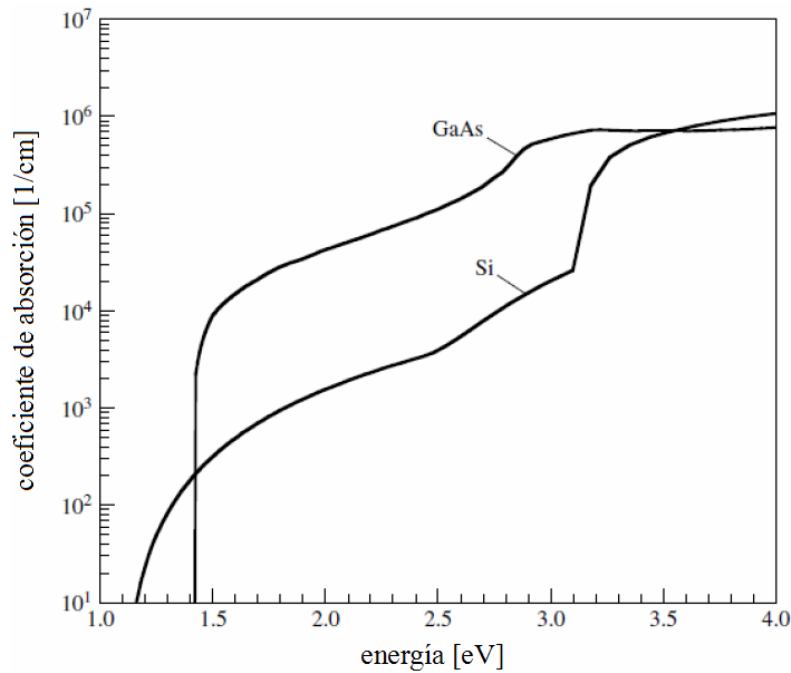


Figura 2.4. Coeficiente de absorción en función de la energía del fotón para el Si (bandgap indirecto) y GaAs (bandgap directo) a 300 K. Sus bandgaps son 1,12 y 1,42 eV, respectivamente [1].

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 para ser significativa 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 medio 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.

2.2.4 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].

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q(p - n + N_d - N_a) \quad (2.2)$$

Esta es la ecuación de Poisson, donde ϵ 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 átomos donores y aceptores (cm^{-3}), y q la carga del electrón.

Las ecuaciones de continuidad de los electrones y huecos son

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q \left(G_p - R_p + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q \left(R_n - G_n + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

donde G_p y G_n son las tasas de generación de electrones y huecos, respectivamente, mientras que R_p y R_n son las tasas de recombinación respectivas. Las densidades de corriente de electrones y huecos están dadas por [5]

$$\vec{J}_p = q\mu_p p \vec{E} - qD_p \nabla p \quad (2.5)$$

$$\vec{J}_n = q\mu_n n \vec{E} + qD_n \nabla n \quad (2.6)$$

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 o desplazamiento y el segundo corresponde a la difusión. Las ecuaciones (2.2)-(2.6) 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.

2.2.5 Junturas p-n

Tal como se comentara con anterioridad, 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 casi-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 cambian abruptamente de impurezas aceptoras a donoras, se obtiene una juntura abrupta. Esto se muestra en la figura 2.5, donde además se detallan las distribuciones de densidad de carga ρ , el campo eléctrico y las bandas de energía.

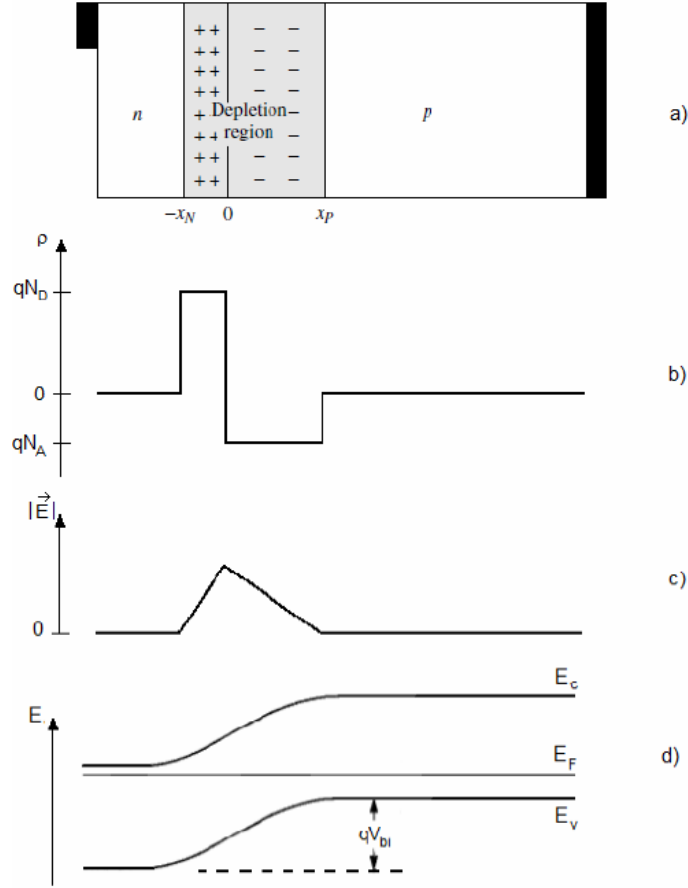


Figura 2.5. a) Esquema de una juntura p-n abrupta. b) Distribución de la densidad de carga. c) Campo eléctrico. d) Diagrama de las bandas de energía [1].

2.2.5.1 Capacidad de la juntura

Bajo la aproximación de juntura abrupta, un cambio en la tensión aplicada sobre 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 2.6. 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 [6]:

$$C = A \sqrt{\frac{q \cdot \epsilon}{2(V_{bi} - V)} \frac{N_a \cdot N_d}{N_a + N_d}} \quad (2.7)$$

donde A es el área de la celda. Cuando la celda está polarizada positivamente, existe también una capacidad de difusión debido al almacenamiento de los portadores minoritarios en las regiones cuasi-neutrales de la juntura [5].

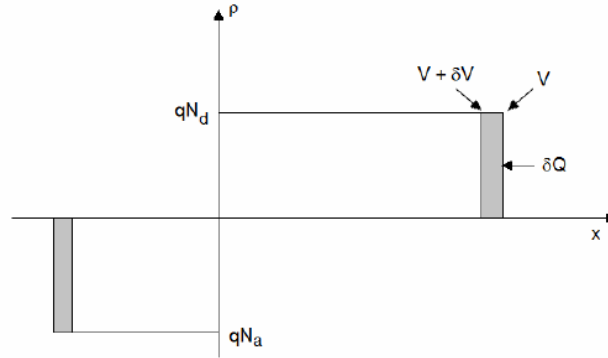


Figura 2.6. Cambio en la carga almacenada en la región de vaciamiento cuando se incrementa el voltaje aplicado [6].

2.2.6 Curva característica corriente-tensión (I - V)

Para encontrar una solución analítica sencilla del sistema de ecuaciones 2.2-2.6, es necesario realizar las siguientes aproximaciones [5]:

1. Juntura abrupta.
2. En la región de vaciamiento es válida la distribución de Boltzmann:

$$\begin{aligned} n &= n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \\ p &= p_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde E_F y E_i son la energía de Fermi y la energía de Fermi intrínseca, respectivamente, k la constante de Boltzmann 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 ($G = 0$) [6]:

$$J_{total} = J_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.9)$$

$$J_0 = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p}$$

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 y n es el factor de idealidad de la juntura cuyo valor se encuentra entre 1 y 2 (surge al incorporar las corrientes de oscuridad por recombinación en las regiones de vaciamiento y las casi-neutrales). La ecuación 2.9 es la ecuación del diodo ideal, y a J_0 se la denomina densidad de corriente de saturación inversa del diodo, la cual en dispositivos de Si es típicamente del orden de 10^{-9} A/cm².

Al iluminar la celda se crean pares electrón-hueco, con una cierta tasa de generación 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 condiciones de oscuridad más un término constante, J_L , denominado densidad de corriente fotogenerada [6]:

$$J_{total} = J_0(e^{qV/nkT} - 1) - J_L \quad (2.10)$$

Estos resultados se muestran en la figura 2.7 en donde se observa que la diferencia entre ambas curvas (iluminada y en oscuridad) es un término constante e igual a la densidad de corriente fotogenerada J_L . Este desplazamiento se conoce como principio de superposición, el cual establece que la curva iluminada de la celda puede obtenerse a partir de su curva en oscuridad más un término constante. Dicho término J_L , al ser varios órdenes de magnitud mayor a J_0 , es en la práctica la densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}) que la celda genera al ser iluminada. Por último, la corriente se

relaciona con la densidad de corriente a partir del área de la celda solar (A) como $I = A.J$.

Los parámetros principales que se definen para caracterizar eléctricamente a una celda solar son [6]

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

Tensión de circuito abierto (V_{ca}): es la tensión de la celda cuando $I=0$, se la calcula como:

$$V_{ca} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.11)$$

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

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{cc} \cdot V_{ca}} \quad (2.12)$$

Eficiencia (η): está dada por

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_{in}} \quad (2.13)$$

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

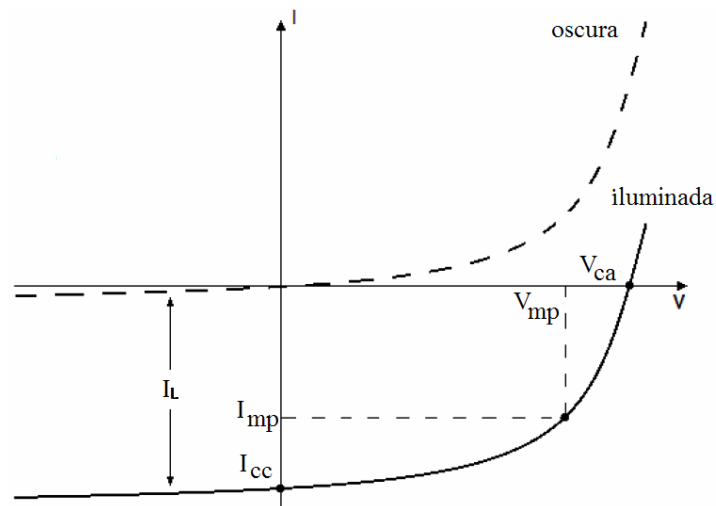


Figura 2.7. Curva característica I - V de una celda solar, en oscuridad (línea punteada) e iluminada (línea llena).

2.2.7 Circuito equivalente

Eléctricamente, la celda solar es equivalente a un generador de corriente en paralelo con un diodo (figura 2.8a). Cuando es iluminada, la celda ideal produce una fotocorriente proporcional a la intensidad de la luz. Esa fotocorriente se divide entre el diodo y la carga, en una proporción que depende de la resistencia de carga y el nivel de iluminación. Para resistencias de carga grandes, la mayor parte de la corriente 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 [7]. Contrariamente, para resistencias de carga pequeñas, casi toda la corriente generada circula por ella pero desarrollando un valor de tensión pequeño.

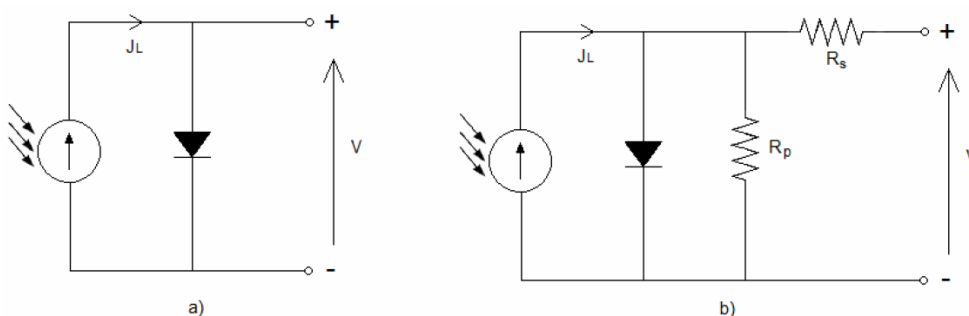


Figura 2.8. Circuito equivalente de una celda solar a) ideal y b) incluyendo resistencia serie (R_s) y paralelo (R_p).

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 eléctricamente equivalentes a dos resistencias parásitas: una en serie (R_s) y otra en paralelo (R_p) con la celda (figura 2.8b). 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 eléctricos de la celda 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 2.9. 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 (ecuación 2.10) se corrige según:

$$J = J_0(e^{q(V-JAR_s)/kT} - 1) - J_L + \frac{V - JAR_s}{R_p} \quad (2.14)$$

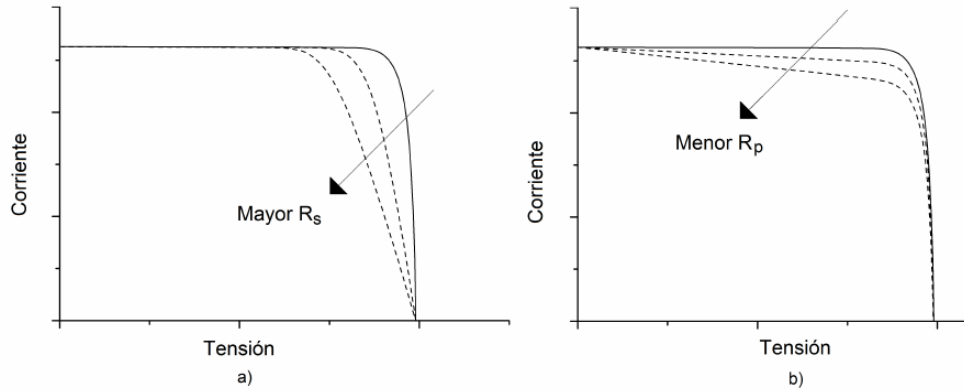


Figura 2.9. Efecto de a) incrementar la resistencia serie (R_s) y b) reducir la resistencia paralelo (R_p). En ambos casos, la curva con línea continua corresponde a $R_s = 0$ y $R_p = \infty$ [7].

2.3 Respuesta espectral

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

$$RE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{A \cdot E(\lambda)} \quad (2.15)$$

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:

$$I_{cc} = A \int RE(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (2.16)$$

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:

$$I_{cc}^{Msoles} = M \cdot I_{cc}^{1sol} \quad (2.17)$$

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

2.4 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*, aunque también puede haber compuestos ternarios y cuaternarios. Estos semiconductores tienen varias características que los hacen especialmente adecuados para las celdas solares. Varios de ellos disponen de *bandgaps* directos, y por lo tanto altos coeficientes de absorción, y *gaps* entre 1-2 eV que son de interés para las celdas solares; el *GaAs* con un *bandgap* de 1,42 eV, y el *In_{0,5}Ga_{0,5}P* con un *bandgap* de 1,85 eV, son los más importantes en el estado actual de las celdas de triple juntura comerciales. Dopar tipo n y tipo p estos materiales es relativamente sencillo, y pueden realizarse estructuras complejas con buenas cualidades cristalinas y optoelectrónicas utilizando técnicas de crecimiento epitaxial que permiten grandes volúmenes de producción, como MOCVD (*metal organic chemical vapor deposition*).

Como resultado, las celdas solares basadas en semiconductores III-V han alcanzado las eficiencias más altas en junturas simples (este es el caso específico del *GaAs* que tiene un gap prácticamente igual al ideal para una única juntura). Por otro lado la relativa facilidad de crear estructuras monolíticas complejas basadas en semiconductores III-V hace posible la fabricación de celdas multijuntura con eficiencias que exceden largamente el 30 %, superando a cualquier dispositivo de juntura simple [8]. En la figura 2.10 se muestra la evolución histórica de los records de eficiencia de

distintas tecnologías de celdas solares fotovoltaicas. Se aprecia que la tecnología dominante en los últimos años es la de los dispositivos basados en materiales III-V [9].

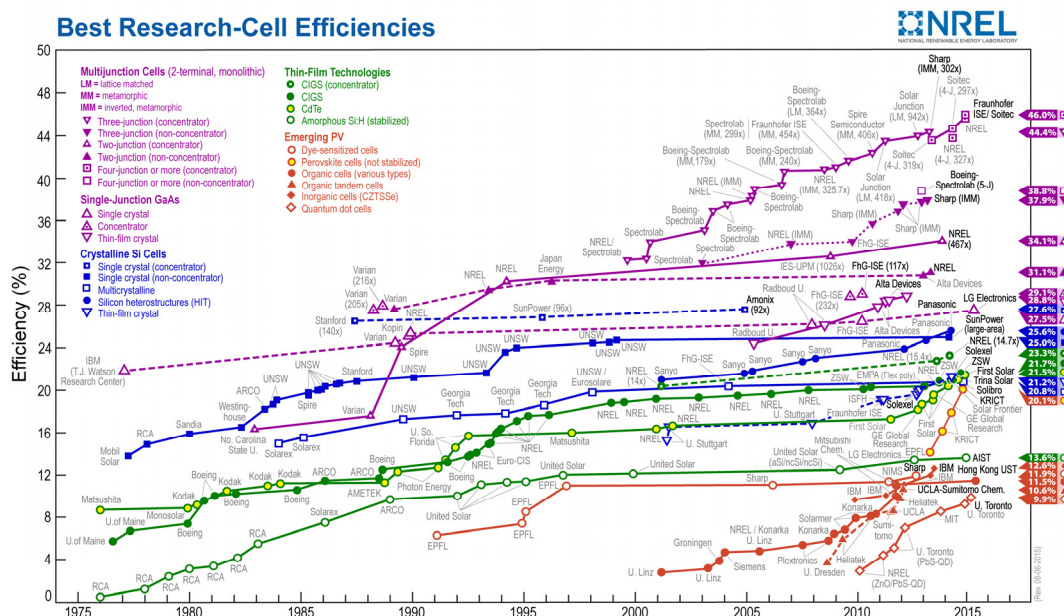


Figura 2.10. Evolución histórica de los records mundiales de eficiencia de distintos tipos de celdas solares FV. En violeta se muestra la evolución de las celdas basadas en materiales III-V y su supremacía con respecto al resto de las tecnologías.

Además, como estas celdas poseen una alta resistencia al daño por radiación, son particularmente aptas para aplicaciones espaciales. Como desventaja, 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 dado que posee el record de eficiencia de conversión (con concentración) con valores mayores al 46% [10].

2.4.1 Celda de triple juntura

El concepto de la multijuntura requiere que los fotones incidentes sean dirigidos hacia la subcelda adecuada para una dada energía del fotón. La configuración más común es organizar las subceldas (homojunturas) en forma apilada, como se muestra en la figura 2.10, fabricándolas monolíticamente sobre un mismo sustrato, por ejemplo *Ge*.

En este arreglo, la luz solar primero es absorbida por la subcelda de mayor *bandgap* y luego, progresivamente, por las subceldas con menor *bandgap*. Cada juntura actúa como un filtro pasa bajos de energía de fotón, transmitiendo sólo la luz sub-*bandgap*. Por lo tanto, tomando como ejemplo una triple juntura como la de la figura 2.11, los fotones con energía $h\nu > E_{g3}$ son absorbidos por esta juntura, fotones con $E_{g2} < h\nu < E_{g3}$ son absorbidos por la segunda juntura, y así siguiendo. Los *bandgaps* 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 *bandgaps*.

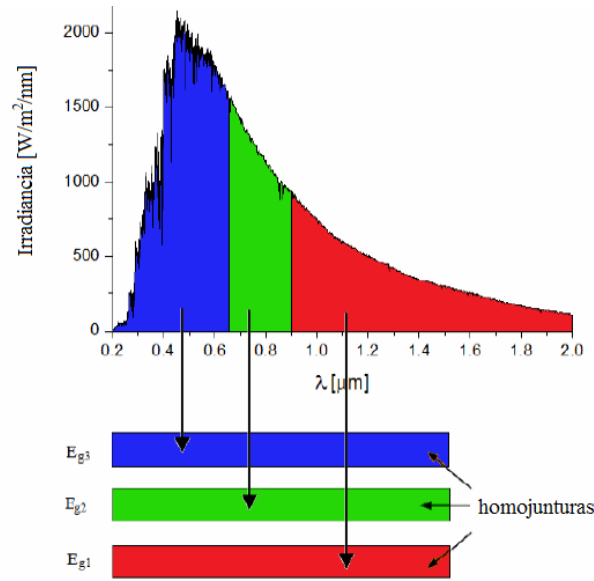


Figura 2.11. Esquema de una celda de triple juntura. El espectro corresponde a estándar AM0.

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:

$$V(I) = \sum_{i=1}^m V_i(I) \quad (2.18)$$

$$I = \min\{I_i\} \quad (2.19)$$

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

Una 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 [11] (figura 2.12), diseñada para aplicaciones espaciales y la cual fue utilizada para los paneles solares del satélite SAC-D/Aquarius. 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 2.13. Las subceldas *top* y *middle* poseen en su estructura 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 a su vez la difusión de dopantes desde la juntura túnel [12].



Figura 2.12. Celda solar de triple juntura *InGaP/GaAs/Ge* de la empresa Emcore Photovoltaics utilizada en este trabajo.

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, iluminada con el espectro AM0 y a 28°C, son: I_{cc} =474mA, V_{ca} =2,6V y 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*, nominalmente luego de su irradiación con electrones de 1MeV para una fluencia de $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$), 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 2.14. Se puede observar cómo cada subcelda tiene un rango definido de absorción entre 350-1800nm.

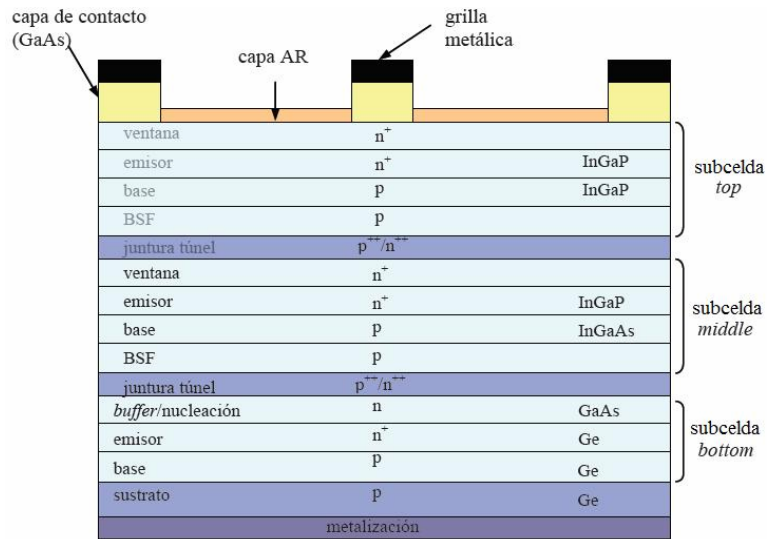


Figura 2.13. Estructura de una celda ATJ InGaP/GaAs/Ge Emcore [12].

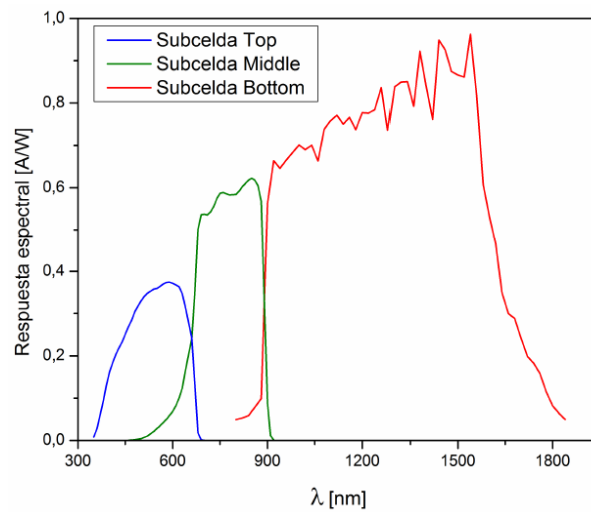


Figura 2.14. Respuesta espectral de la celda de triple juntura InGaP/GaAs/Ge Emcore dada por el fabricante.

2.5 Referencias

1. A. Luque y S. Hegedus., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003. Chapter 3 “The Physics of the Solar Cell” Jeffery L. Gray
2. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, inc., 7th edition, 1996
3. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics, Holt-Saunders, 1976
4. P. Würfel, Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co., 2005
5. S.M. Sze, Physics of semiconductor devices, John Wiley & Sons, 1981
6. M.A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Prentice-Hall, 1982
7. J. Nelson, The Physics of solar cells, Imperial College, 2003
8. A. Luque y S. Hegedus., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003. Chapter 9 “High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells” J. M. Olson, D. J. Friedman and Sarah Kurtz
9. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
10. T.N.D. Tibbits et al., "New efficiency frontiers with wafer-bonded multi-junction solar cells", Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1975, 2014.
11. <http://solaerotech.com/products/space-solar-cells-coverglass-interconnected-cells-cic/>
12. M. P. Barrera, Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales, Tesis doctoral, UNSAM, 2009

Capítulo 3

Medición de respuesta espectral en celdas solares III-V

3.1 Respuesta Espectral – Definición.

La respuesta espectral (RE) de una celda solar se define como la relación entre la corriente de cortocircuito que genera una celda (I_{ext} , medida en Ampere) y la potencia lumínica incidente (P_{in} , medida en Watt) a una dada longitud de onda. Cabe aclarar que la respuesta espectral de una celda es absoluta, no depende de su área, y su unidad es A/W. La RE se puede expresar como:

$$RE = \frac{I_{ext} [A]}{P_{in} [W]} = \frac{\frac{n_{e-} \times q}{t}}{\frac{n_f}{t} \times h \times \frac{c}{\lambda}} = \frac{n_{e-}}{n_f} \times \frac{\lambda \times q}{h \times c} \quad (3.1)$$

donde

n_{e-} es el número de electrones que circulan por el circuito externo

q es la carga del electrón [C]

t unidad de tiempo [s]

n_f número de fotones incidentes (a una determinada longitud de onda)

h constante de Planck [J.s]

c velocidad de la luz [m/s]

λ longitud de onda [m]

3.2 Utilidad e importancia

Como se mencionó, la respuesta espectral mide la relación entre la corriente generada y la potencia monocromática incidente en una celda solar. Si consideramos que la corriente eléctrica es carga eléctrica por unidad de tiempo y el flujo luminoso cantidad de fotones monoenergéticos por unidad de tiempo, la respuesta espectral evalúa entonces la eficiencia de conversión fotón/portador de carga de una celda solar. De la definición de respuesta espectral se desprende utilizando la expresión (3.1) la eficiencia cuántica externa (EQE) como:

$$EQE = \frac{n_{e^-}}{n_f} = \frac{RE}{\lambda} \times \frac{h \times c}{q} \quad (3.2)$$

La eficiencia cuántica externa de una celda brinda información de suma importancia ya que a través de ella se evalúa la eficiencia de conversión portador/fotón, íntimamente relacionada con los procesos de generación, recombinación y difusión de portadores de carga en los dispositivos fotovoltaicos. Además, la eficiencia cuántica pone de manifiesto las longitudes de onda a partir de las cuales la energía del fotón no alcanza a generar pares electrón-hueco, coincidiendo ésta energía con la del *gap* del material y en el caso opuesto, las longitudes de onda donde la penetración en el material (debido al coeficiente de absorción) es tan baja que la generación de portadores ocurre en las vecindades de la superficie del semiconductor recombinándose antes de alcanzar la zona de carga espacial (en los casos en que dicha superficie no esté suficientemente pasivada y/o el emisor contenga muchos defectos).

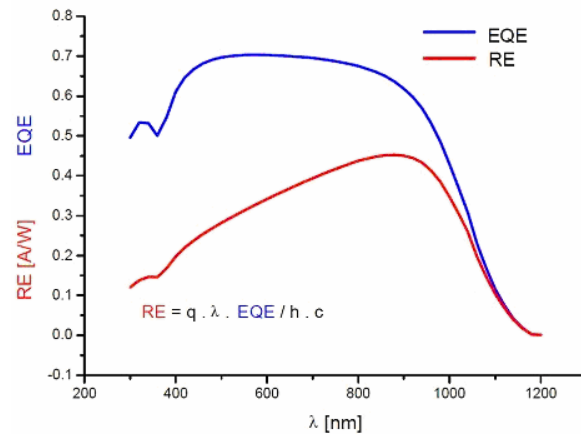


Figura 3.1. Respuesta espectral y eficiencia cuántica externa (EQE) típicas de una celda de silicio cristalino

En la figura 3.1 se muestra la respuesta espectral típica de una celda de silicio cristalino. Dado que para longitudes de onda cortas (300-400 nm), el coeficiente de absorción del silicio es alto y, por ende, la luz es absorbida cerca del contacto frontal, la curva para dichas longitudes de onda refleja las propiedades y características de la cara frontal de la celda solar. En cambio, para longitudes de onda largas (900-1100 nm), la respuesta espectral depende de las propiedades del volumen y de las características de la cara posterior de la celda solar, jugando un papel muy importante la ya mencionada longitud de difusión de los portadores minoritarios dentro del material [1].

3.3 Medición de respuesta espectral de una celda solar

La medición de respuesta espectral de una celda solar consiste, por definición, en la medición de la corriente de cortocircuito que genera por unidad de potencia monocromática incidente. Cabe destacar que la condición de polarización eléctrica que debe cumplir típicamente la celda es justamente la de cortocircuito, lo que determina que la diferencia de potencial entre sus contactos sea nula. Esta condición a priori es fácilmente alcanzable para celdas solares de una juntura como es el caso del silicio cristalino, pero como se verá más adelante para celdas solares multijuntura esta condición de cortocircuito se vuelve algo más crítica de alcanzar.

Por otro lado, debería medirse punto a punto (es decir para cada longitud de onda) la potencia de luz monocromática que incide sobre la celda. En teoría, habría que utilizar un radiómetro o piranómetro calibrado, que mida la intensidad en W/m^2 de la luz monocromática incidente y que además sea lo suficientemente sensible para irradiancias pequeñas, ya que el método de generación de luz monocromática (usualmente a través de filtros ópticos de banda angosta ó monocromadores) provee un flujo luminoso de baja intensidad, lo que hace que ésta implementación sea de difícil aplicación.

Un método habitual en aplicaciones prácticas, es medir respuesta espectral en forma comparativa utilizando una celda cuya respuesta espectral sea conocida (denominada celda de referencia) en donde se mide la corriente fotogenerada por dicha celda y por la celda a medir en las mismas condiciones experimentales; de este modo se independiza al sistema de medir la densidad de potencia de la luz monocromática que incide sobre la celda bajo ensayo. La respuesta espectral desconocida se obtiene entonces como

$$RE(\lambda) = \frac{I_{celda}(\lambda)}{I_{ref}(\lambda)} \times \frac{A_{ref}}{A_{celda}} \times RE_{(Ref)}(\lambda) \quad (3.3)$$

donde $RE(\lambda)$ es la respuesta espectral en función de la longitud de onda de la celda bajo ensayo, $RE_{(Ref)}(\lambda)$ es la respuesta espectral de la celda de referencia, $I_{celda}(\lambda)$ es la corriente producida por la luz monocromática sobre la celda a medir, $I_{ref}(\lambda)$ es la

corriente producida por la luz monocromática sobre la celda de referencia, A_{ref} es el área activa de la celda de referencia y A_{celda} es el área activa de la celda bajo medición.

Como se mencionó, la intensidad de la luz monocromática que se obtiene a través de un monocromador o un filtro óptico de banda angosta es muy débil, hecho que suele traer asociado algunos inconvenientes, como ser:

- a) dicho haz lumínico es susceptible a mezclarse con la luz ambiente o con reflejos espurios, contaminando de esta manera la señal monocromática.
- b) al ser la intensidad lumínica muy baja, la corriente que se fotogenera es también muy baja y generalmente tiene asociados problemas de ruido eléctrico para su medición.

Para mitigar estos inconvenientes, es común en estos casos desacoplar en frecuencia la luz monocromática mediante un disco ranurado rotante (llamado *chopper* o conmutador óptico) que pulsa el haz monocromático a una determinada frecuencia fija. De este modo, si se conoce con exactitud la frecuencia de conmutación, se simplifica la medición utilizando un detector sincrónico comúnmente denominado amplificador *lock-in*, quien medirá únicamente el valor eficaz de la señal a la frecuencia de conmutación.

La medición de la corriente fotogenerada por la luz monocromática se puede realizar de varias maneras. Una de ellas es midiendo con el amplificador *lock-in* la caída de tensión a través de una resistencia calibrada de bajo valor que se conecta a la celda. Cabe aclarar que el amplificador *lock-in* debe recibir una señal de referencia proveniente del controlador del *chopper*, que le sirve para la detección sincrónica de la señal conmutada.

Por último, la respuesta espectral estandarizada [2,3] se debe medir con el dispositivo bajo ensayo en condiciones similares a las de funcionamiento, lo que implica que además de la luz monocromática la celda solar debe recibir una iluminación similar a la solar natural. Esto produce que la pequeña señal de corriente conmutada se superponga con una corriente continua generada por la luz de polarización. Finalmente, la medición de *RE* debe realizarse a temperatura de celda controlada.

Resumiendo, la medición de respuesta espectral de una celda solar requeriría entonces:

- Una fuente de luz monocromática. Generalmente se utiliza una lámpara de espectro extendido que incluya el rango de longitudes de onda de interés, seguida de una rueda de filtros ópticos de banda angosta o un monocromador.
- Una rueda ranurada rotante (*chopper*) con su electrónica de control accesoria para poder conmutar la luz filtrada a una frecuencia fija.
- Un amplificador *lock-in* (amplificador sincrónico) que permita medir el bajo nivel de señal a la frecuencia del *chopper*.
- Una celda de referencia calibrada en respuesta espectral o un piranómetro calibrado.
- Una fuente de luz de polarización de la celda (para llevarla a condiciones de iluminación similares a la de operación).
- Una base termostatzada para mantener la temperatura de celda constante a lo largo de la medición.

En la figura 3.2 se aprecia el sistema básico de medición de *RE* en celdas solares.

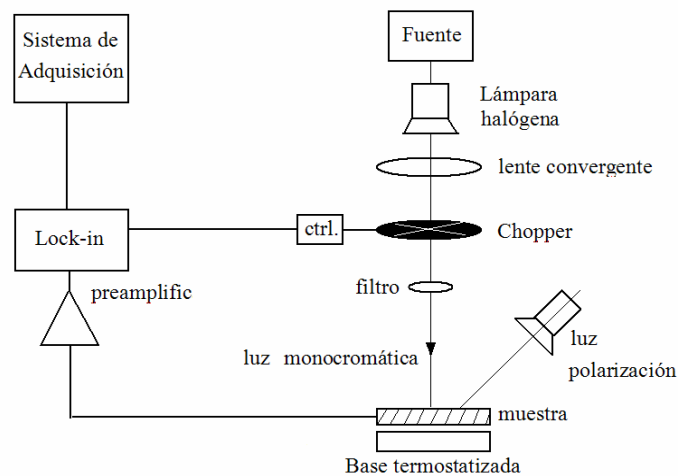


Figura 3.2. Esquema básico de medición de respuesta espectral para dispositivos FV.

3.4 Medición de *RE* en celdas solares monojuntura

3.4.1 Método normalizado de medición de *RE* en celdas solares monojuntura

El método para la determinación de la respuesta espectral relativa o absoluta de una celda fotovoltaica lineal (en un dispositivo fotovoltaico, la linealidad se refiere a la

linealidad de su corriente de cortocircuito con la irradiancia en un determinado intervalo) según las Normas IRAM [3] y ASTM [2], requiere el uso de luz de polarización a la que se superpone el haz monocromático. Sin embargo, se puede demostrar que en celdas solares lineales [2], como es el caso de la monojuntura de Si , la respuesta espectral no cambia significativamente si no se polariza el dispositivo. En cambio, en dispositivos no lineales (celdas de $a-Si$, que tienen alta densidad de defectos en el *gap*, por ejemplo) es imprescindible usar luz de polarización (por ejemplo, un simulador solar).

En estos métodos normalizados, se hace incidir normalmente sobre la celda un haz pulsado de luz monocromática. Simultáneamente, se ilumina la celda en la totalidad de su superficie con un haz continuo de luz blanca (luz de polarización), de irradiancia y componentes espectrales similares a aquélla que la celda recibe en condiciones normales de operación.

El haz de polarización produce en la corriente de cortocircuito de salida de la celda una componente de corriente continua (cc), mientras que el haz pulsado monocromático produce una componente variable (ca). A medida que se varía la longitud de onda del haz monocromático, se registra la componente pulsada (ca) de la corriente de cortocircuito.

Las normas mencionadas definen los conceptos referidos a respuesta espectral absoluta y relativa, así como también las características básicas que deberá cumplir el equipo de medición [3]:

- Para la generación de la radiación luminosa monocromática, deben utilizarse alguna de las alternativas siguientes: monocromadores de prismas o de red de difracción, asociados a lámparas de tungsteno u otras fuentes, o bien láseres continuos (no pulsados), fijos o sintonizables. Otra posibilidad resulta de utilizar un grupo de filtros ópticos pasabanda, de banda angosta, en conjunto con una fuente luminosa de espectro extendido, como puede ser una lámpara de tungsteno.
- La fuente luminosa monocromática deberá ser capaz de proporcionar longitudes de onda situadas más allá de la región donde el dispositivo bajo prueba tenga respuesta.

- Se requiere un mínimo de 12 longitudes de onda, comprendidas en el intervalo de respuesta de la celda bajo prueba.
- El ancho de banda del haz monocromático no deberá exceder 50 nm para una medición relativa de la respuesta espectral y 20 nm para una medición absoluta.
- La fuente luminosa deberá ser capaz de entregar su energía con una uniformidad espacial cuya variación no supere $\pm 2,5 \%$ sobre la superficie del plano de prueba, y una estabilidad temporal cuya variación no supere $\pm 1\%$ durante el período de medición.
- Debe asegurarse que no haya efectos asociados a luz dispersa o ajena a la medición, o hacer que sus efectos sean despreciables.
- Debe utilizarse un conmutador mecánico rotativo o cualquier otro dispositivo que permita la modulación pulsada de la fuente luminosa monocromática.
- Se utiliza una fuente luminosa de polarización para medir la respuesta espectral en condiciones cercanas a las normales de operación. Esta fuente, debe tener suficiente intensidad para asegurar que la celda bajo prueba opere en la región lineal de su respuesta. Dicha fuente luminosa de polarización debe producir sobre el plano de prueba una irradiancia con una homogeneidad espacial de $\pm 10\%$
- Se utilizará un amplificador de detección sincrónica (*lock-in*) para detectar señales de baja amplitud de la celda bajo ensayo.
- La celda debe permanecer en un intervalo de temperatura de $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Este procedimiento normalizado para la medición de la respuesta espectral no contempla en forma explícita la medición de *RE* utilizando el método por comparación con una celda calibrada en respuesta espectral. Sin embargo este método es similar a utilizar un fotodetector calibrado para medir la irradiancia de la luz monocromática, ya que medir la corriente de cortocircuito de la celda de referencia resulta equivalente a la medición de la potencia de la luz monocromática incidente.

3.4.2 Equipo de medición de respuesta espectral para celdas monojuntura.

3.4.3 Desarrollo del equipo de medición.

Inicialmente se desarrolló en el ámbito del Departamento Energía Solar (DES) un equipo para la medición de respuesta espectral de celdas solares monojuntura de silicio cristalino basado en filtros ópticos de banda angosta [4]. El sistema contaba con una rueda portafiltros montada sobre una columna cubriendo el rango de longitudes de onda desde 300nm hasta 1100nm, que es el intervalo en el cual las celdas solares de silicio cristalino responden, con intervalos de 50nm. Estos filtros interferenciales tienen un ancho de banda típico de 10nm-15nm y dimensiones físicas de 2x2 pulgadas. El montaje consistía en una fuente de luz de amplio espectro y relativamente alta intensidad (lámpara halógena de tungsteno de 250W alimentada por una fuente de tensión continua estabilizada de 24V y 10A), una lente convergente de cuarzo y un *chopper* alineados como se muestra en la figura 3.3. Además el *setup* completo contaba con una base termostatzada para controlar la temperatura de celda, una segunda lámpara halógena con reflector dicróico de 150W como fuente de luz de polarización, un amplificador *lock-in* *Stanford Research Systems, SR830 DSP* y una etapa de preamplificación de fabricación casera.

Para garantizar la temperatura de la celda durante la medición se dispuso de un equipo comercial basado en celda Peltier con la electrónica de control ya incorporada (*Cole Palmer Chilling heating block*)

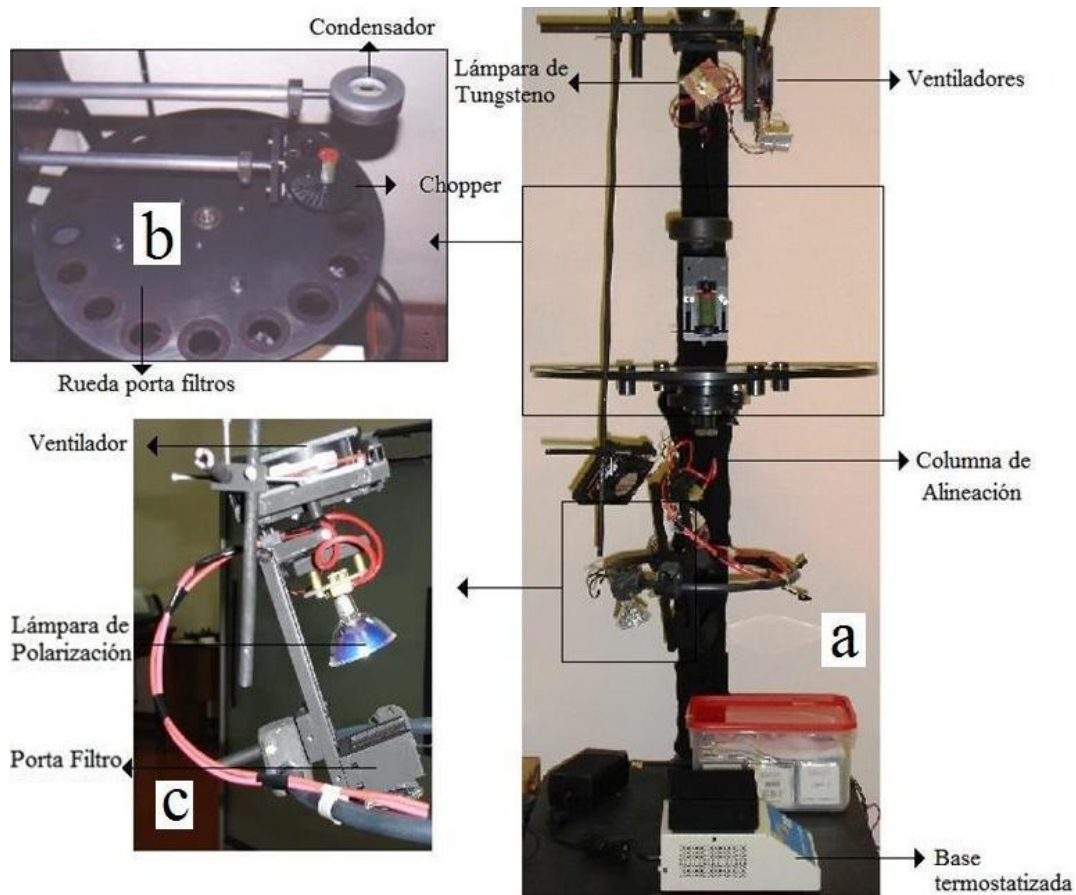


Figura 3.3. a) Vista general del dispositivo. b) Detalle del condensador y conmutador de filtros que proveen la luz monocromática. c) Detalle de la lámpara de polarización y el portafiltros.

3.4.3.1 Acondicionamiento de la luz monocromática

Como se dijo anteriormente, la luz monocromática es generada concentrando la luz de una lámpara halógena mediante una lente convergente y haciéndola pasar a través de un *chopper* y filtros ópticos de banda angosta. Un total de 17 filtros se encuentran montados sobre una rueda que rota sobre un eje para seleccionar la longitud de onda deseada.

Para la modulación del haz lumínico, el *chopper* se ubica en el foco inferior de la lente convergente. Un aspecto muy importante del *setup* es la relación de tamaño entre la imagen del filamento de la lámpara formada por la lente convergente en el plano del *chopper* y el tamaño de la ranura del *chopper*. La selección de la rueda ranurada se efectuó de modo tal que el tamaño de ambas sea similar para que la forma

de onda de la luz monocromática en función del tiempo no sea cuadrada sino trapezoidal (figura 3.4). Esta situación es favorable desde el punto de vista del contenido armónico de la señal comparado con una onda cuadrada, mejorando su detección y medición en el caso de utilizar un amplificador *lock-in* analógico [5].

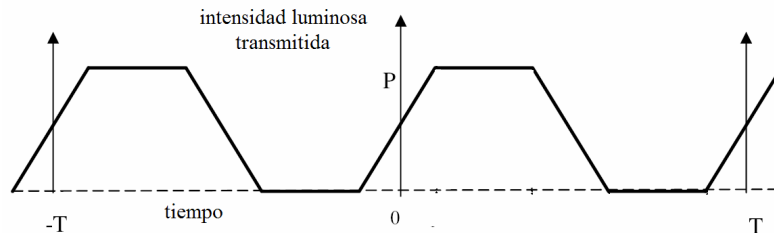


Figura 3.4. Forma de onda trapezoidal del haz monocromático a la salida del chopper.

Por otra parte, la distancia entre la fuente de luz monocromática y el plano de medición fue ajustada de modo que la uniformidad espacial del haz monocromático sobre dicho plano se encuentre debajo de $\pm 2,5\%$, de acuerdo al requerimiento del estándar ASTM [2]

3.4.3.2 Preamplificación y medición de la señal

En la figura 3.5 se observa el esquema eléctrico utilizado para la medición de RE , en el cual la corriente generada por la luz monocromática es sensada a través de una resistencia. Entre la resistencia de sensado y el amplificador *lock-in* se introduce una etapa preamplificadora cuyo fin se analizará en las próximas líneas. Para bloquear la componente continua de la tensión de la resistencia de sensado se coloca un capacitor de desacople en serie con la entrada del preamplificador. De este modo, el valor medido por el amplificador *lock-in* corresponde a la componente alterna de la caída de tensión en la resistencia multiplicada por la ganancia del preamplificador.

En el caso más general la señal a medir, ahora alterna, no debe estar superpuesta con ningún ruido de amplitud suficiente como para saturar la entrada del conversor analógico/digital del *lock-in*. Por este motivo se insertó entre la resistencia de sensado y el *lock-in* una etapa preamplificadora con ancho de banda limitado (centrado en 1kHz) que atenúa el ruido fuera de este valor central de 1kHz. Esto permite que el amplificador

lock-in pueda utilizar una mayor ganancia sin causar saturación. Por último, una fuente regulada de tensión continua se intercala en el circuito para asegurar la condición de cortocircuito en los terminales de la celda ($V_{cel} = 0$) compensando la caída de tensión en la resistencia de sensado.

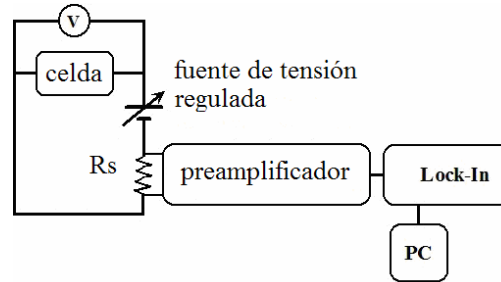


Figura 3.5. Esquema de medición. El voltímetro se utiliza como monitor para garantizar tensión nula en la celda. El preamplificador mejora la reserva dinámica del *lock-in*.

La etapa preamplificadora utilizada está basada en un amplificador operacional de bajo ruido (OP-07) en configuración inversora alimentado por una batería para minimizar posibles fuentes de ruido como el ruido de línea. En la figura 3.6 se aprecia su esquema circuital, mientras que su respuesta en frecuencia, simulada con el software PSpice, puede verse en la figura 3.7. Su ganancia total se ajusta como $-R_2/R_1$.

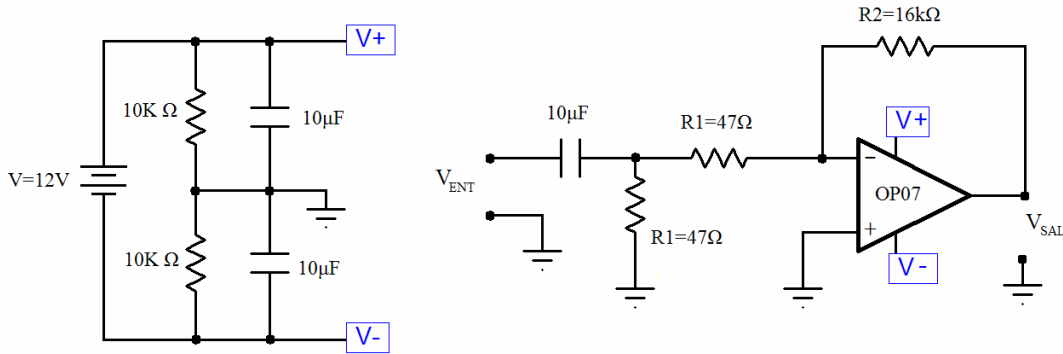


Figura 3.6. Circuito preamplificador utilizado (derecha). Su ganancia es de 280 veces (49 dB). El capacitor de entrada bloquea la componente continua de la tensión sobre la resistencia de sensado. Circuito de alimentación del amplificador operacional (izquierda).

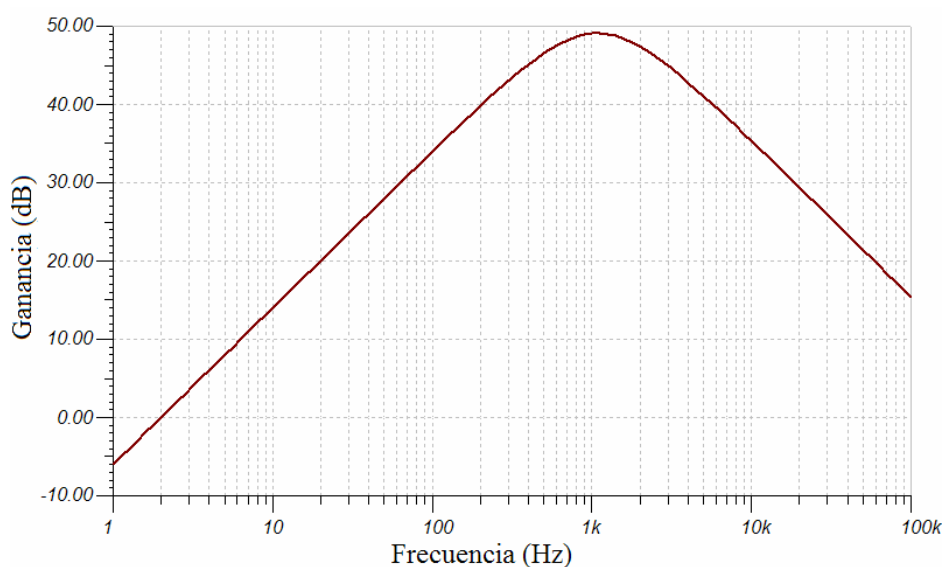


Figura 3.7. Respuesta en frecuencia de la etapa preamplificadora.

3.5 Mediciones de *RE* en celdas y sensores solares de *Si* cristalino

3.5.1 Condiciones de medición – Polarización lumínica y eléctrica.

Para la medición de la *RE* de una celda monojointura se deben cumplir las condiciones de ensayo ya mencionadas: por un lado la celda debe de estar en cortocircuito, es decir la diferencia de potencial entre sus bornes debe ser nula. Por otro lado, las condiciones de operación de la celda desde el punto de vista lumínico deben ser cercanas a las de funcionamiento, lo que implica una irradiancia cercana a 1kW/m^2 para aplicaciones terrestres o bien a 1367W/m^2 para aplicaciones espaciales. Para obtener estas condiciones se debe polarizar a la celda tanto eléctricamente como lumínicamente.

Ahora bien, al conectar la resistencia de sensado a la celda, existirá también una caída de tensión continua (debida a la corriente generada por la luz de polarización), por lo que se perderá la condición de cortocircuito ya que en los extremos de la celda aparecerá cierta diferencia de potencial (figura 3.8). Para poder cumplir con la condición de cortocircuito, es necesario entonces colocar en el circuito una fuente de tensión en serie con la resistencia de modo tal que contrarreste la caída de tensión de la misma. De este modo se garantiza que en los terminales de la celda la caída sea de cero volt. (figura 3.9)

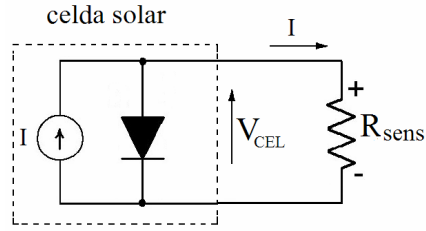


Figura 3.8. Al insertar la resistencia de sensado la celda solar deja de estar en condiciones de cortocircuito; $V_{CEL} = I \times R_{sens}$

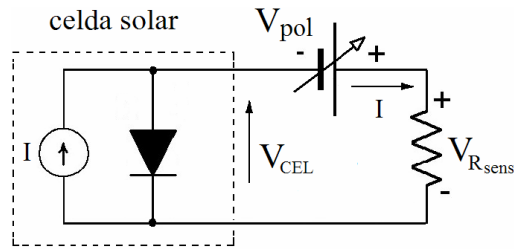


Figura 3.9. La condición de cortocircuito se alcanza colocando una fuente de tensión de modo que $V_{Rsens} + V_{Pol} = 0 = V_{CEL}$

Una vez que se alcanza la condición de cortocircuito, que se verifica midiendo tensión igual a cero en los terminales de la celda, se lleva a cabo la medición de la celda bajo ensayo y la celda de referencia para las 17 longitudes de onda. En el caso que la resistencia de sensado sea la misma para la celda de referencia y la celda a medir, reemplazando en la ecuación (3.3) la RE de la celda se obtiene entonces mediante:

$$RE(\lambda) = \frac{V_{celda}(\lambda)}{V_{ref}(\lambda)} \times \frac{A_{ref}}{A_{celda}} \times RE_{(Ref)}(\lambda) \quad (3.4)$$

Siendo V_{celda} y V_{ref} las tensiones medidas por el *lock-in* para la celda bajo ensayo y la referencia respectivamente.

3.5.2 Resultados en la medición de RE y EQE en celdas monojuntura de silicio.

A continuación se muestran mediciones de respuesta espectral y la correspondiente eficiencia cuántica en distintas celdas de silicio elaboradas con diferentes técnicas antirreflectantes (Tabla 3.1 y figura 3.10). Se muestra también la RE

de un sensor de posición de silicio antes y después de ser sometido a un ensayo de daño por radiación. Todos estos dispositivos fueron elaborados en el DES.

Celda.	Resistividad de la oblea y tipo	Estructura antirreflectante	Área
296_T6	Baja (p)	Texturada	8 cm^2
296_07	Baja (p)	Plana, ($<50\text{nm}$ de SiO_2)	8 cm^2
208_01	Baja (p)	Si-SiO ₂	$3,6\text{ cm}^2$
298_B	Alta (p)	Si-ZnS	16 cm^2

Tabla 3.1. Celdas de silicio monocristalino elaboradas en el DES con distintas capas antirreflectantes (AR).

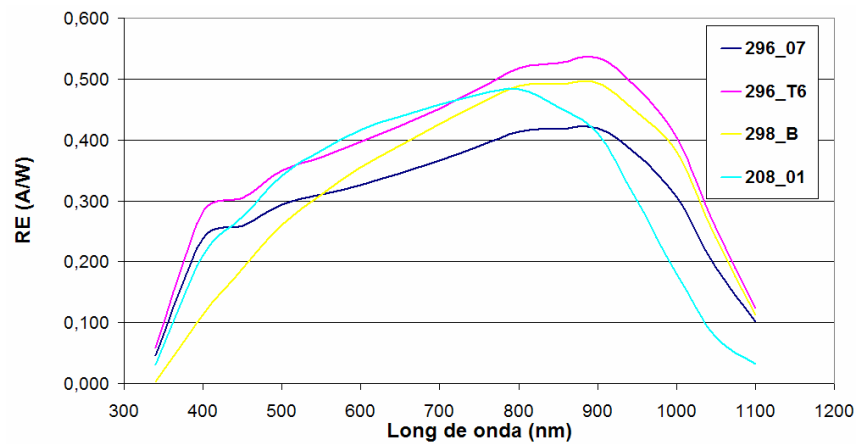


Figura 3.10. Medición de respuesta espectral de las celdas solares de silicio de la Tabla 3.1.

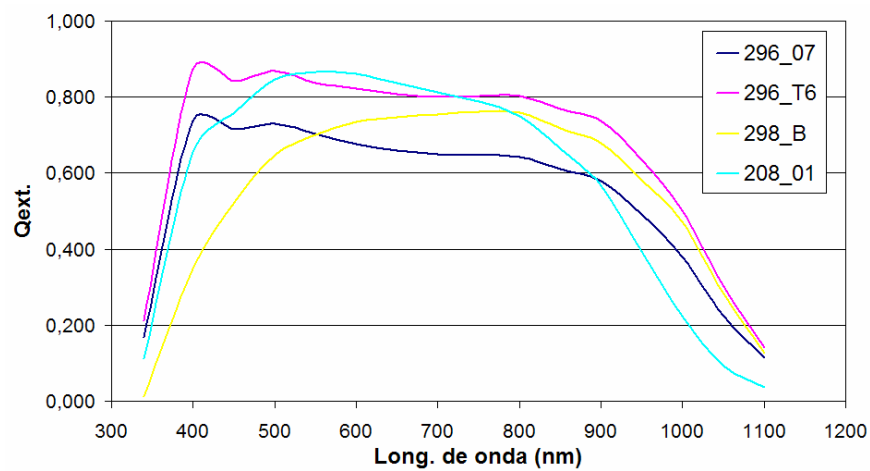


Figura 3.11. Eficiencias cuánticas obtenidas a partir de la medición de RE de las celdas de silicio de la Tabla 3.1.

La curva de eficiencia cuántica (figura 3.11) nos permite evaluar la eficiencia de la celda “a lo largo de su espesor” desde su cara frontal pasando por la región de carga espacial y finalmente en el volumen de la misma (sustrato de *Si*) brindando de esta manera información rica sobre las características de las celdas, al permitir evaluar el diseño de su estructura y el proceso de fabricación.

En las celdas evaluadas las diferencias apreciables se encuentran básicamente en dos rangos de longitud de onda: a) en la región de longitudes de onda cercanas a 400nm (celda 298_B vs. demás) donde se pone de manifiesto una mala pasivación de la cara frontal de dicha celda (menor eficiencia) y b) en los valores máximos que alcanza la curva de *EQE* donde se manifiesta la mayor colección de fotones por parte de la estructura antirreflectante (por ejemplo la celda 296_07 sin capa AR, con menor respuesta). Para el caso de la celda 208_01 se observa que para longitudes de onda largas la eficiencia decae prematuramente, debido a que el tiempo de vida de los portadores minoritarios (y por ende la longitud de difusión) del material base es menor al de las demás, recombinándose antes de alcanzar la región de carga espacial.

A modo ilustrativo, en la figura 3.12 se muestra la *RE* de un sensor de *Si* cristalino utilizado como sensor de posición para satélites antes y después de ser sometido a un ensayo de daño por radiación [6] para una fluencia de partículas equivalente a la que recibiría durante su vida útil en órbita LEO. Se aprecia una menor respuesta espectral para longitudes de onda largas debido a una disminución del tiempo de vida media de los portadores provocado por la introducción de defectos en la estructura cristalina. Estos sensores, como se verá en el capítulo 5, fueron utilizados en distintas misiones espaciales.

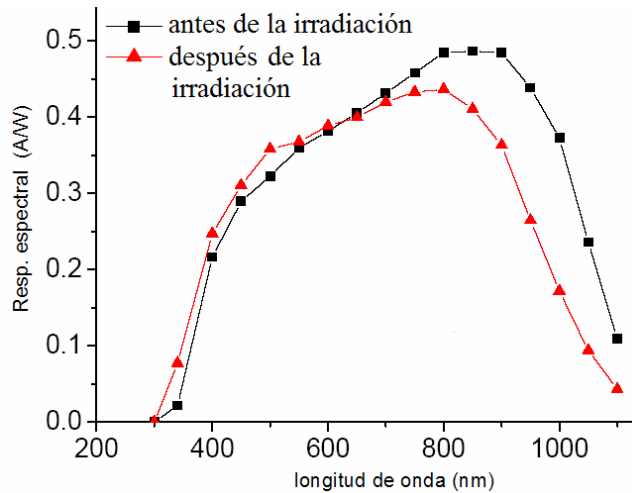


Figura 3.12. Medición de respuesta espectral de un sensor de posición grueso de silicio cristalino desarrollado en el DES antes y después de ser sometido a un ensayo de daño por radiación de partículas.

3.6 Medición de *RE* en celdas solares multijuntura.

3.6.1 Introducción a la problemática en la medición de *RE* en celdas solares multijuntura

Desde el punto de vista teórico, la medición de respuesta espectral en celdas solares multijuntura se lleva a cabo de la misma manera que para el caso de celdas de una única juntura, con la salvedad de que lo que se quiere ahora es obtener la respuesta espectral de cada una de las subceldas que componen una celda multijuntura.

Para medir la respuesta espectral en celdas solares multijuntura hay que tener en cuenta que cada subcelda está conectada en serie y no se tiene acceso a sus terminales eléctricos como puede verse en la figura 3.13, donde se esquematiza una celda triple-juntura (TJ) *InGaP/GaAs/Ge* de estructura monolítica o tándem del tipo de las analizadas en el presente trabajo. Esta imposibilidad hace que no se pueda garantizar la condición de cortocircuito de cada subcelda, dado que no es factible conectar un voltímetro en paralelo con ella.

A fin de seleccionar la subcelda a medir, se aprovecha la característica constructiva de las celdas multijuntura en donde las subceldas están conectadas eléctricamente en serie, de manera tal que de acuerdo a las componentes espectrales de

la iluminación incidente la subcelda que genera menos corriente será aquella que limite la corriente de cortocircuito del conjunto. Así, la manera de seleccionar una dada subcelda es modificando el espectro de la luz de polarización de modo tal que dicha subcelda sea aquella que genere la menor fotocorriente. Dicho en otras palabras, la corriente pulsada generada por la luz conmutada que circula por el circuito externo es igual a la generada por la subcelda que limita la corriente del tándem. Una vez seleccionada la subcelda a medir, el procedimiento de medición es análogo al utilizado en celdas monojuntura, pero la luz monocromática debe ahora estar definida sobre un intervalo de longitudes de onda que incluya la respuesta de todas las subceldas.

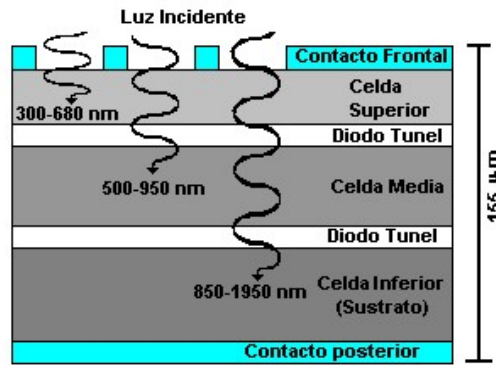


Figura 3.13. Esquema de una celda triple-juntura InGaP/GaAs/Ge. Pueden apreciarse las subceldas Top (Superior, de InGaP), Middle (Media, de GaAs) y Bottom (Inferior, de Ge)

Por otra parte, es necesario distinguir entre la caída de tensión en los terminales de la celda y la tensión de operación de cada subcelda individualmente. Como fue mencionado anteriormente, las tres subceldas se encuentran conectadas en serie, y por lo tanto resulta $V_{cel} = V_{Top} + V_{Middle} + V_{Bottom}$; por ello la condición de corto circuito de la celda ($V_{cel} = 0$), no significa que la caída de tensión en la subcelda a medir sea nula [7]. Queda claro entonces que esta condición de cortocircuito no implica que las subceldas del tándem lo estén; por el contrario, la subcelda que limita la corriente del conjunto queda polarizada en inversa por las otras dos. En la figura 3.14 se observa como al limitar la corriente la subcelda de Ge (bottom) en una celda triple juntura de InGaP/GaAs/Ge, las dos subceldas superiores (top y middle) trabajan en un valor cercano al de sus tensiones de circuito abierto y por ende si la celda TJ está en cortocircuito la subcelda de Ge queda polarizada con $V_{Ge} = -(V_{GaAs} + V_{InGaP})$, donde V_{GaAs}

y V_{InGaP} son aproximadamente igual a las tensiones de circuito abierto de las respectivas subceldas.

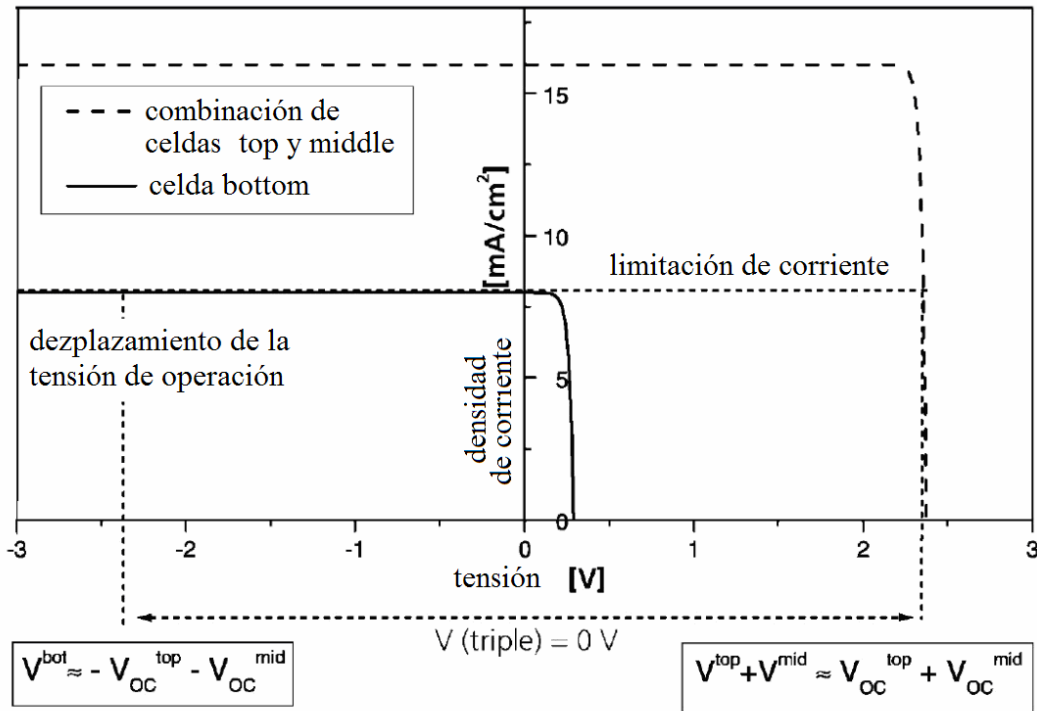


Figura 3.14. Ejemplo de limitación de corriente y cambio en la tensión de operación, visualizado por las curvas I - V calculadas con la ecuación del diodo ideal [7].

Si la tensión de ruptura inversa de cada subcelda fuese lo suficientemente grande comparada con la tensión de circuito abierto de una celda TJ y además cada una tuviera una resistencia paralelo alta (cosas que sucederían si cada subcelda se comportase como un diodo ideal), esto no representaría un problema y la medición podría realizarse con la celda TJ en cortocircuito sin inconvenientes (como en general es el caso de las subceldas de $GaAs$ y $InGaP$ en celdas triple-juntura $InGaP/GaAs/Ge$). Pero si estas condiciones no se cumplen (como en el caso de la subcelda de Ge de las celdas triple-juntura mencionadas anteriormente), hay que seguir un procedimiento más cuidadoso para colocar dicha subcelda en condiciones cercanas a cortocircuito. Una discusión más detallada acerca de los problemas que pueden aparecer en la medición de la RE en multijunturas se encuentra en el trabajo de Meusel et al. [7].

La figura 3.15 muestra la *RE* típica de una celda de triple-juntura de estructura monolítica [8]. Se aprecian tres curvas diferentes, cada una correspondiente a una subcelda y cada una diferente de cero en la zona donde esa celda tiene respuesta.

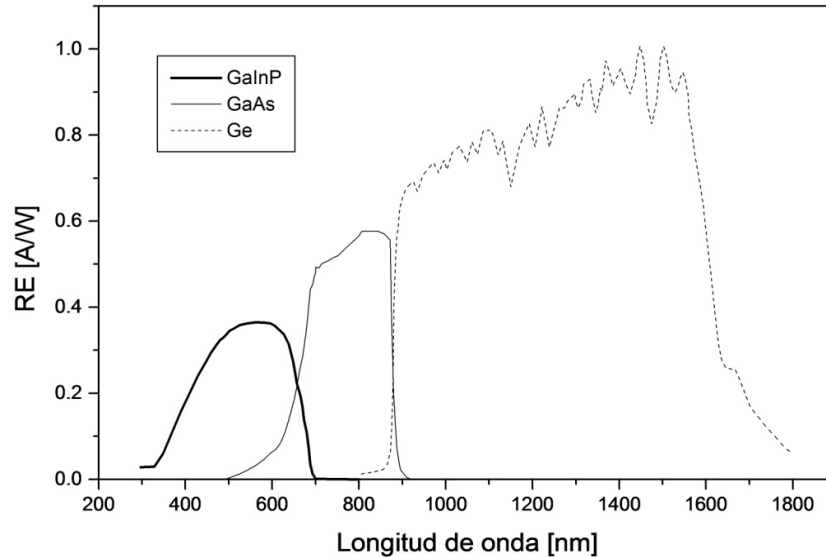


Figura 3.15. Curva característica de *RE* de una celda triple-juntura InGaP/GaAs/Ge, extraída de [8].

3.6.2 Método normalizado de medición de *RE* en celdas multijuntura

Al igual que para el caso de celdas mono-juntura, existen normas para la medición de respuesta espectral de celdas multijuntura. Estas normas proporcionan lineamientos particulares para la medición de este tipo de celdas y básicamente son extensiones y modificaciones de las normas para mono-juntura. Cabe aclarar que por el momento la norma IRAM de medición de celdas multijuntura no ha sido confeccionada, aunque sí existe la correspondiente norma ASTM [9].

Las características básicas que deberá cumplir el equipo de medición de respuesta espectral según esta norma, además de las mencionadas para el caso mono-juntura son:

- Fuente luminosa de polarización de espectro variable, de manera de poder seleccionar cada subcelda variando el contenido espectral de la luz de polarización. Esta fuente puede ser un simulador solar ajustable espectralmente o una fuente luminosa de intensidad adecuada y una serie de filtros ópticos.

- Celdas de referencia calibradas para medir la irradiancia en las regiones de longitud de onda donde cada una de las subceldas tiene respuesta. Idealmente cada celda de referencia debería tener respuesta espectral similar a las que se quieren medir.
- Fuente de tensión variable para proporcionar la polarización eléctrica de la celda y poder colocar la subceldas a medir en condiciones cercanas a corto circuito. El circuito externo para polarizar y la fuente de polarización eléctrica deben ser compatibles con la medición mediante el detector sincrónico.

Además, la norma provee el procedimiento para medición de este tipo de dispositivos, que consta de los siguientes pasos:

- Seleccionar la subcelda a medir mediante la utilización de la luz de polarización y los filtros. Idealmente la subcelda bajo estudio debe ser iluminada con una irradiancia igual a la irradiancia para la cual fue diseñada y las subceldas restantes con mayor irradiancia.
- Medir la tensión de circuito abierto (V_{ca}) de la celda en estudio.
- Calcular el valor de polarización eléctrica como la suma de las contribuciones de tensión esperadas de las subceldas que no se están midiendo.
- Polarizar eléctricamente la celda mediante el circuito externo con el valor calculado en el punto anterior.
- Iluminar la celda con luz monocromática de longitud de onda contenida en la región donde se espera que la subcelda tenga respuesta.
- Maximizar la señal medida en el *lock-in* variando la intensidad de la luz de polarización.
- Iluminar la celda con luz monocromática de longitud de onda contenida en la región donde se espera que la subcelda no tenga respuesta.
- Minimizar la señal medida en el *lock-in* variando la intensidad de la luz de polarización.
- Repetir los dos pasos anteriores para cada una de las regiones de las subceldas no medidas restantes.
- Maximizar y minimizar la señal medida en el *lock-in* variando la tensión de polarización eléctrica para las regiones de respuesta y de no respuesta,

respectivamente, siguiendo el mismo proceso que para el caso de la variación en la intensidad de polarización lumínica.

- Medir la subcelda con el mismo procedimiento que en el caso de una mono-juntura
- Repetir todo el proceso para las subceldas restantes.

Cabe aclarar que la *RE* puede ser medida de diferentes formas y con diferentes equipos, y que estas formas y equipos no necesariamente cumplen las normas y procedimientos aquí enunciados. Por ejemplo, y como se verá en las próximas secciones, dado que en nuestro desarrollo la subcelda a medir se polariza lumínicamente en condiciones de irradiancia similares a las reales de operación, no es necesario efectuar los pasos que involucran la maximización y/o minimización de la señal variando dicho nivel de irradiancia. Sin embargo es aconsejable tener conocimiento de las mencionadas normas y tenerlas en cuenta a la hora de diseñar un equipo y de realizar las mediciones con este. De esta forma será más fácil la comparación de mediciones realizadas en diferentes laboratorios.

3.6.3 Modificaciones realizadas en el equipo para medición de *RE* de celdas TJ

Con la finalidad de extender las capacidades del equipo de medición de respuesta espectral de celdas monojuntura de silicio para poder medir celdas solares de triple junta (para lo cual es necesario cubrir el rango de longitudes de onda 300nm-1900nm) se llevaron a cabo una serie de modificaciones en el sistema originalmente desarrollado. Como se verá en las siguientes secciones, estas modificaciones incluyeron el rediseño de las fuentes de iluminación, tanto monocromática como de polarización, la motorización de las ruedas de filtros, y la automatización del sistema. Cabe aclarar que el objetivo de este desarrollo fue el de poder medir celdas comerciales de $27,5\text{cm}^2$ de área, que comparadas con las celdas experimentales de laboratorio tienen un área relativamente grande, por lo que la recreación de condiciones cercanas a las estándares de trabajo son más difíciles de lograr. A continuación se describen las modificaciones efectuadas.

3.6.3.1 Inserción de una segunda rueda filtros

Para extender el rango de generación de luz monocromática del equipo desde 1100nm hasta 1900nm, se colocó una segunda rueda conteniendo 18 filtros de banda angosta cubriendo el rango mencionado con saltos de 50nm. Esta segunda rueda fue montada sobre la columna de modo que quede alineada con la primera rueda, como se muestra en la figura 3.16. Los filtros en esta segunda rueda son circulares y tienen una pulgada de diámetro.

La longitud de onda central de los filtros a colocar en la segunda rueda va desde 1150nm hasta 1900nm con saltos discretos de 50nm. De esta manera, el equipo es capaz de medir la respuesta espectral para 33 longitudes de onda entre 300 nm y 1900 nm espaciadas en 50 nm.

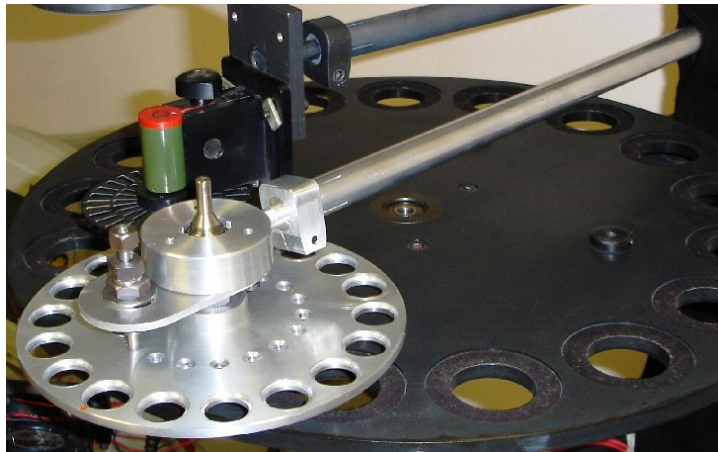


Figura 3.16. Detalle de la segunda rueda de filtros montada en el equipo y previo a ser anodizada color negro.

3.6.3.2 Polarización lumínica

Como se dijo anteriormente, la forma de seleccionar la subcelda a medir en una celda multijuntura es variando el espectro de iluminación de modo que la subcelda bajo medición limite la corriente del conjunto. Para ello es necesario contar con varios escenarios de iluminación, más puntualmente tres espectros diferentes y apropiados en el caso de medir una celda de triple juntura. Para ello se agregó una segunda fuente luminosa de polarización, consistente en una segunda lámpara halógena de tungsteno

con reflector dicróico de 250W alimentada por una tercera fuente de tensión DC. La primera lámpara de polarización de 150W fue reemplazada por una de 250W, de modo de tener dos fuentes luminosas en principio equivalentes. Cada uno de los soportes de las lámparas lleva asociado un portafiltro para interponer filtros ópticos pasabanda que permitan introducir modificaciones en el espectro de iluminación para la selección de la subcelda a medir. En las próximas secciones se verá la combinación de filtros y nivel de iluminación necesarios para la adecuada selección de cada subcelda.

3.6.3.3 Automatización del sistema

La medición completa de *RE* de una celda solar TJ comprende la medición de las respuestas espectrales de las tres subceldas que la componen. A su vez la medición de cada subcelda comprende dos mediciones, la correspondiente a la subcelda bajo ensayo y su respectiva subcelda de referencia. Esto significa que en total se efectúan 6 mediciones con 33 filtros cada una, por lo que la medición de *RE* de una celda TJ lleva algunas horas de trabajo.

Para facilitar la tarea y a fin de poder realizar las mediciones en forma semi-automática se decidió motorizar ambas ruedas de filtros. Para ello se utilizaron dos motores paso a paso acoplados a las ruedas por medio de reductores mecánicos. El control de los motores desde el punto de vista lógico lo ejerce, como se verá más adelante, el mismo programa que realiza la medición de *RE* a través del puerto paralelo de una PC. Para poder excitar los motores con la corriente adecuada fue necesario fabricar un *driver* o amplificador de corriente que fuera capaz de adecuar la señal del puerto paralelo al nivel de corriente manejado por los motores.

En las figuras 3.17 y 3.18 se aprecian el detalle de los motores y el acoplamiento de los mismos a las ruedas de filtros.

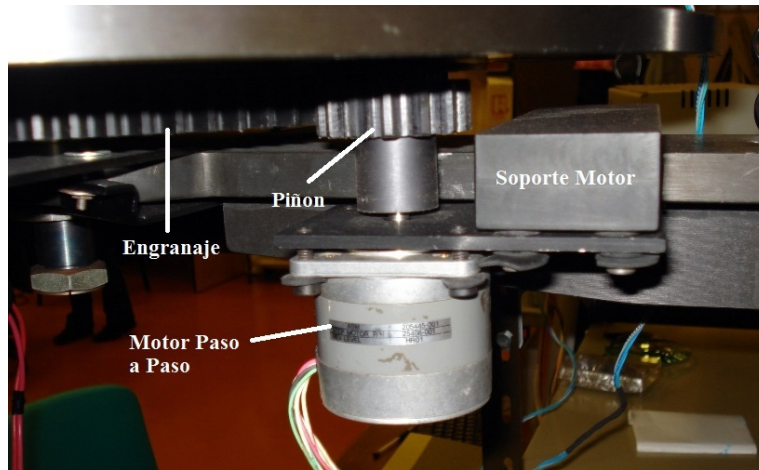


Figura 3.17. Sistema de posicionamiento de la rueda porta filtros de 300 a 1100 nm.

La rotación de la segunda rueda se logra mediante el acople directo al eje de ésta de un motorreductor lineal, el cual es accionado mediante el motor paso a paso. Este mecanismo puede verse en la figura 3.18, donde se aprecia la diferencia de tamaño del motor respecto al utilizado en la primera rueda; esto es así ya que esta tiene un momento de inercia angular bastante menor que la primera, y por ende es necesario un menor torque para producir su rotación. Al igual que en el caso de la relación de diámetro de los engranajes en la primera rueda, la necesidad del motorreductor entre el motor y la rueda es para lograr un adecuado nivel de precisión en el posicionamiento.

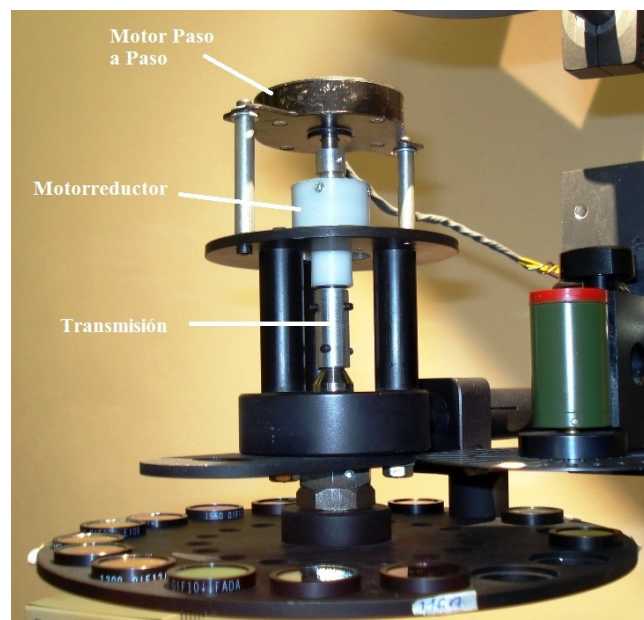


Figura 3.18. Sistema de posicionamiento de la rueda porta filtros de 1150 a 1900 nm.

En la figura 3.19 se muestran el circuito eléctrico de excitación de los motores paso a paso y su implementación práctica.

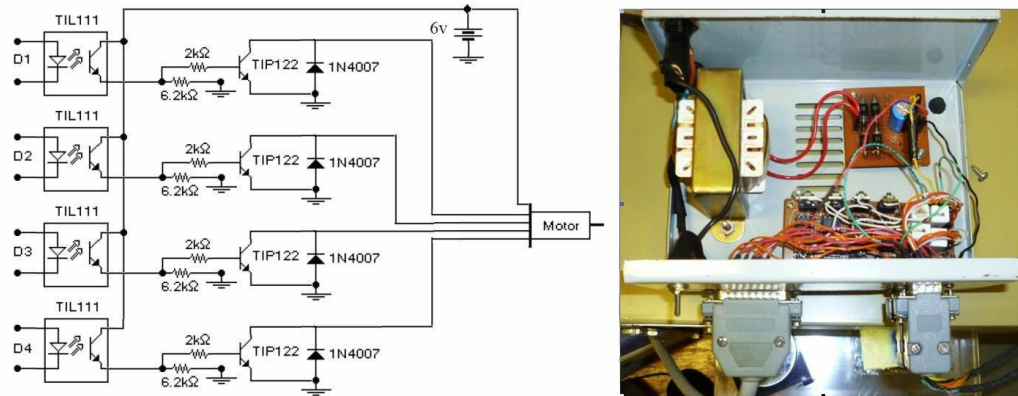


Figura 3.19. *izquierda: Circuito de la interfaz para un motor paso a paso. Las entradas D1 a D4 van conectadas directamente al puerto paralelo. El diodo 1N4007 protege al circuito de posibles picos de tensión que se generan cuando se hace girar el eje del motor en forma manual. Derecha: Implementación del driver para motores paso a paso.*

Además del *hardware* necesario para la automatización del equipo de medición fue necesario desarrollar un *software* con las capacidades apropiadas para llevar a cabo dicha medición. Esto requirió resolver la comunicación con el amplificador *lock-in* mediante el puerto serie (RS-232) de la PC, adquirir los datos en el momento adecuado, es decir una vez que la medición del instrumento se estabiliza, seleccionar la escala y constante de tiempo adecuada, realizar promedios entre mediciones a fin de reducir el error estadístico, almacenar los valores de tensión de referencia y celda en el disco rígido, controlar la posición de ambas ruedas de filtros a fin de medir la longitud de onda deseada y calcular la *RE* de la celda para posteriormente graficarla en pantalla y finalmente almacenarla en el disco rígido. Este trabajo fue realizado en el DES en el marco de la Tesis de Licenciatura de Javier García [10]. En la figura 3.20 se muestra la interfaz en pantalla del *software* desarrollado, mientras que en las figuras 3.21 y 3.22 se aprecia el sistema completo de medición posterior a las modificaciones descriptas anteriormente [11].

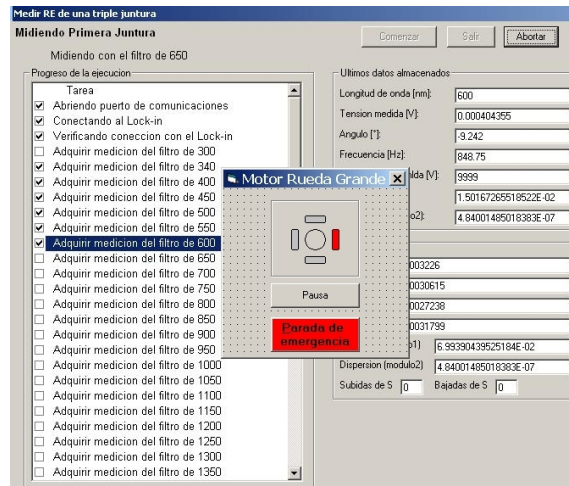


Figura 3.20. Vista del programa que permite la medición automática de respuesta espectral, en este ejemplo ejecutando un cambio de filtro mediante los motores paso a paso incorporados.

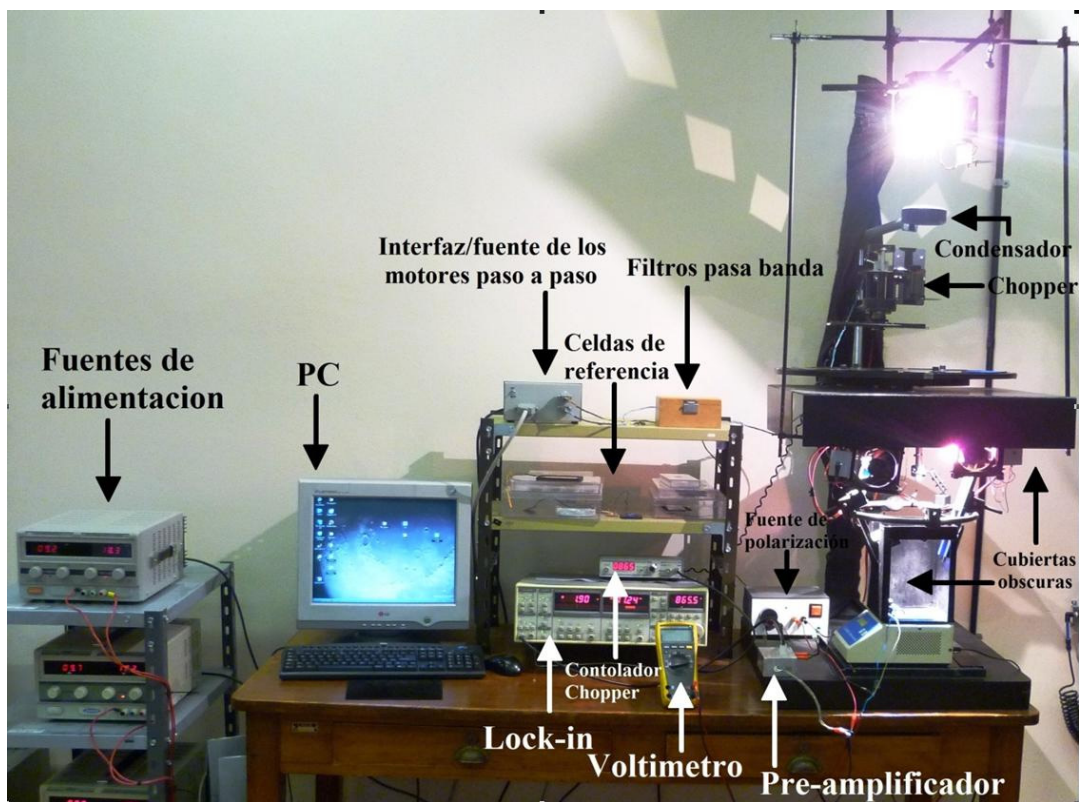


Figura 3.21. Vista general del equipo de medición de RE

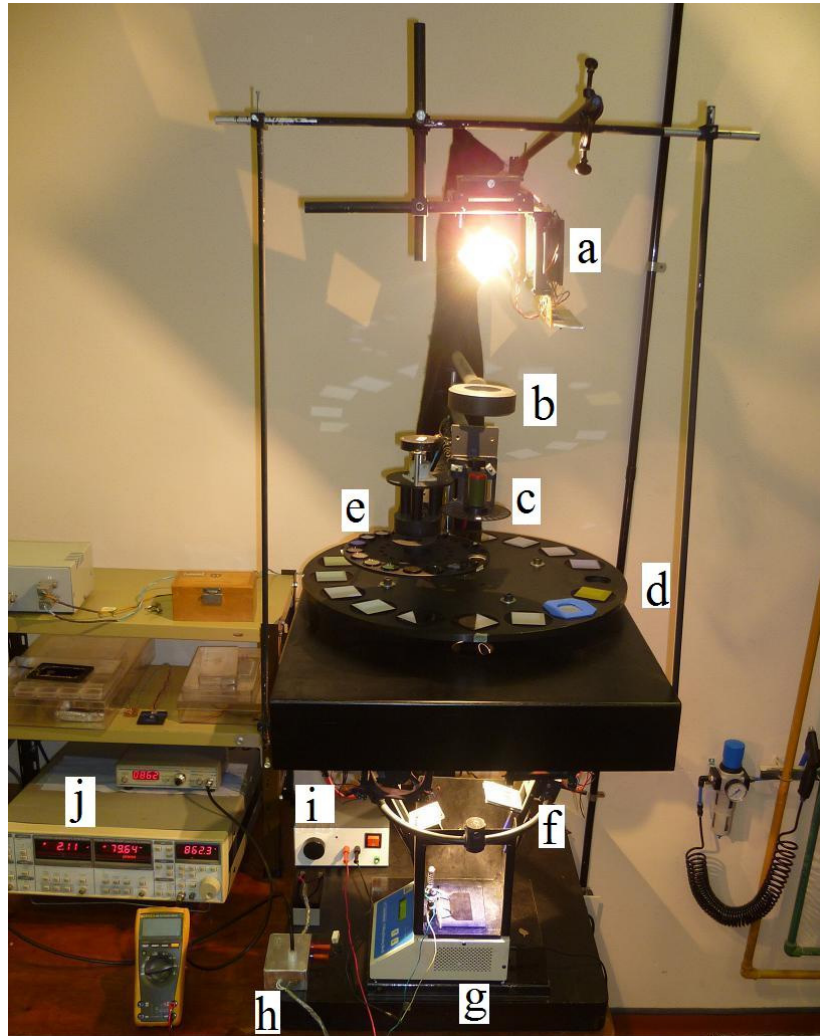


Figura 3.22. Arreglo experimental final, detalle de la columna de medición. a) lámpara halógena de 250W b) lente convergente c) chopper d) rueda de filtros 300nm-1100nm e) rueda de filtros 1150nm-1900nm f) portafiltros de luces de polarización g) base termostatzada h) preamplificador i) fuente DC regulada de polarización j) amplificador lock-in.

3.6.4 Condiciones experimentales para medición de la *RE* sobre celdas de triple juntura

3.6.4.1 Estudio de la polarización lumínica

Como fuera mencionado anteriormente en el presente trabajo, la forma de seleccionar una determinada subcelda en una celda multijuntura de estructura

monolítica es modificando las componentes espectrales de la luz de polarización de modo que la subcelda que se desea medir sea la que genere la menor fotocorriente del conjunto. Es por ello que para hallar espectros apropiados para la selección de cada subcelda se realizaron mediciones de los espectros de las lámparas dicróicas utilizadas. Luego, utilizando la transmitancia de distintos filtros pasa banda disponibles en el DES y los espectros de las lámparas mencionadas, se calcularon los espectros adecuados mediante simulación numérica.

3.6.4.1.1 Estudio de las lámparas utilizadas para la polarización lumínica

Para saber que filtro o juego de filtros es necesario usar para seleccionar la subcelda a medir, se requiere conocer el espectro de la lámpara de polarización de antemano. Para ello se recurrió a un espectrorradiómetro, marca *Analytical Spectral Device, Inc*, modelo *FieldSpec Pro FR*, cuyo rango de medición es de 350 nm a 2500 nm. Se realizaron mediciones del espectro de una de las lámparas para diferentes distancias respecto del plano de medición (figura 3.23 I) y para diferentes tensiones de alimentación (figura 3.23 II). Se comprobó que estas variaciones no afectan de forma apreciable su espectro, aunque sí la intensidad de luz que llega al plano de medición.

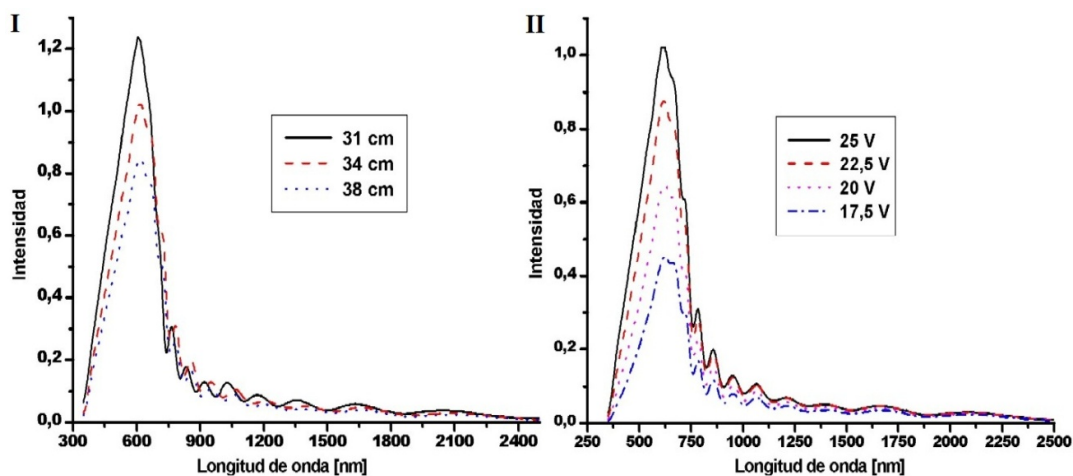


Figura 3.23. I. Espectro de la lámpara de polarización para diferentes distancias al plano de medición. II. Espectro de la lámpara de polarización para diferentes tensiones de alimentación. Los gráficos están en unidades de intensidad arbitrarias.

Asimismo, se midió el espectro para cada lámpara de polarización por separado, verificándose que el comportamiento espectral de ambas lámparas es similar (figura 3.24).

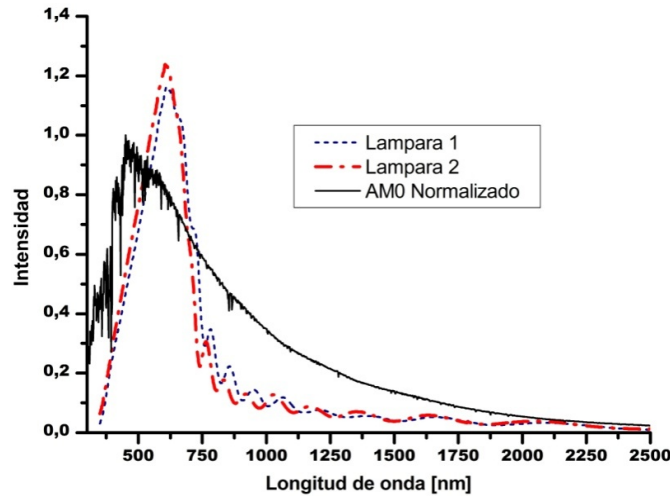


Figura 3.24. Comparación de los espectros de las dos lámparas a utilizar y el espectro AM0. La intensidad está normalizada en relación con el máximo del espectro AM0.

Si se observa la distribución espectral de la lámpara dicróica de 250 W (figura 3.24) y se la compara con la del espectro solar AM0 se puede ver que la primera tiene un pico mucho más marcado, que cae abruptamente hacia el infrarrojo, centrado en 600 nm aproximadamente mientras que el pico del espectro AM0 se centra en 450 nm aproximadamente y disminuye suavemente hacia longitudes de onda mayores. Esta deficiencia en el infrarrojo de las lámparas dicróicas supone un problema de relativa importancia, ya que esta es la zona donde responde la subcelda de *Ge* que compone las celdas solares de triple juntura. También se observa una deficiencia de las lámparas dicróicas respecto del espectro AM0 en el ultravioleta, que sin embargo es menos preocupante que el caso del infrarrojo ya que la mayoría de las celdas solares tiene respuesta casi nula por debajo de los 350 nm

3.6.4.1.2 Cálculo de los espectros para la selección de las subceldas

Dado un espectro de iluminación $E(\lambda)$, la corriente fotogenerada por la subcelda i será igual a la integral de la RE de dicha subcelda $RE^i(\lambda)$ multiplicada por la mencionada distribución espectral, de acuerdo a la ecuación 3.5:

$$J_{cc}^i = \int RE^i(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (3.5)$$

donde la integral se extiende entre los límites en los cuales las cantidades $RE^i(\lambda)$ y $E(\lambda)$ sean no nulas.

El espectro de iluminación de la luz de polarización puede ser modificado mediante la interposición de filtros ópticos, de modo tal que si $T(\lambda)$ es la transmitancia espectral de dicho filtro, el espectro modificado será $Em(\lambda) = E(\lambda)T(\lambda)$ como puede verse en la figura 3.25. Se dispone de un juego de filtros pasabanda (pasaaltos y pasabajos de 2x2 pulgadas) con frecuencias de corte entre 400 nm y 750 nm. La transmitancia de los filtros fue medida utilizando un espectrofotómetro *Shimadzu UV-Vis-IR*. Además se dispone de filtros neutros que reducen la intensidad por igual en todas las longitudes de onda y un filtro de vidrio *KG4* de *Schott*, con una longitud de onda de corte de aproximadamente 700nm, aunque con una pendiente más suave que en el caso de los filtros pasa banda mencionados.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es posible calcular la corriente fotogenerada por cada subcelda conociendo el espectro de la luz de polarización, su RE y la transmitancia de los filtros a interponer. Como $RE^i(\lambda)$ es la propiedad que se quiere medir y no se la conoce a priori, se puede usar en su reemplazo una RE típica de una celda de similares características, y de esta manera realizar un cálculo aproximado de la corriente de cada subcelda y evaluar si el espectro utilizado es apropiado o no a los efectos de medir la subcelda deseada [12].

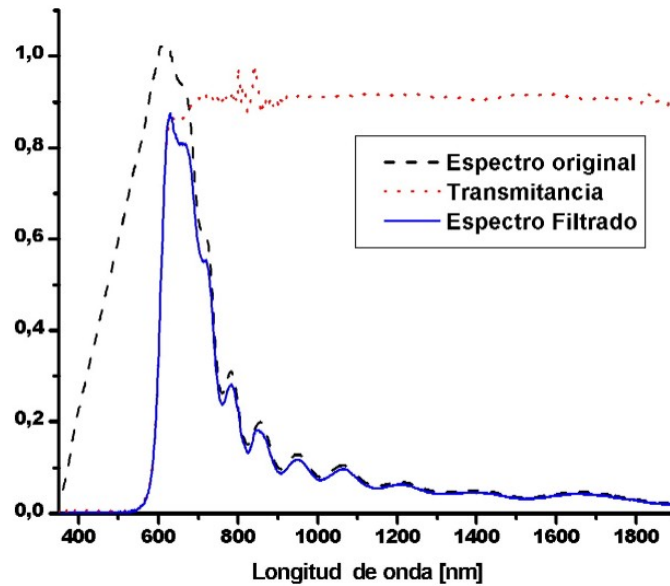


Figura 3.25. Espectro de la lámpara de 250 W modificado según la transmitancia del filtro pasa altos de longitud de onda de corte de 600 nm.

Para facilitar el cálculo de espectros apropiados para la selección de cada subcelda, se generó una planilla en *Excel*® que tiene cargados los espectros de ambas lámparas, la transmitancia de todos los filtros disponibles y la *RE* típica del tipo de celda que se desea medir. Así, mediante la utilización de *macros* es posible modificar la intensidad y los espectros de cada lámpara con diferentes filtros neutros y pasa banda, y luego automáticamente el *software* calcula la corriente fotogenerada por cada subcelda mediante el cálculo numérico de la ecuación (3.5) e informa el resultado.

3.6.4.1.3 Espectros de polarización para una celda de triple-juntura *InGaP/GaAs/Ge*

Utilizando la planilla descrita en la sección anterior nos es posible estimar los espectros que mejor se ajustan a las condiciones necesarias para medir celdas de triple-juntura de estructura monolítica de *InGaP/GaAs/Ge*, que son de interés primordial para las actividades de investigación que realiza el grupo.

Por ser estas celdas de uso espacial, lo correcto es poner a funcionar dichas celdas bajo el espectro solar espacial estándar AM0 [13]. Si bien es posible utilizar un simulador solar con este fin, resultaría engorroso por el tamaño y costo de un simulador que se ajuste estrechamente al espectro AM0, además del hecho que solo podríamos medir una única subcelda si nos quedamos únicamente con este espectro. Por este

motivo nuestro criterio respecto a las condiciones de funcionamiento de la subcelda a medir será lograr el espectro lo más parecido posible al AM0 con las dos lámparas de polarización y los filtros disponibles, y modificar este espectro lo menos posible de manera tal de generar condiciones de polarización en las que limiten las dos subceldas restantes.

Para ello utilizamos la *RE* correspondiente a una celda de triple juntura *InGaP/GaAs/Ge* suministrada por el fabricante de las celdas. Estas celdas están diseñadas de modo tal que la corriente está limitada por la subcelda de *InGaP* para el espectro espacial AM0 [13]. Esto se debe a que la subcelda de *GaAs* es más susceptible al daño por radiación [14,15], definiéndose entonces un espesor menor para la celda de *InGaP* de forma que al final de la vida útil determinada por el daño por radiación para una cierta fluencia de irradiación por e^- de 1 MeV ambas subceldas generen la misma fotocorriente.

En resumen, los criterios utilizados para hallar estos espectros fueron:

- Modificar lo menos posible la parte espectral de las lámparas donde tienen deficiencia en comparación con el espectro AM0
- Atenuar, en la medida de lo posible, el pico en 600 nm de la lámpara, ya que el máximo del AM0 es en 450 nm aproximadamente
- Que la superposición de los espectros modificados de las dos lámparas se parezca lo más posible desde el punto de vista funcional al espectro AM0.

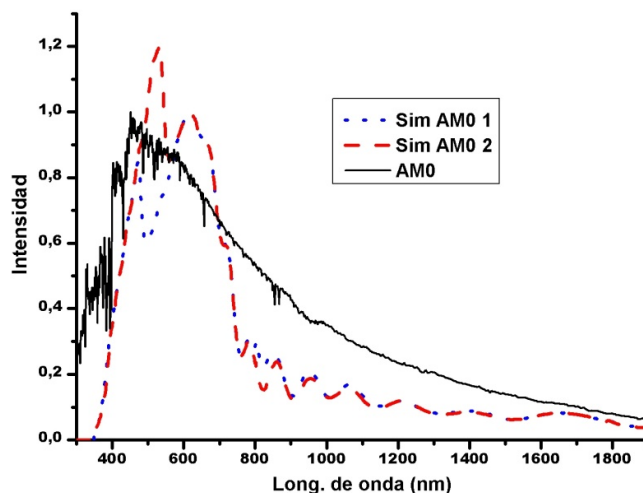


Figura 3.26. Espectros simuladores del estándar AM0 calculados a partir de dos lámparas dicroicas y filtros pasa banda. La intensidad se encuentra en unidades arbitrarias.

Teniendo esto en cuenta se simularon dos espectros, que denominamos Sim AM0 1 y Sim AM0 2. Estos se muestran en la figura 3.26 contrastados con el espectro normalizado AM0. Como puede observarse, aún con la superposición de dos lámparas hay deficiencia en las componentes espectrales para longitudes de ondas más allá de 700 nm y para longitudes de onda menores a 450 nm. La subcelda que limita con estos espectros, según la *RE* utilizada en los cálculos, es la subcelda de *GaAs* (*middle*, cuya respuesta espectral se extiende hasta los 900 nm), lo cual es consistente con el estudio espectral abordado en el próximo capítulo.

Para hallar los espectros que seleccionen las dos subceldas restantes, se partió del espectro Sim AM0 2 (dado que la irradiancia total en este resulta más parecida a la del AM0) disminuyéndose las componentes espectrales de una zona, de modo que la celda que tiene respuesta en dicha zona sea la que limite la corriente. Los resultados de esta simulación pueden verse en la figura 3.27 donde también se muestra el espectro Sim AM0 2 [11].

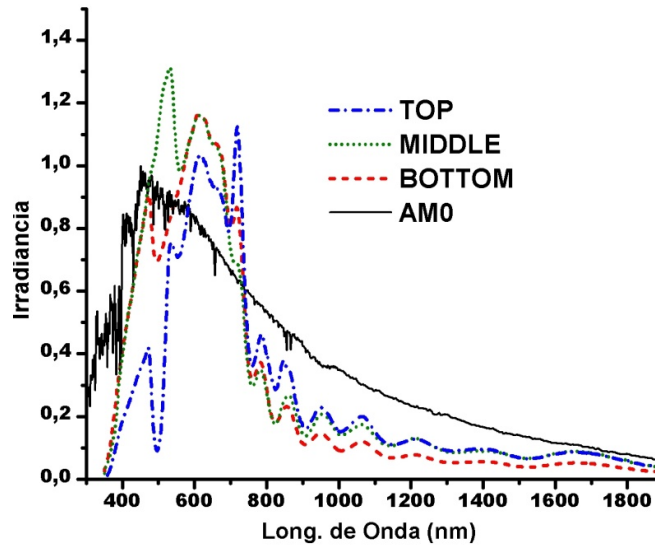


Figura 3.27. Espectros finales para la selección de cada subcelda. Las denominaciones *Top*, *Middle*, y *Bottom* indican cual subcelda limita la corriente en cada caso.

Como se aprecia en la figura 3.27, el espectro identificado como *Middle* es el espectro Sim AM0 2, mientras que para que limite la subcelda de *Ge* o *Bottom* (espectro identificado como *Bottom*) fue necesario bajar las componentes espectrales de longitudes de onda a partir de los 900 nm. En el caso en el que limita la celda de *InGaP* o *Top* (espectro identificado como *Top*) se redujeron fuertemente las componentes espectrales entre 400 y 600 nm.

Estos espectros fueron probados luego en celdas TJ comerciales, en nuestro caso celdas *Advanced Triple Junction* (ATJ) de Emcore Photovoltaics, comprobándose que cumplían la función para la cual fueron diseñados. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de utilizar otros espectros calculados de igual forma ya que cada celda en sí misma es única, y los hallados aquí pueden fallar para otras celdas que tengan una *RE* propia diferente a la utilizada en las simulaciones debido a defectos o diferencias en su fabricación o bien en su diseño. Una forma de generar nuevos espectros de aplicación más amplia puede ser considerando diferencias mayores entre las corrientes de las subceldas para que limite la subcelda deseada [10, 11].

3.6.4.1.4 Estudio de las condiciones de funcionamiento de las celdas bajo los espectros de polarización hallados

Una vez obtenidos estos espectros de polarización (sección 3.6.4.1.3) se verificó, con la ayuda de un solarímetro *marca Kipp&Zonen, modelo CM5*, que el valor de la integral de la radiación espectral sea comparable a la intensidad AM0. En la tabla 3.2 puede verse el valor de la intensidad de cada uno de los espectros que seleccionan subceldas y su comparación con la constante solar. Se obtuvieron valores razonables, ya que las diferencias con respecto al AM0 para los espectros *Top* y *Bottom* rondan el 10 % y para el espectro *Middle* es aproximadamente del 23 %, en todos los casos por encima de la irradiancia estándar [11].

Espectro	Irradiancia(W/m ²)	Δ irr (%)
<i>Top</i>	1514	10,9
<i>Middle</i>	1683	23,4
<i>Bottom</i>	1495	9,5

Tabla 3.2. Intensidad de los espectros de polarización y su comparación con la constante solar (1367 W/m²).

Finalmente para terminar con el análisis de los espectros que seleccionan las distintas subceldas se compararon los valores de V_{ca} y J_{cc} (densidad de corriente de cortocircuito) de una celda real, iluminada con cada una de ellos, con los valores estándar proporcionados por el fabricante (Tabla 3.3).

	V_{ca} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	ΔV_{ca} (%)	ΔJ_{cc} (%)
Fabricante	2,60	17,2	-	-
<i>Top</i>	2,58	17,5	-0,8	1,7
<i>Middle</i>	2,56	22,5	-1,5	30,8
<i>Bottom</i>	2,56	19,4	-1,5	12,7

Tabla 3.3. Comparación de condiciones de funcionamiento de una celda bajo los 3 espectros de polarización y su comparación con los valores nominales proporcionados por el fabricante.

Se observa en la Tabla 3.3 que las condiciones de funcionamiento de la celda bajo los espectros *Top* y *Bottom* son muy cercanas a las nominales, con una diferencia máxima en corriente de cortocircuito de aproximadamente 13%, mientras que en el caso

del espectro *Middle* la diferencia es mayor llegando a aproximadamente 31 %, que es consistente con la mayor irradiancia que presenta este espectro. En el caso de la tensión de circuito abierto vemos que en los tres casos son muy similares, difiriendo no más de un -1,5 %. En cuanto a la corriente de corto circuito, las discrepancias son mayores, y más dispares una de la otra (diferencias necesarias y creadas para que la corriente sea limitada por la subcelda elegida en cada caso). Los valores obtenidos son muy buenos considerando que solo se utilizaron dos lámparas dicróicas para crear las condiciones de polarización luminosa necesarias para todos los casos. No obstante no se descarta la posibilidad de hallar y usar otros espectros ya que, como fuera mencionado, estos pueden fallar si las características de la *RE* de la celda bajo estudio varían significativamente respecto de la *RE* usada para los cálculos.

3.6.4.2 Polarización eléctrica

Hallados los espectros que permiten seleccionar cada una de las subceldas, se procedió a buscar las condiciones de polarización eléctrica más adecuadas para la medición de la *RE* de la subcelda de *Ge*. Como se mencionó anteriormente (sección 3.6.1) en este tipo de celdas la condición de cortocircuito de la subcelda bajo estudio no significa tensión cero en sus terminales.

Para ello se siguió el procedimiento descrito en el artículo de Meusel et al. [7]. En este método, seleccionada lumínicamente la subcelda de *Ge* se minimiza la señal leída en el *lock-in* para longitudes de onda donde no debería tener respuesta dicha celda, lo cual se logra variando la tensión de polarización de la celda.

En la figura 3.28 se muestran los resultados de variar la tensión de polarización sobre la señal medida para 500 nm y 800 nm, donde la subcelda de *Ge* no debería tener respuesta. Si bien fue posible hallar un mínimo para 500 nm, éste no se encontró para 800 nm; en esta última longitud de onda se observa que la tensión disminuye para tensiones de polarización mayores pero esta variación se hace cada vez más pequeña sin llegar a un mínimo, aunque como se describe en [7] podría encontrarse para valores mayores que 1,5V. Por consiguiente, como relación de compromiso se consideró como tensión de polarización óptima un punto intermedio entre el valor correspondiente al mínimo de 500 nm y 1,5 volt correspondiente al punto donde es mínima la indicación para 800 nm; este valor se eligió en 1,3 volt.

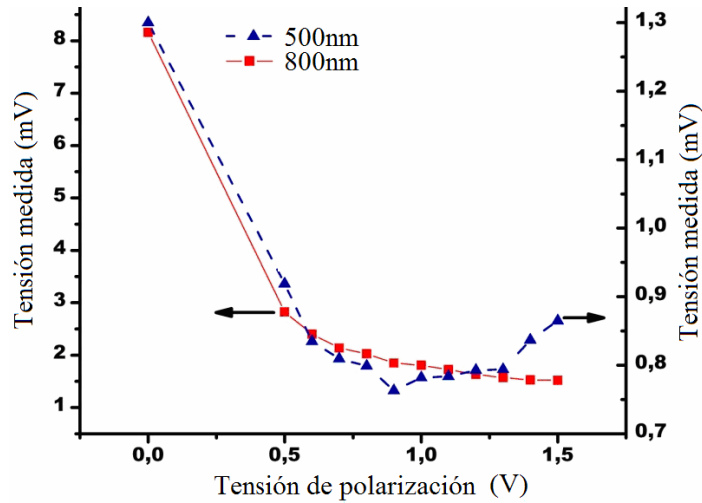


Figura 3.28. Variación de la tensión medida al variar la tensión de polarización.

En la figura 3.29 se observa la *RE* de la celda de *Ge* para tensión de polarización igual a cero y para 1,3 Volt. Las diferencias mayores pueden verse en las longitudes de onda que van desde 900 nm a 1100 nm donde hay un cambio de más del 15 % al variar de 0 a 1,3 volt la tensión de polarización. También se observa una disminución de la *RE* de la celda, consistente con lo expuesto anteriormente, en regiones donde dicha celda no debería tener respuesta. Si bien esta no desaparece por completo, posiblemente debido a un *artifact* de acoplamiento lumínico entre la subcelda de *GaAs* y la de *Ge*, como se detalla en [16], la disminución entre 700 nm y 850 nm es de cerca de un 300 %. La respuesta espectral de la subcelda de *Ge* mostrada en la figura 3.29 está truncada en 1100nm, dado que al momento de realizar dichas mediciones la única celda calibrada en *RE* de la que se disponía en el DES era de silicio (con respuesta en el intervalo 350nm-1100nm).

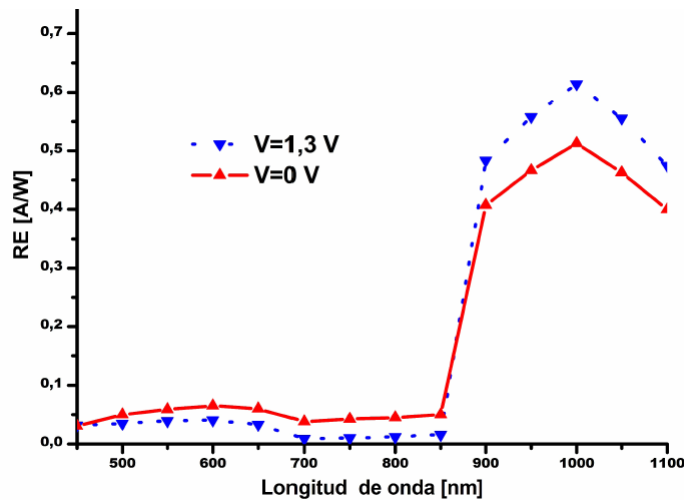


Figura 3.29. RE de la celda de *Ge* para diferentes tensiones de polarización.

A partir de estos resultados se concluyó que una manera de encontrar la tensión de polarización más adecuada es no solo buscar la tensión que minimice la RE en las zonas donde no debería haberla, sino también aquélla que la maximice en la zona donde la subcelda responde, lo cual es consistente con la metodología utilizada en el trabajo de S.H. Lim et al. [16].

Este método se verificó con una celda diferente iluminada bajo el mismo espectro. Variando la tensión de polarización se buscó el máximo de respuesta en 1100 nm (figura 3.30), y a la vez se verificó el comportamiento en 500 nm y 800 nm (figura 3.31)

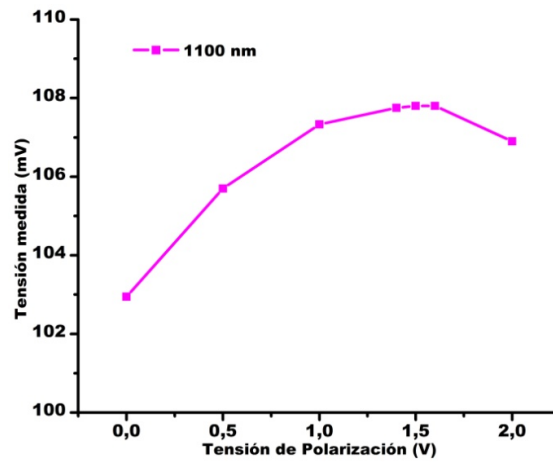


Figura 3.30. Variación de la tensión medida por el lock-in para 1100 nm al variar la tensión de polarización.

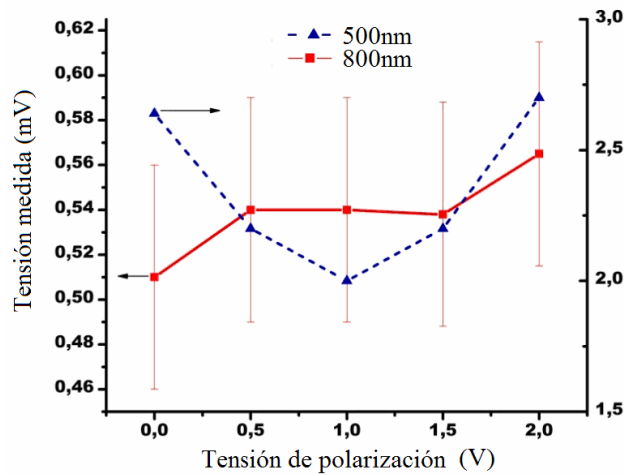


Figura 3.31. Variación de la tensión medida por el lock-in para 500 nm y 800 nm al variar la tensión de polarización.

Puede observarse en la figura 3.30 un máximo de repuesta alrededor de 1,5 volt de tensión de polarización, este valor es diferente a la suma de las tensiones de circuito abierto de la subcelda *top* y *middle* (2,3V), que como se mencionara es una aproximación gruesa para dicha tensión de polarización. El origen de esta diferencia puede estar asociado a efectos de gran área al trabajar con celdas comerciales de 27,5cm², ya que con celdas multijuntura más pequeñas se han obtenido valores de tensión mayores. Por otra parte, para 500 nm (figura 3.31) hay un mínimo en 1,0 V y en el caso de 800 nm no se puede hallar un mínimo dado que el *lock-in* no converge debido a que la señal es intrínsecamente muy pequeña e implica errores relativos muy grandes en la medición. Dada la mejor relación señal/ruido correspondiente a 1100nm, se considera el máximo encontrado en este caso más confiable que el mínimo encontrado para 800 nm, eligiéndose 1,5 V como tensión de polarización para esta celda.

En la figura 3.32 se muestra la *RE* medida para esta celda con tensiones de polarización de 0 volt y 1,5 volt. No hay grandes diferencias en esta celda al variar la tensión de polarización: solo se observa una diferencia de alrededor del 5 % en la zona entre 900 nm y 1100 nm, diferencia mucho menor que la encontrada en la celda anterior. Esto podría deberse a las mejores características eléctricas de la celda utilizada en esta medición.

Es necesario recordar (sección 3.6.1) que las subceldas *InGaP* y *GaAs* no presentan problemas de este tipo por su alta tensión de ruptura y la característica plana de su curva *I-V* en polarización inversa [7]. Por ello la medición de *RE* en estas subceldas pueden ser realizadas con la celda multijuntura en cortocircuito.

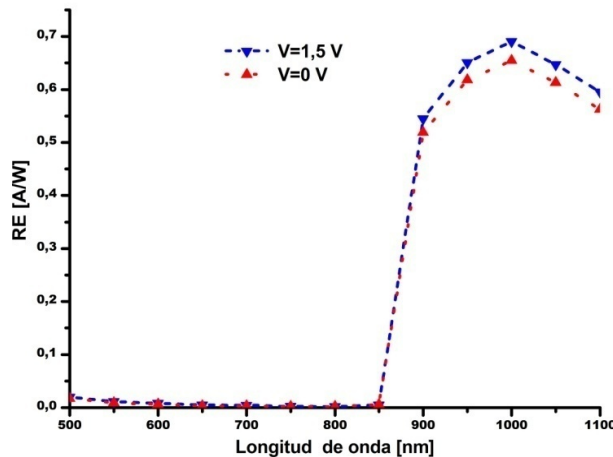


Figura 3.32. *RE de la celda de Ge para diferentes tensiones de polarización*

Aunque en una segunda instancia se contó en el DES con una celda de referencia de triple junta calibrada en *RE* (para cada una de las subceldas) provista por el fabricante, el estudio precedente sobre la polarización eléctrica de la subcelda de *Ge* fue esencial para una correcta calibración del equipo en el intervalo 1100-1900 nm, que se describirá en las secciones siguientes.

3.7 Medición de *RE* en celdas TJ

3.7.1 Transferencia del patrón de *RE*

Aunque el método de medición de *RE* para celdas multijuntura fue recientemente descrito, un análisis más detallado sobre posibles *artifacts* asociados a la medición se puede encontrar en las referencias [17] y [18]. Además, posibles *artifacts* debidos a acoplamiento lumínico dependiendo de la tensión de polarización fueron recientemente descritos en el trabajo de Steiner y Geisz [19], y luego modelados en el artículo de Lim et al. [16].

Definidas las polarizaciones lumínica y eléctrica para cada subcelda de una celda TJ se procedió a la calibración de dos celdas encapsuladas, esta vez utilizando como celda de referencia, es decir como patrón primario, la celda de triple junta calibrada en *RE* por el fabricante. En la figura 3.33 se muestran las celdas utilizadas en este proceso de calibración, las cuales tienen incorporados los interconectores en la cara frontal y un vidrio cobertor. Se realizaron un total de seis mediciones de manera de evaluar la repetibilidad de la medición, así como también para evaluar la confiabilidad del equipo y estimar el error asociado a los valores de calibración de los nuevos patrones secundarios.

La *RE* de los patrones secundarios se calculó promediando punto a punto todas las mediciones de cada subcelda; el resultado final puede observarse en la figura 3.34, donde se muestra además la *RE* del patrón suministrada por Emcore.

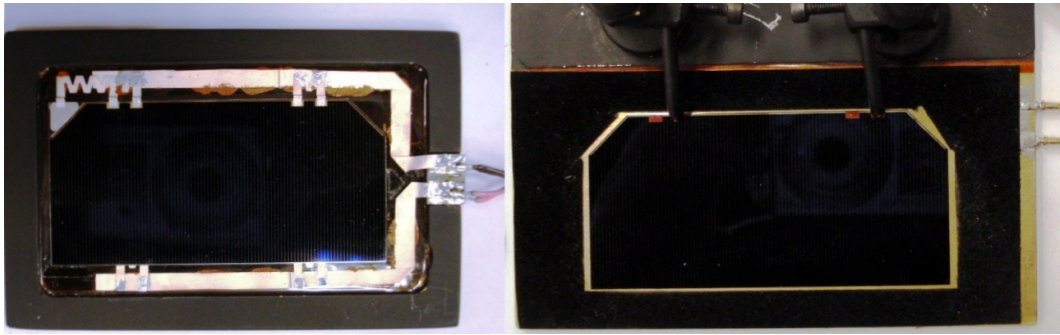


Figura 3.33. Izquierda, patrón secundario, celda ATJ CIC (*Covered and Interconnected Cell*) montada en un soporte de bronce pintado. Derecha, celda Emcore calibrada en la base del equipo de RE.

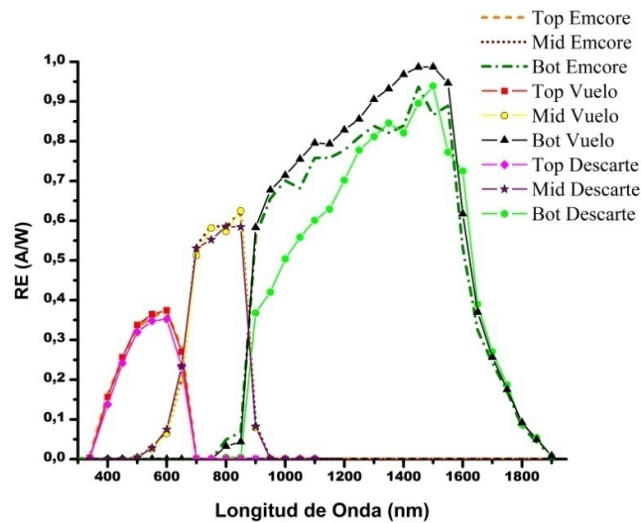


Figura 3.34. RE de los nuevos patrones y patrón original suministrado por Emcore.

Las diferencias que se observan en la RE de las diferentes celdas son esperables. En el caso de la celda denominada *Ref ATJ Descarte*, la misma es considerada por el fabricante una celda que no cumple con las características eléctricas adecuadas para integrarse en un panel solar, hecho que se evidencia en la pobre RE de la subcelda de Ge para bajas longitudes de onda, revelando posibles defectos en la superficie frontal de esta subcelda. Por otra parte, en el caso de la denominada *Ref ATJ vuelo*, el hecho de que la respuesta de la celda de Ge sea un poco más elevada puede ser explicado debido a que es una celda CIC y que en las celdas ATJ Emcore bajo estudio la estructura antirreflectante optimizada incluye al vidrio de protección, que a su vez posee una capa antirreflectante.

3.7.2 Medición de celdas de doble y triple juntura comerciales y su *EQE*.

En las figuras 3.35 y 3.36 se muestra la medición de la respuesta espectral en celdas doble-juntura *InGaP/GaAs* marca *Spectrolab* y triple-juntura *ATJ Emcore*, respectivamente. Además se muestra la Eficiencia Quántica Externa calculada a partir de la *RE* medida y la aplicación de la ecuación (3.2).

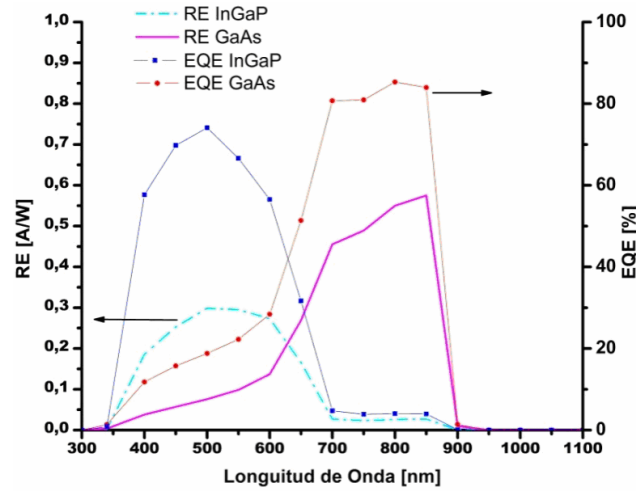


Figura 3.35. Respuesta Espectral y Eficiencia Quántica Externa calculada a partir de esta de una celda doble-juntura *Spectrolab*.

Como fue mencionado al comienzo del capítulo, analizar la Eficiencia Quántica Externa permite evaluar la relación de conversión portador/fotón en donde el caso ideal corresponde a una *EQE* de 100 % para todas las longitudes de onda. Así, mientras más se acerque el valor de cada subcelda al ideal, mejor será su rendimiento. En la figura 3.35 se observa que la subcelda de *GaAs* tiene respuesta en la región de la celda de *InGaP*, lo que podría deberse a que la subcelda de *InGaP* no tiene el espesor suficiente para absorber toda la radiación incidente (de hecho se fabrica intencionalmente delgada para ajustar la corriente con la generada por la subcelda de *GaAs* en condiciones EOL), y entonces parte de la radiación a longitudes de onda donde nominalmente absorbe está llegando al *GaAs*, y por lo tanto esta última celda genera para estas longitudes de onda. Este hecho se evidencia en la forma funcional de la *RE*, ya que a mayor longitud de onda es menor la absorción del *InGaP* (como es de esperar) y por lo tanto mayor la *RE* del *GaAs*. Un comportamiento similar se observa en las celdas *ATJ* de *Emcore* (figura 3.36).

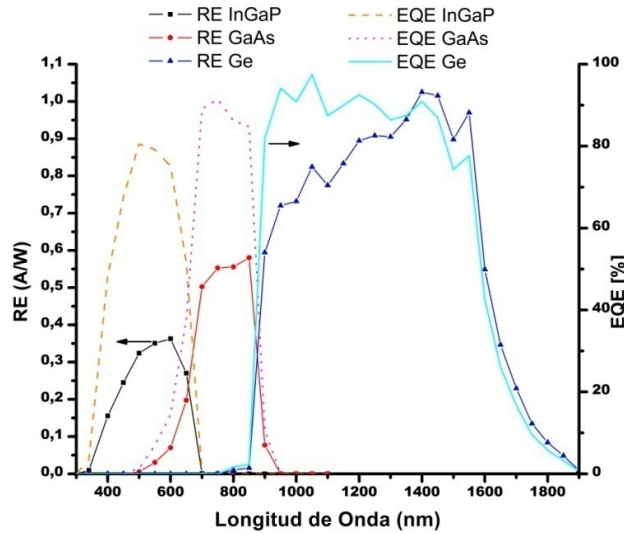


Figura 3.36. Respuesta Espectral y Eficiencia Cuántica Externa de una celda comercial triple junta InGaP/GaAs/Ge.

3.7.3 Errores en la medición de *RE*

Las posibles fuentes de error en la medición de *RE* en celdas multijuntura se detallan en el trabajo de K. Emery et al. [17]. Algunas de ellas, como las asociadas al envejecimiento de la resistencia de sensado y de las lámparas son evitadas al utilizar el método de la celda de referencia en cada medición. A su vez, la deriva térmica de la resistencia es minimizada debido a que la medición es realizada con celdas que generan la misma corriente. La automatización del equipo mediante el *software* provee el uso de la escala óptima para la medición con el *lock-in*, así como también la constante de tiempo más adecuada.

Como forma de estimar el error asociado a los patrones secundarios calibrados para la medición de *RE* se utilizó el triple de la desviación estándar (intervalo de confianza 99,7 %), calculada a partir de las seis mediciones realizadas para cada subcelda. Cabe señalar que el cálculo por propagación de error utilizando la expresión (3.5) no fue posible realizarlo debido a la falta de este dato en los valores de *RE* del patrón primario suministrados por el fabricante.

Los resultados mostraron que en la zona donde cada subcelda tiene respuesta (400-650 nm para la *top*, 550-850 nm para la *middle* y 800-1800 nm para la *bottom*) los errores varían entre 1% - 3% y posteriormente se incrementan hasta un 8% - 10% en las

cercanías de las longitudes de onda de corte de cada subcelda (figura 3.37). Este incremento del error en las cercanías de las zonas de corte de cada subcelda es consecuencia de la reducción en la relación señal/ruido en los bordes, el cual produce una mayor variabilidad en la lectura del valor final de tensión.

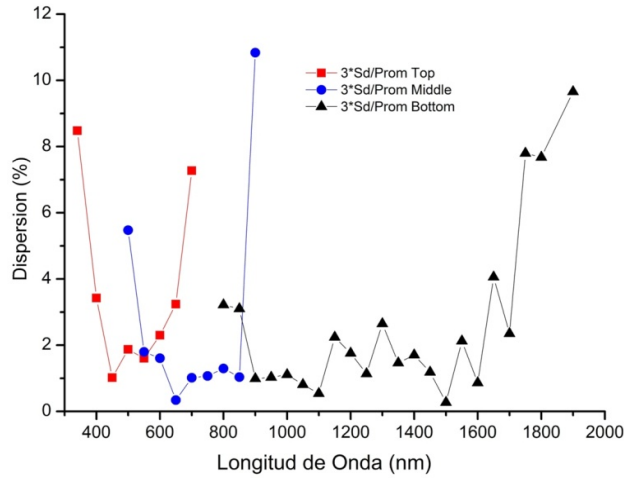


Figura 3.37. Asignación de incertidumbre en la medición de RE en celdas ATJ.

3.8 Evaluación del daño por radiación y degradación de la corriente de cortocircuito de las subceldas.

Parte de los trabajos de investigación del DES se centran en estudios de daño por radiación de celdas solares para aplicaciones espaciales [20-22]. Uno de estos estudios es la evaluación del daño por radiación en celdas de triple-juntura ATJ Emcore, como parte de los ensayos de calificación de los componentes a utilizar en los paneles espaciales. En este marco, se realizó la medición de la RE de una celda ATJ antes y después de ser sometida a la irradiación con protones de 10 MeV en el acelerador de iones pesados TANDAR de la CNEA [21].

Los resultados de las mediciones, para una fluencia total de $3,08 \cdot 10^{10}$ p/cm², pueden verse en la figura 3.38. Dicha fluencia es la equivalente a la que recibirían las celdas al ser utilizadas en órbitas LEO durante los 5 años de la misión SAC-D [22]. Se aprecia que la primer y segunda subcelda (*Top* y *Middle* respectivamente) prácticamente no muestran diferencias antes y después de la irradiación, pero la RE de la tercer subcelda (*Bottom*), presenta signos de degradación luego de la irradiación. Considerando lo expresado anteriormente en cuanto al error estimado con que se mide

la *RE*, puede concluirse que para la fluencia utilizada se produjo degradación en la *RE* de la subcelda de *Ge* debido al daño provocado por la radiación (ver figura 3.38) ya que las diferencias de *RE* en esta subcelda antes y después de irradiar rondan el 6 % en la zona central de dicha subcelda. Esto es compatible con el hecho de que la celda de *Ge* presenta menor resistencia al daño por radiación que las restantes para irradiaciones con protones de 10 MeV [15].

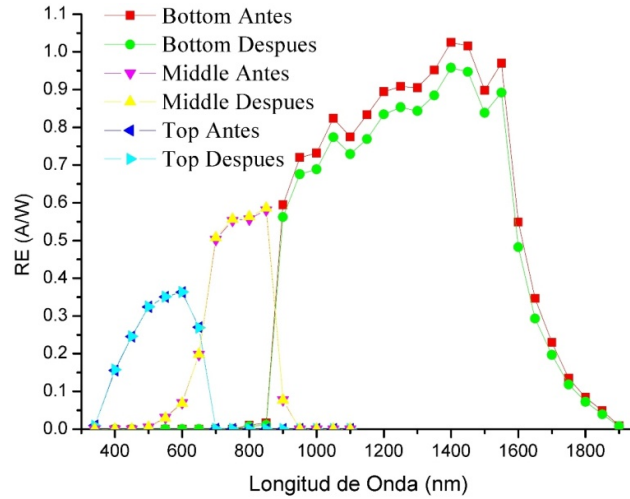


Figura 3.38. *RE de una celda ATJ antes y después de su irradiación con protones.*

Una posible forma de evaluar el daño provocado por radiación es calcular la corriente de corto circuito de cada subcelda mediante la ecuación (3.5) y el espectro estándar AM0. Los pasos a seguir para ello son similares a los usados para calcular los espectros que seleccionan cada subcelda. La diferencia es que ahora utilizaremos una interpolación (a una cantidad de puntos igual a los que tenemos del espectro AM0) de la respuesta espectral medida, multiplicada por el espectro AM0. Integrando numéricamente para cada subcelda en todo el intervalo de longitudes de onda, hallamos la densidad corriente de corto circuito para la subcelda.

Los resultados de este procedimiento pueden visualizarse en la figura 3.39, donde también se exponen los resultados de la integración numérica para cada subcelda. Para las subceldas *Top* y *Middle* no se observan diferencias apreciables antes y después de la irradiación como demuestra la variación de menos del 0,5 % en los cálculos de su densidad de corriente de cortocircuito. En cambio en la subcelda *Bottom* se observa una degradación en densidad de corriente de cortocircuito de aproximadamente un 11 %. Si

bien esta reducción en la corriente no afecta a la corriente de salida de la celda, ya que tanto antes como después del ensayo de daño la subcelda *Top* es la limitante de la corriente de la multijuntura, es posible que el daño degrade otros parámetros eléctricos de la celda como la tensión de circuito abierto [14,15] y por lo tanto se vea disminuida su potencia generada.

De esta forma las subceldas de *Ge* y *GaAs*, que son más susceptibles al daño por radiación [14], disminuirán su J_{cc} a lo largo de su vida útil sin afectar la corriente de salida de la celda.

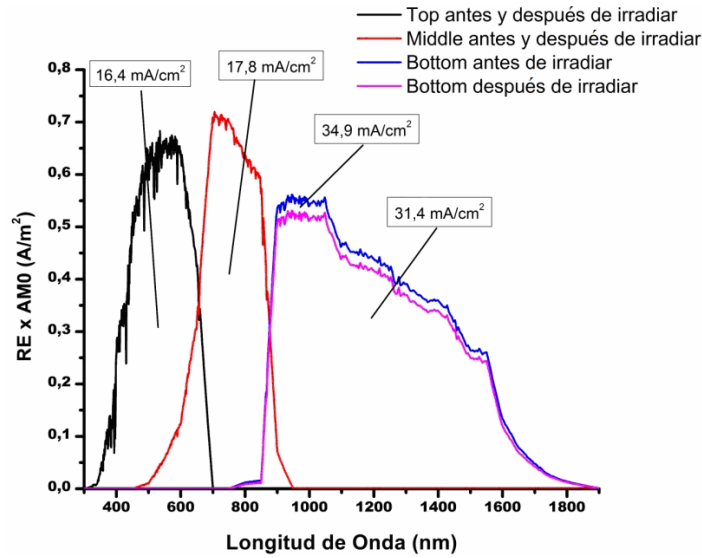


Figura 3.39. Densidad de corriente de cortocircuito en función de la longitud de onda para las tres subceldas componentes de una celda ATJ. En los casos de las subceldas *Top* y *Middle* no se observan diferencias antes y después de la irradiación, mientras que en el caso de la subcelda *Bottom* se observa una degradación en densidad de corriente de cortocircuito antes y después de la irradiación.

3.9 Conclusiones

En este capítulo se presentaron los cambios necesarios para adaptar un equipo de medición de RE de celdas solares monojuntura de *Si* a celdas comerciales de TJ de estructura *InGaP/GaAs/Ge*. Estas celdas, de 27,5 cm^2 de área, tienen un tamaño relativamente grande comparado con celdas de laboratorio, lo que exigió recrear condiciones estándares de iluminación sobre superficies más grandes. Asimismo se mostraron, una vez realizadas dichas modificaciones, los ensayos de calibración y puesta a punto que permitieron que el equipo tenga una funcionalidad adecuada para este tipo de aplicación. Se muestran también los primeros resultados de mediciones de

RE en celdas solares comerciales, habiéndose realizado la estimación del error cometido en la medición de *RE* y una aplicación para la evaluación del daño por radiación en celdas TJ.

Desde el punto de vista del *setup*, se diseñó y agregó una segunda rueda de filtros a fin de extender el rango de generación de la luz monocromática entre 1150nm y 1900nm. Por otra parte se realizaron modificaciones en las fuentes de luz de polarización para obtener los espectros capaces de seleccionar a cada una de las tres subceldas. Esto se logró colocando una segunda lámpara dicróica más el agregado de soportes para filtros ópticos pasabanda con el fin de poder cambiar las condiciones espectrales de iluminación, buscando en todos los casos obtener intensidades similares al estándar AM0.

Finalmente, el sistema fue automatizado mediante un *software* de control que mueve las ruedas de filtros por medio de motores paso a paso y permite realizar la medición en forma automática para cada subcelda.

Se desarrolló además una planilla de cálculo para obtener los distintos espectros de polarización necesarios, basada en la medición de los espectros de las lámparas dicróicas, la transmitancia de distintos filtros ópticos de banda ancha y una respuesta espectral típica de una celda multijuntura *InGaP/GaAs/Ge*. De este modo se obtuvieron los tres espectros requeridos para seleccionar cada subcelda y su validación experimental mostró una buena correlación con los valores de corriente fotogenerada dados por la planilla. A estos espectros se los comparó con el espectro AM0 en intensidad global, concluyéndose que cada subcelda está en condiciones cercanas a las normales de funcionamiento

Obtener un *setup* funcional implicó además la transferencia del patrón de respuesta espectral de una celda calibrada, generando dos patrones secundarios, para la medición de esta propiedad en celdas de triple-juntura *InGaP/GaAs/Ge* de estructura monolítica (aunque desde ya este patrón puede ser utilizado para medir otros tipos de celdas), concluyendo con esto el desarrollo del equipo para la medición de celdas multijuntura. Para una correcta transferencia también se estudió la dependencia de la *RE* con las condiciones de polarización eléctrica, encontrándose variaciones para la subcelda de *Ge* asociadas al hecho de que la condición de cortocircuito para dicha

subcelda no se puede garantizar en forma experimental por no tener acceso a sus terminales. Se utilizó el método descrito en [7] para hallar un valor óptimo en la tensión de polarización de la celda a fin de colocar en las cercanías de cortocircuito a la subcelda de *Ge*.

Durante la transferencia del patrón de *RE* a las referencias se adquirió experiencia en el cálculo y elección de espectros de polarización lumínica y de los valores de tensión óptimos para polarizar la celda multijuntura, conocimientos que resultan particularmente valiosos para futuras mediciones de celdas de diferentes características.

Se estimó el error asociado a la medición de la respuesta espectral en nuestro equipo resultando, para las celdas ATJ, menor al 3 % en el rango longitudes de onda donde responde cada subcelda. Es importante mencionar que la estimación del error con que se mide *RE* permite establecer, por ejemplo, si las diferencias en *RE* encontradas entre mediciones de una misma celda (o subcelda) sometida a un ensayo de daño por radiación, o bien antes y después de realizar algún proceso sobre la celda, son significativas o no.

Por último se calculó, utilizando la *RE* medida, la corriente de cortocircuito que tendrían las subceldas componentes de la triple-juntura en presencia de radiación solar AM0 antes y después de su irradiación con protones de 10 MeV, habiéndose evaluado de esta forma el daño producido por radiación sobre las subceldas de *InGaP*, *GaAs* y *Ge*. Se comprobó que la celda *Ge* es la más susceptible a la degradación para estas condiciones experimentales.

3.10 Referencias

1. M.A. Green, "Solar cells: operating principles, technology and system applications", ed. University of New South Wales, Australia (1992).
2. ASTM N° E 1021-84. Standard methods for measuring the spectral response of photovoltaic cells, (1984).

3. Norma IRAM 210013-12. Métodos normalizados para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas (2000)
4. S. Fortin, M.G. Martínez Bogado, J. Plá. Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 04.01 (2005).
5. K.D. Benjamin, et al.. Harmonic errors associated with the use of choppers in optical experiments. Measurement 39, 764 (2006).
6. M.J.L. Tamasi, M.G. Martínez Bogado, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, I. Prario, M. Alurralde, A. Filevich. Photovoltaic sensors for Aquarius/SAC-D satellite mission: development and environmental tests. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 700 (2009).
7. M. Meusel, C. Baur, A.W. Bett, W. Warta y E. Fernández. Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 11, 499 (2003).
8. D.L. King , B.R. Hansen , J.M. Moore y D.J. Aiken. New methods for measuring performance of monolithic multi-junction solar cells. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Alaska, EE.UU., 1197 (2000).

9. ASTM N° E 2236-05. Measurement of Electrical Performance and Spectral Response of Nonconcentrator Multijunction Photovoltaic Cells and Modules, (2005)
10. J. Garcia, “Respuesta espectral en celdas solares multijuntura de estructura monolítica basadas en semiconductores III-V”, Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas, Departamento de Física, FCEyN-UBA (2011).
11. H. Socolovsky, J. Garcia, and J. Pla. Setup development for spectral response measurement on multijunction solar cells. Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, España, 854 (2010).
12. M. Barrera, et al. Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in Argentina”, Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, España, 781 (2008).
13. ASTM E-490-00 Standard Extraterrestrial Spectrum Reference <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>, (2000)
14. M. Stan et al. The development of > 28 % efficient triple-junction space solar cells at Emcore photovoltaics. Proceedings of the 3rd. World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Osaka, Japón, 662 (2003).
15. R.J. Walters, J.H. Wamel, G.P. Summers, S.R. Messenger and J.R. Lorentzen. Radiation response mechanisms in multijunction III-V space solar cells. Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 542 (2005).
16. S.H. Lim, J.J. Li, E.H. Steenbergen and Y.H. Zhang. Luminescence coupling effects on multijunction solar cell external quantum efficiency measurement. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 21, 344–350 (2013).

17. K. Emery, D. Dunlavy, H. Field, and T. Moriarty. Photovoltaic spectral responsivity measurements. Proceedings of the 2nd. World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Viena, Austria, 2298 (1998).
18. S. Winter, J. Metzdorf, and E. Fernandez Lisbona. Spectral responsivity calibration of Ge component solar cells derived from triple junction devices. Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 2544 (2004).
19. M. A. Steiner and J. F. Geisz. Non-linear luminescent coupling in series-connected multijunction solar cells. Applied Physics Letters, 100, 251106 (2012).
20. M. Alurralde, J. L. Tamasi, C. J. Bruno, M. G. Martínez Bogado, J. Pla, J. Fernandez Vazquez, J. C. Duran, J. Schuff, A. A. Burlon, P. Stoliar, and A. J. Kreiner, "Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells 82, 531 (2004).
21. M. Alurralde et al., "Advances in the development of photovoltaics for space applications in Argentina," Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 687 (2007).
22. Alurralde et al., "Development of solar arrays for argentine satellite missions," Aerospace Science and Technology 26, 38 (2013).

Capítulo 4

Medición de la característica I-V de dispositivos FV mediante la técnica multiframe.

4.1 Introducción

La medición de la curva $I-V$ de un dispositivo fotovoltaico quizás sea la caracterización más importante de todas: a partir de ella pueden obtenerse parámetros fundamentales como tensión de circuito abierto, corriente de cortocircuito, punto de máxima potencia y por sobre todo la eficiencia de conversión energética de la celda o módulo FV bajo ensayo.

Para la determinación de la curva $I-V$ de un dispositivo fotovoltaico se requiere el uso de ciertas condiciones normalizadas o estándar de acuerdo a las cuales se realiza la medición. Estas condiciones operan sobre: la potencia lumínica por unidad de superficie en el plano de medición, denominada irradiancia, expresada en W/m^2 , el contenido espectral de la misma (según se vio en el capítulo 1), y la temperatura de la celda/s del dispositivo bajo ensayo, ya que la curva $I-V$ de una celda ó módulo FV es sensible a estos tres parámetros. Cabe aclarar que la fuente lumínica puede ser luz natural (radiación solar) o, como se verá, provista en forma artificial mediante el uso de simuladores solares. Particularmente, en este capítulo se analizará el uso de una fuente de luz pulsada como simulador solar para la medición eléctrica de los módulos FV de las misiones SAC-D/Aquarius y SAOCOM 1A utilizando la técnica denominada multiframe.

4.2 Condiciones estándar para aplicaciones terrestres y espaciales.

Dependiendo del campo de aplicación del dispositivo las condiciones normalizadas o estándar son:

- Aplicaciones terrestres: un nivel de irradiancia de 1kW/m^2 , espectro solar AM1.5G y 25°C de temperatura de operación de celda. De este modo, por ejemplo, todos los fabricantes de módulos FV para aplicaciones terrestres deben reportar las características de salida del producto para estas condiciones.
- Aplicaciones espaciales: densidad de potencia 1367W/m^2 , espectro solar AM0 (espectro solar fuera de la atmósfera) [1], temperatura de operación de celda 28°C .

Queda claro entonces que las mediciones de dispositivos fotovoltaicos deben realizarse preferentemente en estas condiciones, o en caso contrario se permitirán pequeños apartamientos para posteriormente corregir la medición y llevarla a condiciones estándar [2,3].

4.3 Simuladores solares

Ahora bien, no siempre es posible alcanzar condiciones estándar de medición con iluminación natural, dado que las condiciones anteriormente mencionadas se deben dar en forma simultánea.

Se suma a esto que para el caso de aplicaciones espaciales la intensidad de la luz natural en la superficie terrestre nunca alcanza los 1367 W/m^2 debido a la absorción y dispersión atmosférica y además, dado que los paneles solares de un satélite se fabrican en ambientes controlados (*clean room*), no es factible exponerlos al exterior. Por tal motivo, muchas veces la única posibilidad es realizar la medición dentro de un laboratorio a temperatura controlada utilizando un simulador solar, el cual consiste básicamente en un artefacto que mediante lámparas de iluminación y óptica accesoría simula la luz solar natural.

Los simuladores solares están clasificados en dos tipos, simuladores solares continuos y pulsados. Los primeros están basados en lámparas incandescentes o de descarga gaseosa (o combinación de ambas) que proveen un haz lumínico continuo. Este tipo de simulador tiene generalmente la limitación de proveer una relativamente pequeña superficie útil de iluminación, y en la mayoría de los casos se utiliza para medir

celdas o a lo sumo cadenas de celdas siendo su capacidad recrear la intensidad y el espectro solar en algunos decímetros cuadrados de área. El otro tipo de simulador solar existente es el simulador solar pulsado, que utiliza generalmente una lámpara de descarga gaseosa de Xenón y mediante una descarga capacitiva puede irradiar durante un tiempo muy corto, del orden del milisegundo, un flujo luminoso muy alto (que no podría mantenerlo en forma continua sin ser destructivo) capaz de generar sobre el plano de prueba una intensidad similar a la solar pero cubriendo superficies del orden del metro cuadrado. Esto hace que los simuladores solares pulsados sean utilizados en la medición de módulos fotovoltaicos de gran área.

Además, los simuladores solares pulsados permiten recrear condiciones de trabajo muy similares a las estándar y es por ello también que son ampliamente utilizados para ensayos de módulos FV a nivel laboratorio. Dichas condiciones son:

- a) condición de irradiancia: se ajusta con el control de potencia del flash o con la distancia de éste al plano de prueba.
- b) temperatura de celda del módulo: al estar la temperatura del laboratorio controlada por aire acondicionado, la temperatura de celda resulta también controlada e igual a la ambiente (el módulo a ensayar debe estar termalizado) ya que la corta duración del pulso del flash (del orden del milisegundo) a pesar de entregar densidades de potencia cercanas a 1367 W/m^2 , no produce un incremento de la temperatura del dispositivo.

Como contrapartida, los simuladores solares no reproducen fácilmente ciertas características de la radiación solar natural: la uniformidad del haz luminoso proveniente del sol está garantizada para cualquier superficie que uno considere, cosa que no sucede con las fuentes artificiales. Por otro lado, como las celdas solares están diseñadas para maximizar el aprovechamiento de la luz solar natural, están adecuadas a su espectro por lo que los simuladores solares deben tener un espectro acorde a la radiación solar según su campo de aplicación.

Por estos motivos, los requerimientos que deben satisfacer los simuladores solares no son triviales de alcanzar, y por ende están clasificados en categorías según sus prestaciones. Por ejemplo, la capacidad de entregar sobre la superficie del módulo o

panel a medir la misma densidad de potencia con una cierta tolerancia establecida (por ejemplo $1\text{kW/m}^2 \pm 5\%$). Esta característica se denomina homogeneidad lumínica del haz sobre el plano de prueba. Otra característica importante es la estabilidad temporal del simulador, asociada a la variabilidad de la intensidad del haz durante un determinado tiempo (para el caso de simuladores continuos se refiere a derivas temporales). Para el caso de un simulador pulsado dicha estabilidad temporal se resume a la planitud del *plateau* que alcanza la intensidad el haz durante la descarga. Algunos simuladores comerciales logran mantener durante varios milisegundos (los mejores cerca de 10ms) una intensidad acotada en ese intervalo de tiempo en $\pm 2\%$. Este es el caso de los simuladores pulsados más costosos.

Por último, y quizás la condición más exigente, el contenido espectral de un simulador solar debe cumplir con ciertos requisitos, esto quiere decir que debe tener cierta similitud con respecto al espectro solar AM0 para el caso de aplicaciones espaciales. Para evaluar esta prestación, se determinan rangos de longitud de onda (intervalos de 100nm o 200nm según la norma) en el cual la cantidad de energía luminosa relativa contenida en ese intervalo no difiera en $\pm$ algún porcentaje con respecto a la energía contenida en ese mismo intervalo por el espectro AM0.

En el apéndice 1 se muestra una tabla con la clasificación de los simuladores solares para aplicaciones terrestres y espaciales según su homogeneidad lumínica, estabilidad temporal y espectro [4].

4.3.1 Espectro y tipos de simuladores solares pulsados

El espectro de una lámpara de descarga de Xenón es básicamente la superposición de dos espectros producto de procesos físicos distintos: emisión térmica del gas por calentamiento debido a la alta densidad de corriente eléctrica en la descarga (espectro continuo similar al de un cuerpo negro a 5800°K) y líneas de emisión al volver los electrones del gas excitado a su estado fundamental (espectro discreto).

Este segundo efecto, que es muy intenso, hace que el espectro resultante diste bastante del espectro solar AM0 o AM1.5, ya que posee un gran excedente de luz infrarroja en la zona del espectro donde están los picos (figura 4.1). Este excedente de luz infrarroja hace que para el caso de celdas solares de triple juntura, tal como se vio en

el capítulo 3, cambie la proporción entre las corrientes fotogeneradas por cada subcelda con relación al espectro AM0. Como consecuencia de esto, el comportamiento de una celda solar de triple juntura será distinto y su característica $I-V$ tendrá diferencias con respecto a la que se obtendría con un espectro estándar.

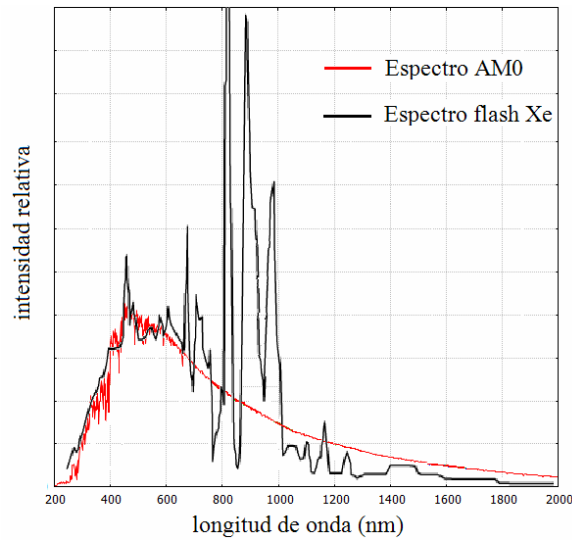


Figura 4.1. Espectro de una lámpara de flash comercial entre 200nm y 2000nm, se observa que el aporte de los picos discretos es muy importante, haciendo que este tipo de espectro diste bastante del espectro solar AM0.

En relación a los simuladores solares pulsados, existen básicamente dos tipos de sistemas de medición dependiendo del tipo de lámpara y la electrónica que tenga incorporada el equipo. El primero posee la electrónica necesaria para ejercer un cierto control sobre la corriente eléctrica que se establece durante la descarga, por lo que logra sostener un pulso lumínico de varios milisegundos. Esto permite que se establezca un *plateau* en la intensidad del pulso de luz, permitiendo capturar la curva $I-V$ completa de un módulo en un único disparo. Para ello, el sistema cuenta además con una carga electrónica que polariza al panel desde cortocircuito hasta circuito abierto en sincronismo con la descarga del flash. Estos simuladores son muy costosos y no se cuenta en la actualidad con dicha infraestructura en el país. Este tipo de simuladores solares proveen además cierto acondicionamiento espectral de la luz que emiten utilizando distintos tipos de filtros ópticos, por lo que logran clasificarse como clase AAA según el estándar [4]. En la figura 4.2.a) se aprecia el perfil de intensidad lumínica en función del tiempo para este tipo de sistema.

Otra opción a la hora de obtener la curva $I-V$ de un panel o módulo FV es mediante el uso de lámparas de estudio fotográfico, las cuales poseen una descarga no controlada y de mucha menor duración (apenas llegan al ms, en donde la duración del pico de intensidad relativamente constante es del orden de 50 μ s a 100 μ s, figura 4.2.b). Esto no permite que se pueda obtener la curva $I-V$ en un único disparo de flash dado que el pulso de luz nunca se estabiliza.

A este tipo de descarga se le suma el hecho de que el corto tiempo de duración del pulso de luz hace que sea muy difícil medir su espectro en el laboratorio (entre 300nm y 2000nm) mediante espectrorradiómetros convencionales.

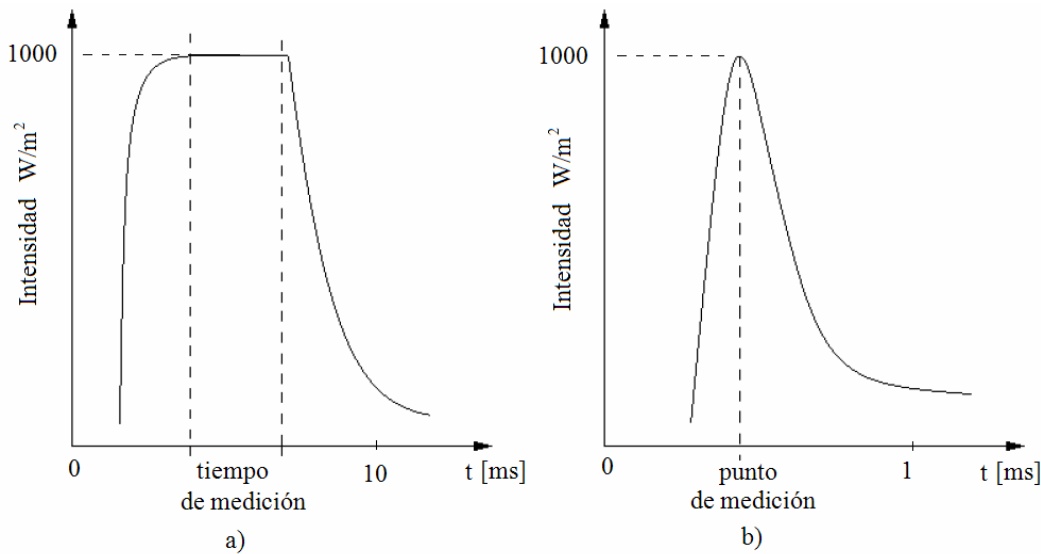


Figura 4.2. Perfiles de descarga de los dos tipos de sistemas de flash que existen; en el primero (a) se establece un plateau que permite medir la curva $I-V$ en un único disparo, mientras que para el segundo caso (b) se utiliza la técnica multiflash.

4.4 Técnica Multiflash

Cuando se utiliza una lámpara de estudio fotográfico, dado el corto tiempo de duración de su pulso, la técnica utilizada en la caracterización de módulos FV es la denominada multiflash [5], que consiste en disparar varias veces el flash y por cada disparo tomar un único punto de la curva $I-V$. Para ello solamente es necesario cambiar en forma discreta la condición de carga del dispositivo bajo ensayo desde cortocircuito

hasta circuito abierto. En todos los casos se mide la amplitud máxima del pulso de tensión y corriente generado por el módulo o celda y se obtiene cada par $I-V$ de la curva correspondiente a cada condición de carga.

Dentro del DES esta técnica fue implementada por C.J. Bruno, y sirvió para evaluar la generación de potencia de los paneles solares del satélite SAC-D/Aquarius luego que fueran fabricados en el laboratorio de integración de paneles solares para uso espacial del DES. Posteriormente y durante las campañas de calificación de los paneles, esta técnica de medición fue muy utilizada para evaluar el desempeño de los módulos FV posterior a cada uno de los ensayos (vibraciones, ciclados térmicos y termovació). Dicha campaña de ensayos de calificación fue realizada en los laboratorios de INVAP S.E. (2009, Bariloche, Argentina), los del LIT-INPE (2010, Laboratorio de Integración y Testeo del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil) y posteriormente en la base de lanzamiento del *Jet Propulsion Lab* (JPL) en Vandenberg, California, EEUU (Abril 2011).

Las ventajas de este método de caracterización son: la sencillez de la fuente de iluminación, dado que consiste en un flash de estudio fotográfico con la potencia suficiente como para cubrir el área deseada; por otro lado la electrónica asociada a la medición se reduce a una carga variable, capaz de ofrecer estados desde (aproximadamente) cortocircuito hasta circuito abierto pasando por sus estados intermedios. Para la medición solamente es necesario contar con un osciloscopio digital para la captura del pulso de tensión y corriente ocasionados por la descarga del flash y una celda de referencia calibrada para monitorear la intensidad lumínica de cada disparo. Esto hace que la técnica multiframe sea muy sencilla de implementar y que además el equipamiento necesario sea de bajo costo. Por supuesto que otra ventaja es su facilidad de transporte a otros laboratorios como por ejemplo durante las campañas de calificación de los paneles solares de un satélite.

Como se mencionó anteriormente, la contrapartida de utilizar este tipo de iluminación es la de operar con un espectro fuera de norma. Por tal motivo surgió la necesidad de contar con una herramienta teórico-experimental capaz de evaluar la diferencia en la curva $I-V$ obtenida con este tipo de espectro con relación a la que tendría si el módulo fuera iluminado con un espectro estándar AM0. De este modo se

podrían cuantificar las diferencias en la medición ocasionadas por trabajar con un espectro fuera de norma y además establecer una cota de error para las mediciones, por ejemplo al obtener el punto de máxima potencia de un módulo fotovoltaico.

4.5 Característica I-V en función del espectro en celdas de triple juntura

Las celdas solares de triple juntura son celdas avanzadas que optimizan la absorción de fotones según su energía. Básicamente se trata de celdas formadas por una estructura epitaxial monolítica de semiconductores crecida en forma de multicapa mediante técnicas de MOCVD (deposición química de fase vapor con precursores metal-orgánicos) que conforman una sucesión de celdas homojuntura interconectadas en serie a través de junturas túnel. Están concebidas de modo tal que cada una de las subceldas que componen una celda multijuntura absorba una parte distinta del espectro solar de modo de poder “clasificar” por rango la energía de los fotones que le llegan. A mayor *gap* del semiconductor, mayor energía de fotón es necesaria para pasar un electrón a la banda de conducción y por ende mayor la diferencia de potencial que se desarrolla en los extremos de la juntura. Cuando la energía del fotón no es suficiente para generar pares en el volumen del material semiconductor, dicho material se vuelve transparente, dejando de este modo pasar la luz hacia la siguiente subcelda. Debido a esto, la última subcelda, la de menor *gap*, se encarga de coleccionar los fotones de menor energía, desarrollando la más baja de las tensiones de todo el conjunto. Finalmente, dado que la conexión de las subceldas corresponde a la de un circuito serie (por estar crecidas en forma monolítica e interconectadas a través de diodos túnel) la corriente del conjunto, cuando se conecta una carga externa, es única e igual a la menor de las tres fotocorrientes y, a su vez, la tensión de la celda es la suma de las tensiones de cada una de las subceldas que componen la TJ.

Cabe aclarar que cada subcelda que compone una celda de triple juntura no se encuentra eléctricamente accesible, por lo que no es posible realizar mediciones de cada una en forma individual, siendo este desafío una de las motivaciones del presente trabajo.

Al iluminar una celda de triple juntura con una determinada fuente de luz cada subcelda que la compone absorberá una determinada parte del espectro de luz de dicha

fuerza de acuerdo al coeficiente de absorción y la estructura de capas de los semiconductores que conforman dichas subceldas. Por consiguiente, la corriente eléctrica que generará cada una de ellas es independiente de las demás subceldas. Como se mencionó anteriormente, la corriente del conjunto estará establecida por la que menor corriente eléctrica genera. Los excesos de corriente de las demás subceldas con respecto a la limitante, drenarán entonces por la juntura propia de cada subcelda y consecuentemente la polarizarán con un cierto valor de tensión.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la tensión de una celda multijuntura es la suma de las tensiones de cada subcelda para una determinada corriente. Al variar todos los estados de carga, desde cortocircuito hasta circuito abierto, para cada valor de corriente I cada subcelda desarrollará un determinado valor de tensión y en consecuencia la suma de estas tres tensiones nos dará la tensión de la celda de triple juntura.

En consecuencia, la curva I - V resultante dependerá fuertemente del espectro de luz utilizada para su medición, siendo por lo general, el factor de forma de la celda triple juntura el mismo de la subcelda que limita la corriente del conjunto. En la figura 4.3 se aprecia como se genera la curva I - V de una celda TJ a partir de las curvas I - V de las subceldas que la componen.

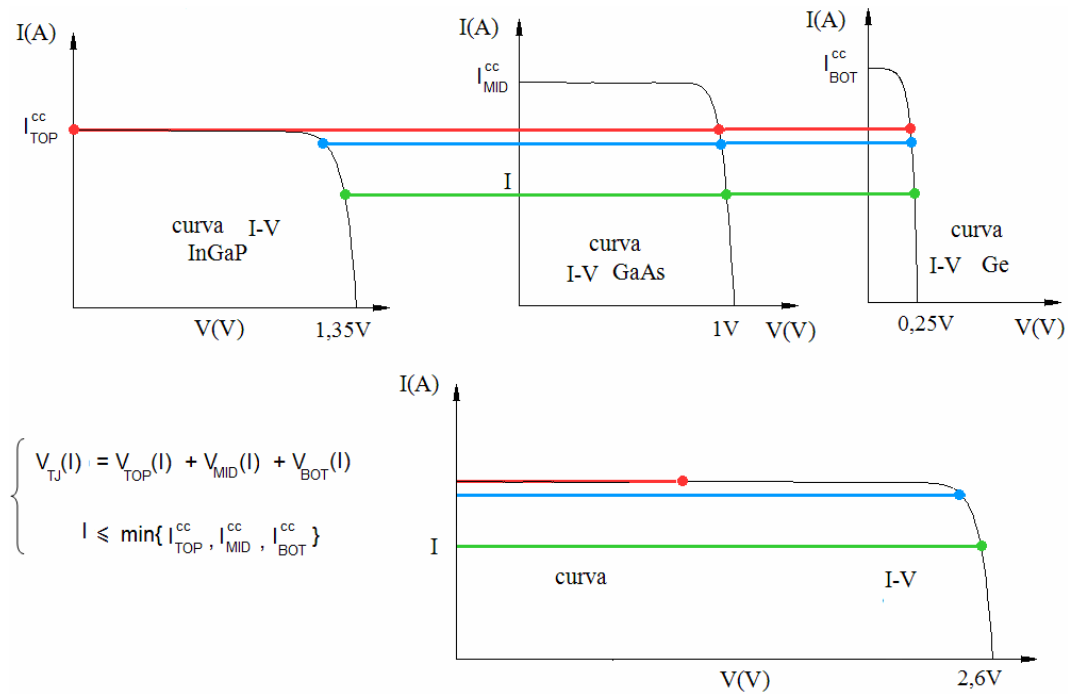


Figura 4.3. Característica I - V de una celda de TJ en función de las curvas I - V de cada subcelda. Para una corriente dada I se suman las tensiones de cada subcelda.

Este es el motivo por el cual, a la hora de realizar mediciones sobre celdas solares multijuntura, se hace necesario utilizar una fuente de luz que, además de tener la intensidad y la homogeneidad apropiadas, tenga un espectro de acuerdo al estándar según las condiciones de uso de la celda (AM1.5G para aplicaciones terrestres, o AM1.5D para celdas a utilizar con concentración óptica, y AM0 para uso espacial) siendo éste requerimiento mucho más crítico que para el caso de medir dispositivos monojuntura.

Por ejemplo, en el laboratorio de integración de paneles solares del DES se cuenta con un simulador solar continuo clase A de la firma TS-Space, cuyas características “*close match AM0*” aseguran el espectro e intensidad adecuados (AM0 y 1367W/m^2) para la medición de las celdas individuales durante el proceso de integración de las mismas. En la figura 4.4 se aprecia el simulador solar TS-Space y en la figura 4.5 su espectro relativo comparado con el espectro solar extraterrestre AM0.



Figura 4.4. *Simulador solar continuo TS-Space con espectro “close match AM0” utilizado en el laboratorio de integración de paneles solares del DES para la medición de celdas y cadenas de celdas bajo estándar espacial. Izq: fuente de alimentación y electrónica de control de las lámparas, der: interior del simulador y base termostatzada para medición.*

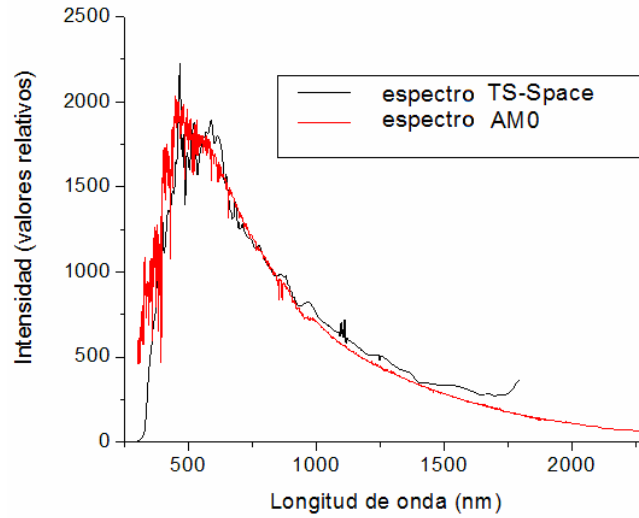


Figura 4.5. Espectros normalizados; se compara el espectro del simulador solar clase A TS-Space del DES versus el espectro solar estándar AM0.

4.5.1 Modelado numérico de una celda de triple juntura

Por el motivo expuesto en los párrafos anteriores, surgió la necesidad de contar con una herramienta capaz de predecir el comportamiento de la característica I - V de una celda de triple juntura para cualquier espectro de iluminación. Particularmente y tal como se mencionara, esto podría aplicarse al caso del espectro de un flash y proporcionaría una forma de evaluar cuantitativamente el error cometido al medir un módulo FV con un espectro fuera de norma.

Para lograr este objetivo, sería necesario contar con la curva I - V de cada subcelda que compone una triple juntura para una fuente de iluminación dada, a fin de poder aplicar el principio de superposición y reconstruir la curva I - V del tándem TJ. Pero, como se comentó anteriormente, no es factible medir en forma directa la curva I - V de cada componente dado que las celdas multijuntura son celdas de estructura monolítica con solo dos contactos. Por este motivo fue necesario desarrollar un método que permita obtener o modelar en forma indirecta la curva I - V de cada celda componente, *top* (*InGaP*) , *middle* (*GaAs*) y *bottom* (*Ge*) a partir de mediciones de celdas de una o dos junturas denominadas isotipo, las cuales serán descritas en las próximas secciones.

4.5.2 Antecedentes

Existen precedentes en los cuales se propusieron modelos y protocolos para este fin, como el trabajo de S. Kurtz et al. [6], que presenta un método para obtener la curva $I-V$ individual de cada subcelda para el caso de celdas de doble juntura con dos contactos terminales, para posteriormente y mediante el uso de superposición poder obtener la curva $I-V$ de la multijuntura. No obstante, el algoritmo particular presentado pierde precisión cuando se aplica a celdas de triple juntura. Por otro lado, el trabajo de C. Domínguez et al. [7] propone un método para determinar la curva $I-V$ de una celda solar de triple juntura en función del espectro e irradiancia. Este complejo método fue solamente validado para simuladores solares pulsados con intensidades lumínicas de 100 soles. Además, no evalúa los posibles efectos dinámicos que pueden ocurrir debido a la utilización de simuladores pulsados con descargas rápidas.

Reportes previos también han presentado efectos transitorios que modifican la curva $I-V$ de una celda solar [8-10], pero poco se conoce sobre como tales efectos modifican la respuesta de la celda cuando se aplica el método multiflash.

En este capítulo se propone un método para determinar la característica $I-V$ de una celda solar $InGaP/GaAs/Ge$ de triple juntura bajo cualquier espectro deseado de iluminación e irradiancia y está basado en la medición de tres celdas calibradas denominadas isotipo utilizando un simulador solar económico, en nuestro caso clase C. El método fue posteriormente validado para diferentes escenarios espectrales de iluminación.

Asimismo, se realizó un análisis dinámico para el caso de utilizar una lámpara de flash de pulso rápido a fin de evaluar efectos transitorios debido al tiempo de respuesta de la celda. Para llevar a cabo dicho análisis fue necesario elaborar un modelo dinámico de la celda TJ en donde las capacidades individuales de cada subcelda fueron estimadas. Además, se realizaron simulaciones eléctricas del modelo dinámico obtenido mediante el *software* PSpice. Por último, dichas simulaciones fueron contrastadas con las mediciones experimentales realizadas en el laboratorio.

4.5.3 Obtención de los parámetros del modelo.

Para la realización del trabajo se utilizaron cuatro celdas solares de la firma Emcore Photovoltaics, las cuales fueron provistas con certificados de calibración de corriente de cortocircuito bajo condiciones AM0 (1367W/m^2 , espectro AM0, 28°C) y también calibradas en respuesta espectral absoluta.

Más precisamente las celdas solares calibradas utilizadas fueron:

Una celda solar de triple juntura de estructura *InGaP/GaAs/Ge* de $27,5\text{cm}^2$ de área y tres celdas isotipo que se corresponden a cada juntura de la celda TJ: *top*, *middle* y *bottom* isotipo, las cuales se describen a continuación.

La celda isotipo de *Ge* es una celda homojuntura pero con la estructura de una TJ *InGaP/GaAs/Ge* completa de modo de tener las mismas características ópticas que en la triple juntura, es decir, la luz que recibe la última subcelda (*Ge*) llega filtrada por la estructura de capas superior. Desde el punto de vista eléctrico solamente está activada la subcelda de *Ge*. Se entiende que una subcelda está activada cuando dentro de su estructura tiene un emisor n^+ y una base p de modo de formar una juntura n^+/p .

La celda isotipo *top* es una celda de doble juntura con estructura *InGaP/GaAs/Ge* pero con las subceldas de *InGaP* y *Ge* activas, de modo de ser representativa de la subcelda *top*. La celda isotipo *middle* es una celda de doble juntura con estructura *InGaP/GaAs/Ge* pero con las celdas de *GaAs* y *Ge* activas, de modo de ser representativa de la subcelda *middle*. Nuevamente aquí, la luz que llega a la estructura de *GaAs* está previamente filtrada por la estructura de capas que conforman la subcelda de *InGaP*. El hecho de que todas tengan la misma estructura de capas (*InGaP/GaAs/Ge*) hace que cada componente en las celdas isotipo tenga la misma respuesta espectral que cada subcelda componente en una triple juntura, por lo que generarán la misma fotocorriente al ser iluminadas por una dada fuente de luz.

El objetivo es obtener un modelo numérico de la curva *I-V* para cada subcelda de *InGaP*, *GaAs* y *Ge*. Lo ideal hubiera sido contar una celda homojuntura de cada una de éstas, ya que con la medición de su curva *I-V* se tendría directamente el modelo. Esto es así para la celda isotipo de *Ge*, pero por razones inherentes al proceso de fabricación y por el hecho de estar crecidas sobre un sustrato de *Ge*, las celdas isotipo *top* (*InGaP/Ge*)

y *middle* (*GaAs/Ge*) son celdas de doble juntura. Por este motivo, para hallar los modelos numéricos de las estructuras *InGaP* y *GaAs*, habrá que restar de la curva *I-V* de estas dos celdas isotipo la curva *I-V* de la subcelda de *Ge*.

Para poder realizar dicha substracción se deben verificar dos hipótesis fundamentales:

a) tanto la subcelda de *Ge* de las celdas isotipo *top* y *middle* y la homojuntura de *Ge* deben tener respuestas espectrales similares, que aseguraría la misma cantidad de generación de portadores y por consiguiente la misma corriente fotogenerada.

b) tanto la subcelda de *Ge* de las celdas isotipo *top* y *middle* como la celda homojuntura de *Ge* deben tener características *I-V* muy similares, esto garantiza que para una misma corriente fotogenerada por ambas celdas desarrollarán el mismo valor de tensión en sus extremos. Dado que esto no se puede medir para una celda multijuntura, se adopta como hipótesis razonable, dado que el proceso de fabricación de la triple juntura y las celdas isotipo debiera ser esencialmente el mismo.

Como se cuenta con la calibración de fábrica de la respuesta espectral de las cuatro celdas utilizadas en este trabajo, es posible corroborar si las respuestas espectrales de la celda homojuntura de *Ge* y las subceldas de *Ge* de las celdas isotipo *top* y *middle* son similares (figura 4.6). A pesar de que se observan diferencias entre las *RE* en el caso de la subcelda de *Ge*, probablemente causadas por un *artifact* debido a acoplamiento lumínico en la medición [11], a los fines prácticos esto no afecta las estimaciones realizadas con este método. De igual manera se corrobora que las *RE* de la *top* y *middle* de las correspondientes celdas isotipo son casi idénticas a las *RE* de las celdas *top* y *middle* de la TJ.

De esta manera, para un espectro de iluminación arbitrario, los valores de las fotocorrientes generadas por las tres subceldas de la TJ pueden ser estimadas midiendo la corriente de cortocircuito generada por cada celda isotipo siempre y cuando la subcelda de *Ge* no sea la que limita la corriente.

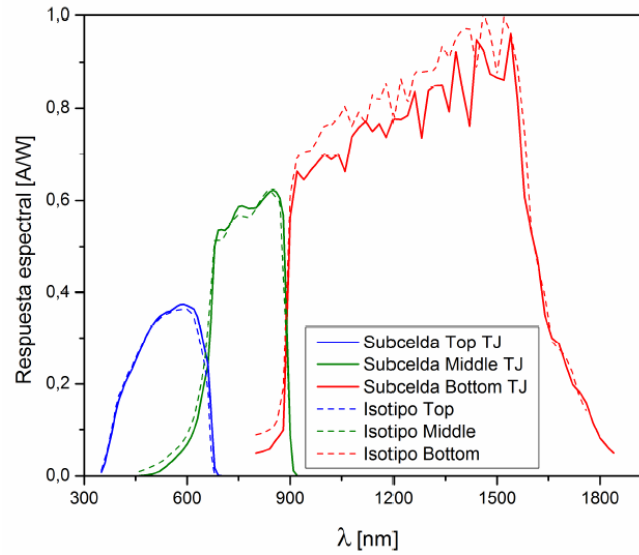


Figura 4.6. Comparación entre las respuestas espectrales de las subceldas de la triple junta versus la RE de cada celda isotipo. Se aprecia una cierta diferencia en la RE de la subcelda de Ge.

4.5.3.1 Pasos a seguir para la obtención del modelo numérico de celdas componentes

El método propuesto presupone que la curva $I-V$ de cada subcelda en las estructuras isotipo se ajusta a la curva $I-V$ de cada subcelda de la triple junta, y además considera despreciable las caídas de tensión de las junturas túnel. Los pasos a seguir para determinar la curva $I-V$ de una celda TJ de estructura $InGaP/GaAs/Ge$ bajo una determinada fuente de iluminación son:

1) Utilizando una fuente de luz estable, con irradiancia cercana a 1367W/m^2 , se miden las curvas $I-V$ de las tres celdas isotipo. No es necesario que el espectro de dicha fuente cumpla con algún estándar, lo que permite al simulador por ejemplo ser clase C. Se debe trabajar a una temperatura fija, estable y controlada; en este caso se trabajó a una temperatura de 28°C , de acuerdo al estándar espacial [4]. Solamente hay una limitación: si la subcelda de Ge de las celdas isotipo limita la corriente del tandem para un espectro dado, no puede aplicarse este método. Finalmente las curvas $I-V$ de las celdas isotipo son medidas por única vez.

2) Para obtener el modelo numérico de la subcelda *InGaP*, se toma la curva I - V de la isotipo *top* (*InGaP/Ge*) y le se resta la curva I - V de la celda isotipo de *Ge*. El método de cálculo se describe en [6] y consiste en restar las tensiones de las curvas I - V para un valor fijo de corriente para cada punto de la curva:

$$V_{\text{InGaP}}(I) = V_{\text{InGaP/Ge}}(I) - V_{\text{Ge}}(I) \quad (4.1)$$

Nuevamente, para obtener el modelo numérico de la subcelda *GaAs*, se toma la curva I - V de la isotipo *mid* (*GaAs/Ge*) y se le resta la curva I - V de la celda isotipo de *Ge*.

$$V_{\text{GaAs}}(I) = V_{\text{GaAs/Ge}}(I) - V_{\text{Ge}}(I) \quad (4.2)$$

donde $V_{\text{InGaP/Ge}}(I)$, $V_{\text{GaAs/Ge}}(I)$ y $V_{\text{Ge}}(I)$ son las curvas I - V medidas en el paso anterior. El resultado de estas restas dan los modelos numéricos de las subceldas de *InGaP* y *GaAs* como si fuesen celdas homojuntura ($I_{\text{InGaP}}(V)$ e $I_{\text{GaAs}}(V)$ respectivamente). Esta corrección no es necesaria para el caso de la celda de *Ge* dado que es ya una homojuntura en sí misma.

3) Restar la corriente de cortocircuito a los modelos numéricos I - V de las subceldas. Estas nuevas curvas son consideradas como curvas I - V a oscuras ($I_i^{\text{dark}}(V)$):

$$I_i^{\text{dark}}(V) = I_i(V) - I_{\text{CC},i} \quad (4.3)$$

donde $I_{\text{CC},i}$ es la corriente de cortocircuito de la subcelda i , con i igual a las subceldas *InGaP*, *GaAs*, y *Ge*. Para obtener el valor de I_{CC} se linealiza el sector de la curva I - V cercano a cortocircuito y se toma de dicha recta el valor de corriente para $V=0$.

4) Utilizando la fuente de luz deseada, medir la corriente de cortocircuito de las tres celdas isotipo. Estos valores ($I_{\text{CC},i}^{\text{desired}}$) son posteriormente, utilizando el principio de superposición, utilizados como las fotocorrientes de las subceldas, y se sumarán a las curvas obtenidas previamente (*dark*) con el fin de obtener la curva I - V de cada subcelda iluminada con el nuevo espectro ($I_i^{\text{desired}}(V)$):

$$I_i^{\text{desired}}(V) = I_i^{\text{dark}}(V) + I_{CC,i}^{\text{desired}} \quad (4.4)$$

Otra forma de estimar las corrientes de cortocircuito es utilizando la ecuación (4.5), siempre y cuando se conozcan la respuesta espectral de cada subcelda y la irradiancia espectral de la fuente de luz.

$$I_{CC,i}^{\text{desired}} = \int SR_i(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (4.5)$$

donde $SR_i(\lambda)$ es la *RE* de cada subcelda, $f(\lambda)$ es la irradiancia espectral de la fuente de luz deseada y λ es la longitud de onda.

5) Sumar las curvas I - V de las tres subceldas iluminadas para obtener la característica I - V de la celda TJ para el espectro deseado. Esto se logra sumando las tensiones de las subceldas para un valor de corriente fijo para cada punto, como se describió en el paso 2:

$$V_{TJ}(I) = V_{\text{InGaP}}^{\text{desired}}(I) + V_{\text{GaAs}}^{\text{desired}}(I) + V_{\text{Ge}}^{\text{desired}}(I) \quad (4.6)$$

Debe notarse que la curva I - V obtenida es válida para la misma temperatura a la cual las celdas isotipo fueron medidas. Las correcciones correspondientes por temperatura son necesarias en caso de querer predecir la curva I - V a otra temperatura. Estas correcciones están detalladas en [7, 12,13].

4.5.4 Validación del modelo para simuladores solares continuos.

Para validar el método propuesto en la sección anterior, fueron realizadas varias mediciones con diferentes espectros de iluminación, incluyendo también la condición de oscuridad. Las fuentes de luz utilizadas en este trabajo consistieron en: una lámpara halógena de tungsteno con reflector dicróico (o simplemente ‘dicróica’), un simulador solar continuo marca TS-Space con espectro *close match AM0*, y finalmente una

lámpara comercial de flash cuyo caso será particularmente estudiado en la próxima sección.

Para evaluar cuantitativamente las diferencias entre las curvas modelada y medida se seguirá el procedimiento publicado por Domínguez et al. [7], en donde la similitud entre ambas 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 la tensión se usa después del punto de máxima potencia:

$$Error\ RMS = \left[\frac{1}{N_{mp}} \sum_{i=1}^{N_{mp}} \left(\frac{I(V_i) - \hat{I}(V_i)}{I(V_i)} \right)^2 + \frac{1}{N - N_{mp}} \sum_{i=N_{mp}+1}^N \left(\frac{V(I_i) - \hat{V}(I_i)}{V(I_i)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

donde N es el número total de puntos de la curva, N_{mp} es la cantidad de puntos utilizados para evaluar las diferencias en corriente y $N - N_{mp}$ es la cantidad de puntos utilizados para evaluar las diferencias en tensión. Los puntos de 1 a N_{mp} cubren la zona de la curva I - V desde la corriente de cortocircuito al punto de máxima potencia. El símbolo (^) indica los valores estimados por el modelo.

El primer espectro utilizado fue generado por una lámpara dicróica de 250W alimentada con una fuente de corriente continua estabilizada, a una intensidad equivalente de 1.367W/m^2 para una celda ATJ (intensidad equivalente es aquella que desarrolla la I_{CC} nominal de la celda para 1 Sol AM0 independientemente del espectro de la fuente). Las mediciones de las curvas I - V fueron realizadas utilizando un instrumento Keithley 2602A SMU (*source-meter unit*) utilizando el método de 4 puntas y con la temperatura de celda controlada mediante una base termostatzada a 28°C . Bajo estas condiciones fueron medidas las tres celdas isotipo y la triple juntura, y el modelo numérico de la curva I - V en oscuridad de las celdas *top* y *middle* fue obtenido mediante los pasos 2 y 3 del procedimiento detallado en la sección anterior. En la figura 4.7 se observa el arreglo experimental utilizado para realizar estas mediciones. Posteriormente, haciendo uso de los valores de I_{CC} de las celdas isotipo, fueron obtenidas las tres curvas I - V de las subceldas bajo iluminación (figura 4.8) y sumadas según el procedimiento para obtener la curva I - V modelada de la celda TJ. La figura 4.8 muestra también la

comparación entre las curvas $I-V$ predichas por el modelo numérico y la medición en la celda TJ. El espectro de la lámpara dicroica causa que la subcelda *middle* sea la que limita la corriente del conjunto, cosa que difiere del espectro solar AM0 en donde la subcelda limitante es la *top*. Sin embargo, el método propuesto reproduce la curva $I-V$ medida en la TJ y el error estimado en el punto de máxima potencia es del 1,6%, mientras que el error RMS resulta de 0,79%. Las curvas $I-V$ de las subceldas *top* y *middle* obtenidas con este espectro serán utilizadas a lo largo de este capítulo para modelar la curva $I-V$ de la celda TJ para los próximos escenarios espectrales (ver el paso 2 del método propuesto en la sección anterior).

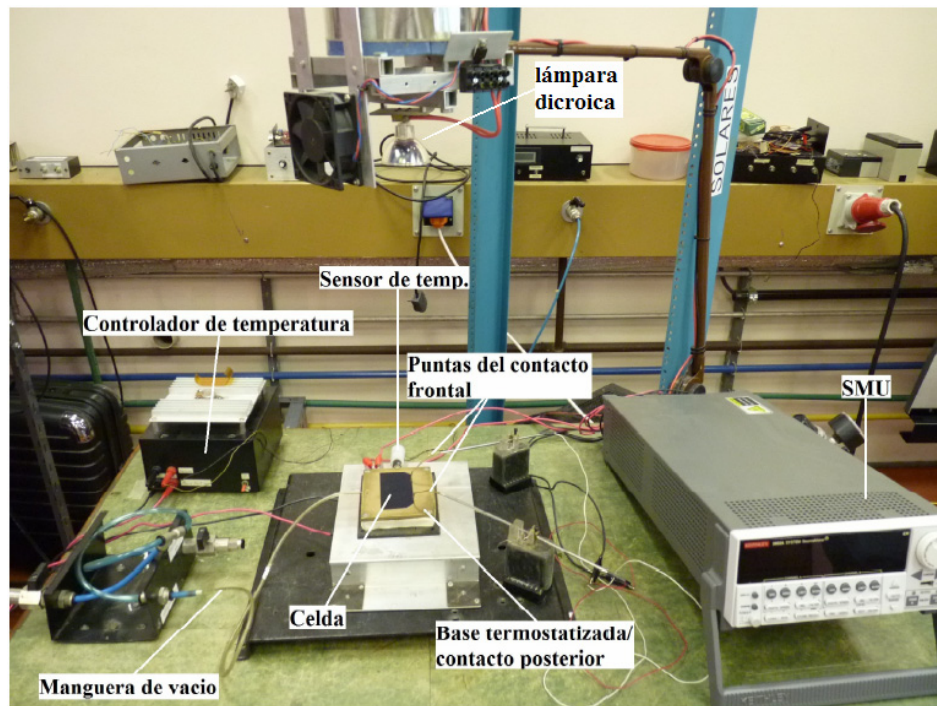


Figura 4.7. Arreglo experimental para la medición de $I-V$ de las celdas isotipo y la triple juntura utilizando como simulador solar una lámpara dicroica de 250W.

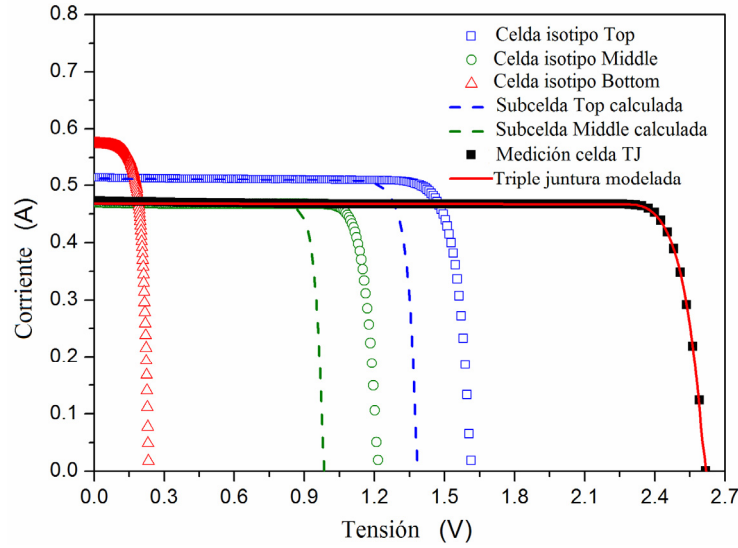


Figura 4.8. Curvas I - V medidas sobre las tres celdas isotipo (símbolos huecos), las celdas *top* y *middle* calculadas (líneas discontinuas), la curva I - V modelada y medida sobre la celda TJ también se muestra (puntos negros y línea continua respectivamente). Todas las mediciones fueron realizadas a 28°C con la lámpara dicróica.

En el segundo caso analizado, se utilizó el espectro del simulador solar TS-Space. Este simulador provee un espectro muy similar al estándar AM0 y en este caso la subcelda que limita la corriente del conjunto es la *top*, como se aprecia en la figura 4.9. La misma figura muestra la subcelda *bottom* generando alrededor del doble de fotocorriente que la *top* y la *middle*. Estas dos características indican que este espectro es bastante diferente comparado con el de la lámpara dicróica y por ende refleja una nueva condición para probar el método propuesto.

Haciendo uso de los valores de I_{CC} medidos para las tres celdas isotipo con este nuevo espectro y de acuerdo al paso 4 del procedimiento anterior, los valores de I_{CC} de las tres subceldas fueron fijados según estas mediciones. Mediante la suma de las tres nuevas curvas I - V de las subceldas se obtiene la predicción de la curva I - V de la celda TJ bajo el haz del simulador TS-Space (figura 4.9). A pesar de la gran diferencia espectral entre la lámpara dicróica y el simulador solar TS-Space, el modelo reproduce la curva I - V experimental. Además la estimación arroja una diferencia porcentual en el punto de máxima potencia de 1,3% respecto de la medida en el laboratorio, mientras que el error RMS es de 0,69%.

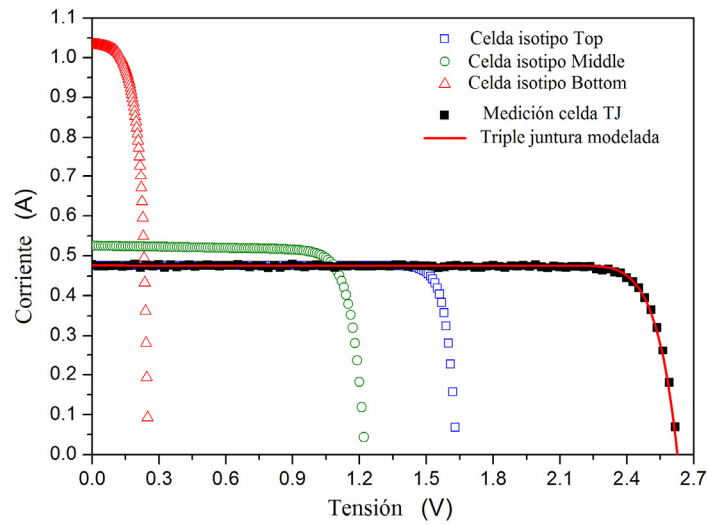


Figura 4.9. Curvas I - V de las celdas isotipo y de la TJ medidas bajo el espectro del simulador solar TS-Space. La curva modelada según el procedimiento propuesto también se muestra en el gráfico.

La tercera condición experimental para ensayar el método propuesto fue la de oscuridad. Esto significa que la corriente de cortocircuito usada para cada subcelda del modelo fue cero y las tres curvas I - V de las subceldas fueron sumadas directamente. El resultado se presenta en la figura 4.10 junto con la curva I - V experimental mostrando nuevamente un buen ajuste. En este caso no es factible obtener el error RMS dado que las corrientes de cortocircuito son nulas. En resumen, fueron considerados tres escenarios distintos de iluminación y los modelos numéricos estuvieron en muy buena correlación con las mediciones de la curva I - V de la TJ para cada uno de dichos escenarios, lo que da un buen grado de validación experimental del método propuesto.

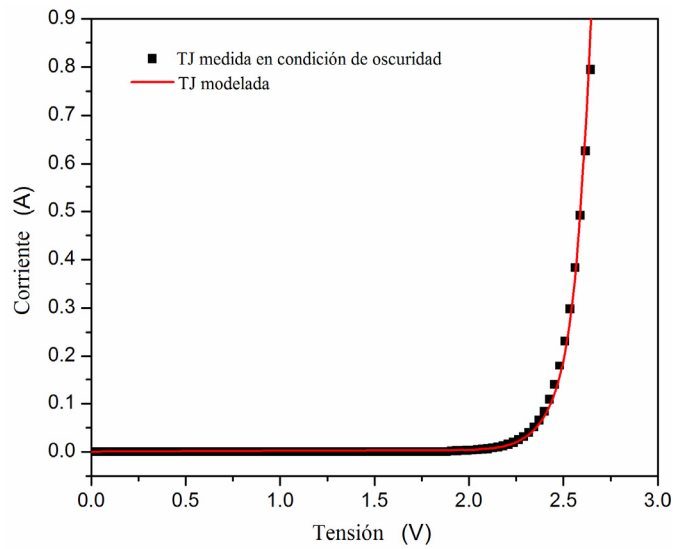


Figura 4.10. Comparación entre la curva I - V medida en oscuridad de la celda de triple junta y el resultado del modelo numérico bajo las mismas condiciones utilizando el método propuesto.

4.5.5 Utilización del método propuesto para el espectro de una lámpara de Xenón

En esta sección, el procedimiento anteriormente propuesto para la predicción de la característica I - V de una celda TJ es probado para el caso de un simulador solar pulsado. Esta clase de fuente de luz está basada en una lámpara de descarga de Xenón y representa un escenario notablemente diferente desde el punto de vista espectral. Asimismo, al ser una fuente de luz pulsada y no continua, se realizará el análisis dinámico correspondiente. Además este caso será particularmente utilizado para el análisis abordado en la sección 4.7, donde se simulará la curva I - V de un módulo de potencia del panel solar del satélite SAC-D/Aquarius.

Como se comentó en la sección 4.3, la lámpara de flash utilizada para este trabajo tiene un pulso rápido (menor que 1ms) y consecuentemente medir una curva I - V con un único disparo representaría una dificultad importante desde el punto de vista instrumental. Así, resulta necesario utilizar el método multiframe [5] donde la celda o módulo bajo medición se conecta a una carga variable que polariza al dispositivo desde cortocircuito a circuito abierto. Por cada condición de carga, se produce un disparo del flash y el pulso de tensión y corriente del dispositivo es capturado con un osciloscopio

(la corriente se calcula midiendo la caída de tensión a través de un resistor calibrado). Cada punto $I-V$ de la curva es medido tomando el valor máximo de los pulsos de tensión y corriente. Finalmente una celda de referencia de triple juntura calibrada es utilizada para monitorear la intensidad luminica de cada disparo, ya que es indispensable contar con disparos de la misma intensidad.

Como se observa en la figura 4.11, la forma de onda del pulso de tensión y corriente en una medición multiflash va cambiando a medida que cambia el estado de carga de la celda. Sucede que para estados de carga cercanos a cortocircuito (recta de carga roja en el gráfico), al ser lineal la corriente de la celda con la intensidad del pulso de luz, las formas de onda de los pulsos de tensión y corriente son similares a la forma de onda del pulso del flash. Para estados de carga cercanos a circuito abierto (recta de carga verde en el gráfico), la forma de onda de la señal de tensión y corriente se ensancha dado que la tensión que desarrolla una celda fotovoltaica en circuito abierto (o cercanías) es logarítmica con la irradiancia, como se mostró en la ecuación 2.11 del capítulo 2.

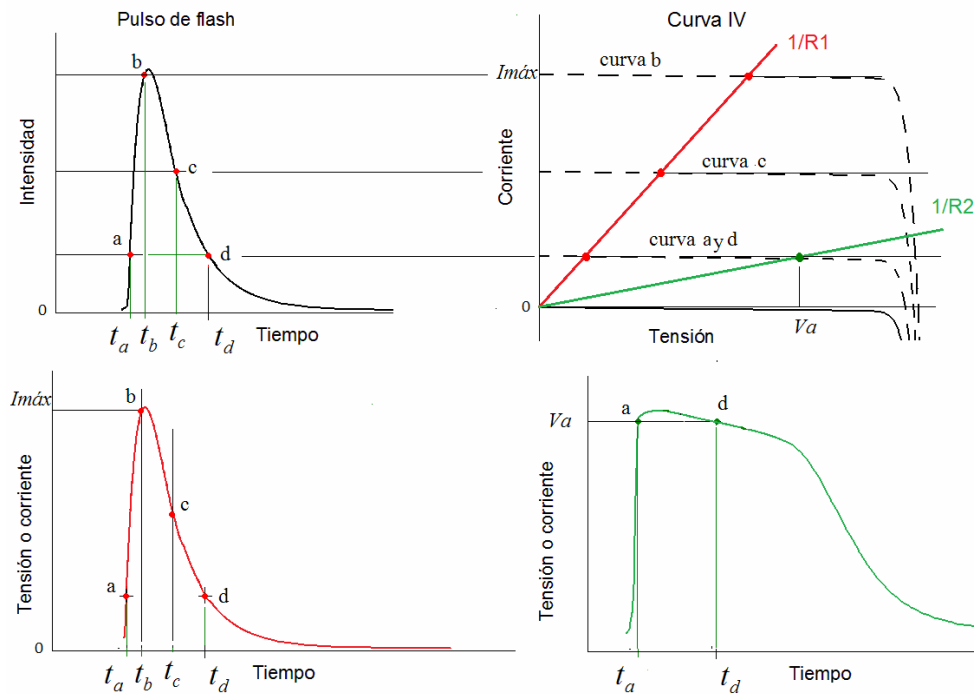


Figura 4.11. Formas de onda de tensión y corriente de una celda solar al ser iluminada con el pulso de flash para diferentes condiciones de carga. Las formas del pulso de tensión y corriente se obtienen mediante la proyección sobre los ejes V e I de la intersección de la curva $I-V$ a cada instante (curvas punteadas a , b , c y d) y la recta de carga impuesta por el resistor externo.

En nuestro caso, para la realización experimental utilizamos una lámpara de flash Philips 1500-W XOP-15-OF, un osciloscopio (Tektronix TDS 3054C) y varios resistores cubriendo el rango desde $0,75\Omega$ a 100Ω . En la figura 4.12 se muestran los pulsos de corriente de cortocircuito generados por las celdas isotipo cuando se iluminan con el flash en función del tiempo. Las tres mediciones muestran prácticamente la misma forma de onda, correspondiente a una descarga abrupta seguida de un decaimiento cuasi-exponencial. A fin de descartar corrimiento espectral, ocasionado por el enfriamiento del gas posterior a la descarga, en la zona de interés (el máximo del pulso de luz) las tres curvas de la figura 4.12 fueron normalizadas y comparadas. En la figura 4.13 se muestra dicha comparación.

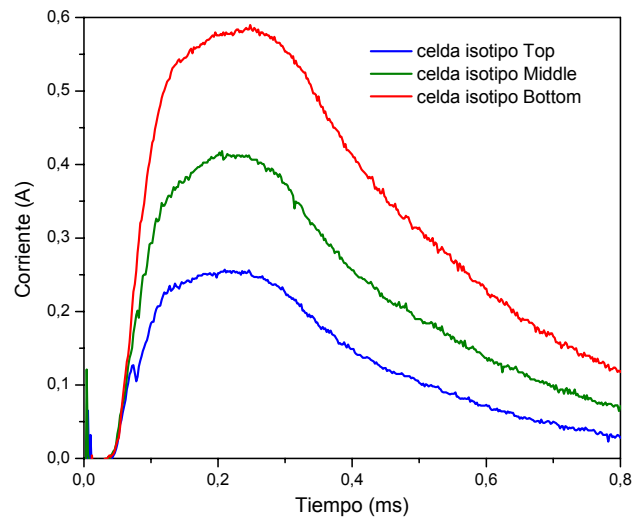


Figura 4.12. Pulsos de corriente en condición cercana a la de cortocircuito para las tres celdas isotipo bajo iluminación del flash

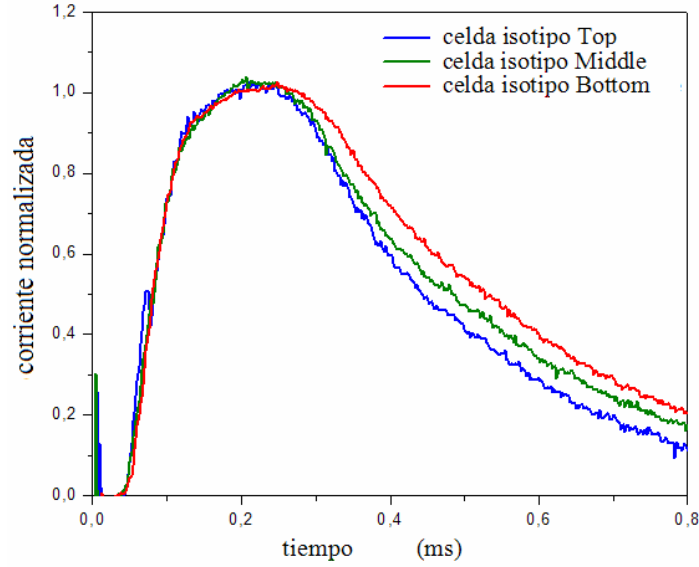


Figura 4.13. Pulsos de corriente de cortocircuito generados por las celdas isotipo normalizados. Se observa que durante el enfriamiento se separan las curvas evidenciando corrimiento espectral.

Como se aprecia, a pesar existir corrimiento espectral al momento del decaimiento del pulso (corrimiento del espectro al rojo por el enfriamiento del gas), este efecto no altera la posición de los máximos, los cuales se producen en forma simultánea. Se observa además que la forma de onda de la celda isotipo *top* presenta un pequeño sobreimpulso al momento del crecimiento del pulso: este efecto está relacionado con el comportamiento dinámico de la celda y será analizado en la próxima sección.

Finalmente, para aplicar el método propuesto en la sección anterior, los valores máximos de corriente alcanzados por cada celda isotipo bajo la descarga del flash son usados como valores de corriente de cortocircuito I_{CC} de cada subcelda para obtener la curva $I-V$ modelada de la celda de TJ.

Además, se realizó una estimación de la fotocorriente generada por cada subcelda utilizando la integración del espectro del flash (reportado por el fabricante de la lámpara) y la respuesta espectral calibrada de cada subcelda utilizando la ecuación (4.5). Por conveniencia se adoptaron valores relativos dividiendo todas las fotocorrientes por la correspondiente a la *top*. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.1 y, como era de esperar, estos valores calculados son consistentes con aquellos

que resultan de las mediciones en el laboratorio. Además, en la misma tabla se comparan estas proporciones con las obtenidas utilizando los valores de calibración de I_{CC} dados por el proveedor de las celdas para el espectro AM0. Estos valores sugieren que el espectro del flash produce una fotocorriente aproximadamente un 50% mayor para la subcelda *middle* y un 30% mayor para la subcelda *bottom* comparadas con el espectro AM0. Esto evidencia el mayor contenido relativo de luz roja e infrarroja del espectro de la lámpara de flash.

Subcelda	Flash		AM0
	Calculado	Medido	
Top	1	1	1
Middle	1.7	1.6±0.2	1.1
Bottom	2.4	2.4±0.2	1.9

Tabla 4.1. Valores normalizados de las corrientes fotogeneradas por cada subcelda isotipo bajo iluminación del flash, calculada utilizando (4.5) y medida en el laboratorio. Los obtenidos con la calibración para AM0 dados por el fabricante también se muestran como valores referencia.

En la figura 4.14 se muestra la curva $I-V$ de una celda TJ medida mediante la técnica multiflash y se la compara con la curva $I-V$ obtenida mediante la simulación del modelo numérico. Para el modelado, las proporciones entre las corrientes I_{CC} de las subceldas fueron tomadas de las curvas presentadas en la figura 4.12. Se observa que la curva modelada (línea continua) y la medición por multiflash (puntos discretos) muestran diferencias de 1,2% en el punto de máxima potencia y un error RMS de 0,84%, lo cual valida la aplicabilidad del modelo también para el caso de multiflash.

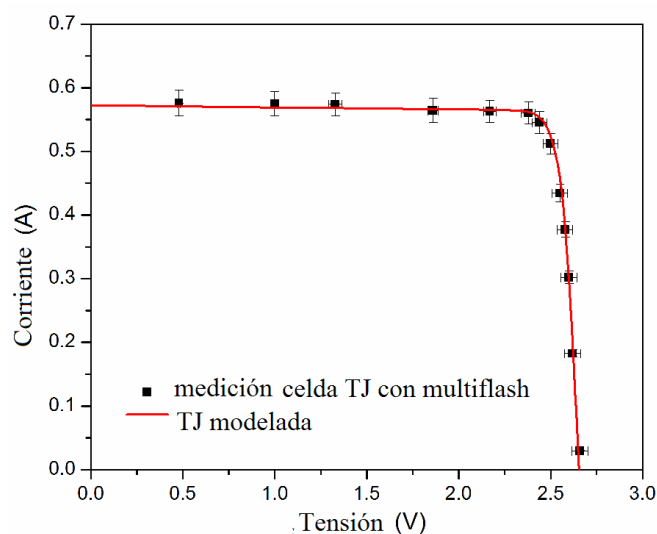


Figura 4.14. Curva I - V medida mediante multiflash vs. simulación numérica de una celda de triple junta utilizando el espectro del flash. Las barras de error corresponden a la incertidumbre en la medición con el osciloscopio. Se observa el buen ajuste que hay entre ambas curvas.

A modo ilustrativo, en la figura 4.15 se muestran las formas de onda del pulso de corriente generado por la celda de TJ para tres condiciones de carga distintas al aplicar multiflash: cortocircuito, circuito abierto y punto de máxima potencia. Dichas formas de onda obedecen a la descripción presentada anteriormente (figura 4.11); sus valores máximos son los que se utilizan para obtener cada par I - V de la curva.

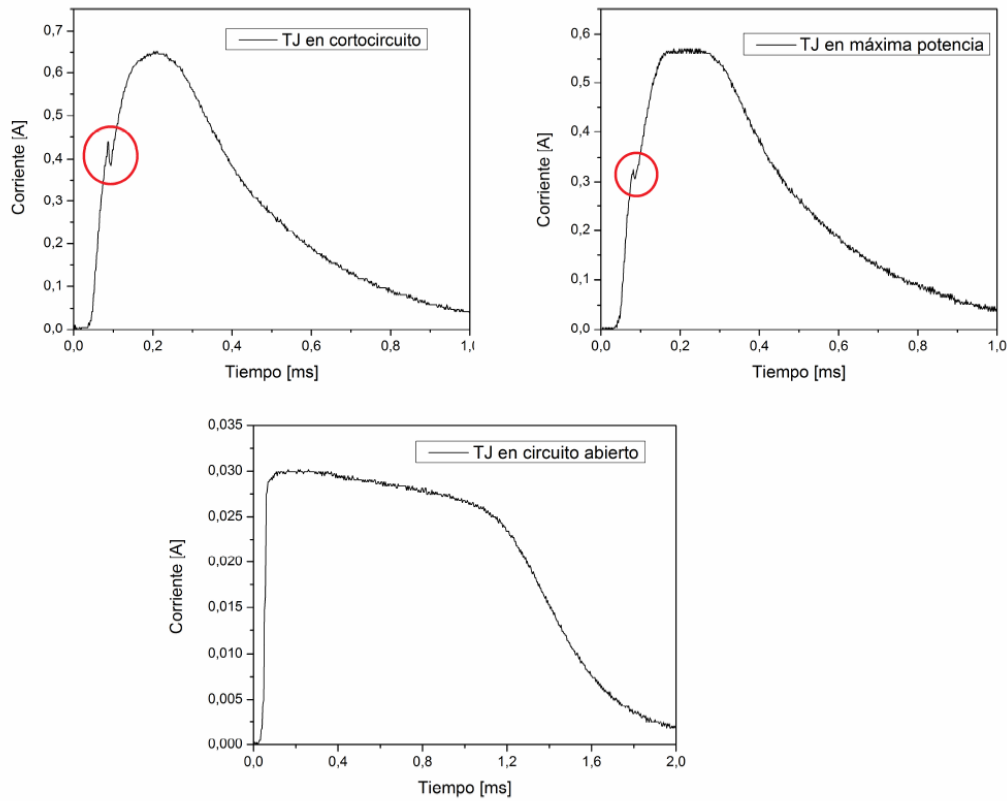


Figura 4.15. Pulsos de corriente capturados con el osciloscopio en la celda de TJ iluminada por el flash de Xe para condiciones cercanas a cortocircuito, máxima potencia y cercanías de circuito abierto al aplicar multiflash. Con círculo rojo se muestran sobre-impulsos anómalos que serán explicados en la próxima sección.

4.6 Modelo dinámico de una celda de triple junta

Al medir una celda o módulo FV con luz pulsada es necesario asegurarse que la duración del pulso de luz esté muy por encima del tiempo típico de respuesta del dispositivo bajo ensayo. Esto garantiza que la celda o módulo pueda seguir las variaciones de la intensidad del pulso de luz punto a punto y que por lo tanto se mantendrá una relación lineal entre intensidad del haz y corriente de cortocircuito a cada instante. Si ocurre esto cada par de puntos $I-V$ de la curva podría tomarse en

cualquier instante durante el pulso, aunque lo más práctico es trabajar siempre sobre el máximo por dos motivos, a saber:

- 1) en las cercanías del máximo la intensidad permanece constante o con poca variación un determinado tiempo
- 2) al utilizar la máxima intensidad del pulso, se puede ubicar a mayor distancia la fuente luminosa respecto al dispositivo, logrando así mayor homogeneidad lumínica sobre la superficie del módulo.

La gran mayoría de dispositivos FV de estado sólido poseen tiempos de respuesta típicos del orden del microsegundo, por lo que casi siempre satisfacen esta condición ya que la duración típica de una descarga de flash está en el orden del milisegundo. Pero, dependiendo del modelo de lámpara utilizada, es posible que la forma de onda del pulso sea una descarga rápida, por lo que la zona de intensidad constante (cercana al máximo) puede en algunos casos tener menos de $50\mu\text{s}$ de duración.

Por este motivo resulta importante explorar el comportamiento de una celda ATJ desde el punto de vista dinámico, para así establecer una cota superior de su tiempo de respuesta y poder evaluar si es compatible con la duración del pulso del flash. A tal fin se elaboró un modelo eléctrico que incorpora las capacidades de cada una de las junturas que componen una celda TJ y se establecieron con un cierto criterio valores máximos para dichas capacidades (dado que mayor capacidad implica un dispositivo más lento). De este modo se pueden realizar simulaciones considerando los casos más desfavorables.

Por ejemplo, en la sección anterior se mostró que la celda isotipo *top* mostraba cierto efecto dinámico (pequeño sobreimpulso, ver figura 4.12) que ocurría en la primera parte de la descarga, aproximadamente $70\mu\text{s}$ desde el inicio de la misma. Algunos estudios mostraron efectos similares, pero los autores no realizaron mención de ellos [7,14,15]. Para comprender el origen de los mismos, se realizaron simulaciones dinámicas utilizando el *software* PSpice de simulación de circuitos eléctricos [16]. El primer paso para estimar la capacidad de cada subcelda es la medición de curvas $C-V$ (capacidad en función de la tensión) de las celdas isotipo. El trabajo de Ruiz et al. [17] muestra que la capacidad de una celda multijuntura disminuye cuando está iluminada.

Pero dado que lo que necesitamos es obtener una cota superior para estos valores, las mediciones de capacidad en este trabajo fueron realizadas en condiciones de oscuridad. Las mediciones de $C-V$ fueron tomadas con un instrumento LCR Agilent E4980A y la frecuencia de medición fue seleccionada como la inversa del tiempo de típico de duración del pulso del flash (200 μ s), es decir 5 kHz.

La figura 4.16 muestra las curvas $C-V$ medidas para las tres celdas isotipo y para la celda de triple juntura. El comportamiento cualitativo de las 4 curvas es similar, mostrando un suave crecimiento seguido de una caída más pronunciada, tal como fuera reportado previamente [17,18].

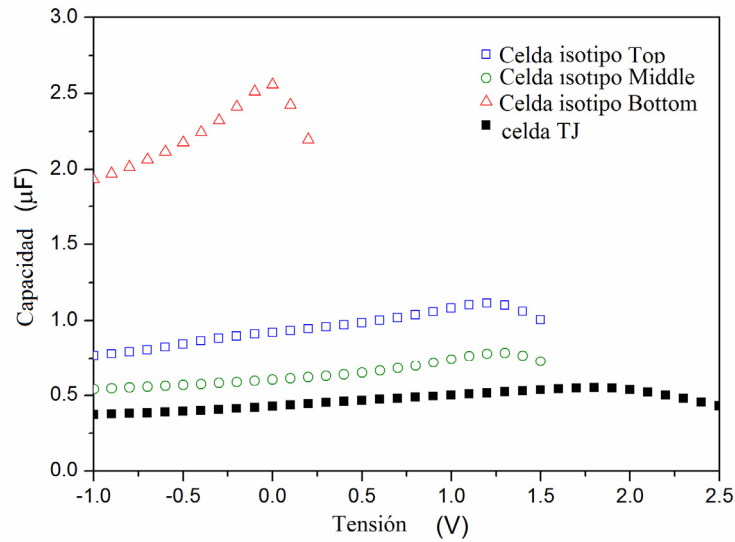


Figura 4.16. Curvas $C-V$ de las celdas isotipo y la celda de TJ (27 cm² de área). Las mediciones fueron realizadas a 5kHz en condiciones de oscuridad y a temperatura ambiente.

Como es sabido, dada la interconexión en serie de las subceldas componentes, la inversa de la capacidad de una celda multijuntura (C_{TJ}) es la suma de la inversa de la capacidad de cada subcelda (C_i)

$$\frac{1}{C_{TJ}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (4.8)$$

En particular, las celdas isotipo *top* y *middle* son doble juntura, por lo que sus respectivas capacidades están dadas por:

$$\frac{1}{C_{top\ isotype}} = \frac{1}{C_{top}} + \frac{1}{C_{bottom}} \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{C_{mid\ isotype}} = \frac{1}{C_{mid}} + \frac{1}{C_{bottom}} \quad (4.10)$$

Con el objeto de establecer un rango para los valores de capacidad de cada subcelda para el modelo dinámico de la triple juntura, se llevó a cabo el siguiente análisis: El valor máximo y mínimo para la subcelda de *Ge* se toma directamente de su medición de curva *C-V*. Para las capacidades de la *top* y la *middle* sus máximos valores son estimados considerando la mínima capacidad de la celda *bottom* y la capacidad máxima de las celdas isotipo, usando las ecuaciones (4.9) y (4.10). Finalmente, los valores mínimos de las capacidades para la *top* y *middle* se estiman considerando la máxima capacidad de la celda isotipo *bottom* y el valor mínimo de las capacidades de las otras celdas isotipo.

Los valores estimados de capacidad para la subcelda *InGaP* fueron de 1 μF a 2,6 μF , para la subcelda de *GaAs* 0,7 μF a 1,5 μF para la subcelda de *Ge* 1,9 μF a 2,5 μF (todas las celdas son de 27 cm^2 de área).

4.6.1 Simulación de la respuesta temporal de una celda TJ

Para realizar la simulación dinámica de la celda de triple juntura, se elaboró un modelo de celda de TJ considerando a cada subcelda como un diodo en paralelo con una capacidad. Este modelo desprecia los efectos de las dos junturas túnel sumado a que las capacidades son consideradas fijas (no cambian con la tensión de juntura como comúnmente sucede). Los modelos numéricos de las subceldas *top*, *middle* y *bottom* obtenidos en la sección 4.5.3 (es decir sus curvas *I-V* en oscuridad) fueron introducidos como curvas de los diodos en el circuito equivalente del PSpice. En la fig. 4.17 se muestra el circuito eléctrico equivalente de la celda de triple juntura que incluye las capacidades y los diodos recientemente mencionados.

Para simular el pulso del flash en el modelo de PSpice, la forma de onda de la corriente de cortocircuito de una pequeña celda de silicio fue capturada utilizando el flash y posteriormente introducida en el circuito equivalente. De este modo, los fotogeneradores de corriente del modelo (I_{top} , I_{mid} e I_{bot}) tienen la misma evolución temporal que el pulso lumínico del flash.

Las mediciones fueron comparadas con las simulaciones para diferentes condiciones de carga: cortocircuito (CC), punto de máxima potencia (MP) y circuito abierto, a una intensidad apenas superior a 1 sol AM0 (figuras 4.18a, 4.18c y 4.18d respectivamente) y otra simulación para cortocircuito con una intensidad levemente superior al 50% de 1 sol AM0 (figura 4.18b)

Primero las simulaciones fueron realizadas con los valores mínimos de capacidades obtenidos anteriormente $C_{top}=1\mu\text{F}$, $C_{mid}=0,7\mu\text{F}$ y $C_{bot}=1,9\mu\text{F}$. Con estos valores, la posición temporal del sobreimpulso simulado es menor comparada con la de cortocircuito. Por este motivo, los valores de capacidad en la simulación se fueron cambiando entre los límites establecidos anteriormente con el fin de ajustar ambas formas de onda.

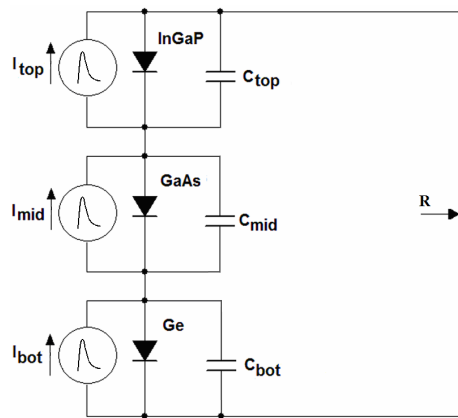


Figura 4.17. Circuito equivalente de una celda de triple juntura utilizada para las simulaciones dinámicas.

Finalmente, fue obtenida una buena correlación para todas las condiciones de carga con los siguientes valores: $C_{top}=3\mu\text{F}$, $C_{mid}=2\mu\text{F}$ y $C_{bot}=1,9\mu\text{F}$, que además son

consistentes con los hallados a través de las mediciones de $C-V$. Además, los resultados de las simulaciones mostraron ser sensibles a los valores de capacidad de las subceldas *top* y *middle* e independientes del valor de capacidad de la *bottom*. En particular, para los dos casos de cortocircuito (figuras 4.18b y 4.18c) las simulaciones ajustan muy bien las curvas experimentales incluyendo el efecto dinámico observado. Además se llevaron a cabo simulaciones sin capacidades y dicho fenómeno no se manifestó, lo cual evidencia que este efecto dinámico es debido a los efectos capacitivos de las subceldas cuando la celda es iluminada con un pulso rápido de flash. Si asumimos que cada subcelda tiene asociado un capacitor en paralelo con cierta carga inicial al momento del disparo del flash cada subcelda generará cierto pulso de corriente y los capacitores comenzarán a cambiar su carga. Durante un período de tiempo muy corto, mientras la intensidad del pulso está creciendo, la fotocorriente generada por las dos subceldas que generan la mayor corriente circulará a través de la capacidad de la subcelda que limita la corriente (en nuestro caso la *top*). Como resultado, la celda TJ puede entregar una corriente significativamente mayor a través del circuito externo durante un pequeño intervalo de tiempo. Cuando el capacitor asociado a la celda *top* termina su proceso de carga, la corriente a través del mismo se detiene y la corriente de la celda TJ experimenta una caída alcanzando el valor de la corriente fotogenerada por la subcelda *top*.

Comparaciones similares entre las curvas simuladas y experimentales fueron realizadas en el punto de máxima potencia y circuito abierto y se muestran en las figuras 4.18c y 4.18d. Para el caso de máxima potencia el sobreimpulso también se observa, pero el efecto aparece disminuido. En este caso la simulación no ajusta del todo bien la posición temporal del sobreimpulso, probablemente debido al uso de capacidades fijas en lugar de dependientes del voltaje. Para el caso de circuito abierto las capacidades de las subceldas afectan el decaimiento de la señal haciéndolo más lento y las simulaciones también reproducen este efecto. Debido a esto, el método propuesto por Keogh et al. [5] que utiliza el decaimiento del pulso para la medición de $I-V$ podría introducir ciertos errores asociados al régimen transitorio en el intervalo entre el punto de máxima potencia y circuito abierto.

Por último, las simulaciones mostraron que la duración de este efecto está dominada por la capacidad de la subelda *top*, que limita la corriente del tándem. Esto coincide con la explicación anterior sobre las causas del sobreimpulso transitorio.

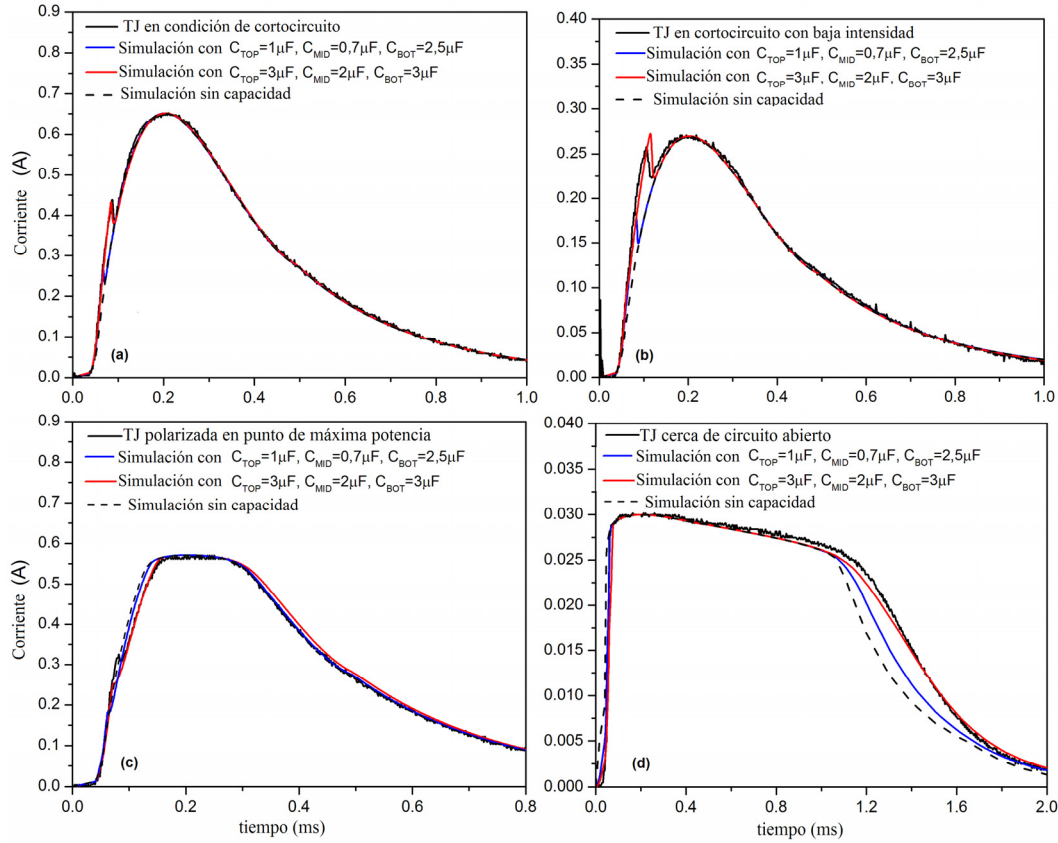


Figura 4.18. Pulsos de corriente de la celda TJ para diferentes condiciones de carga; (a) cortocircuito (CC) con intensidad levemente superior a 1367W/m^2 , (b) cortocircuito con una irradiancia aproximada a 700W/m^2 (c) máxima potencia (MP) y (d) cercanías de circuito abierto. Las simulaciones se realizaron con el modelo de PSpice mostrado en la figura 4.17 con diferentes valores de capacidad.

En cualquier caso, estos efectos transitorios son más rápidos que la duración del máximo del pulso de luz e indican que la celda TJ puede seguir las variaciones lumínicas del haz. En conclusión, estos efectos no alteran las mediciones realizadas con el método multiflash para este tipo de lámpara. Además se realizó una validación mediante simulaciones transitorias y de estado estacionario utilizando el modelo generado en PSpice. Para el caso de régimen estacionario, fue considerado el mismo

modelo de la celda y los generadores de corriente se reemplazaron por generadores de corriente continua. Con estos cambios se simuló un barrido en continua (*DC sweep*) y se obtuvo la curva I - V de la celda TJ. Los resultados de esta simulación se muestran en la figura 4.19. Ambos gráficos correspondientes a régimen continuo y transitorio ajustan perfectamente para todas las condiciones de carga e indican que no hay errores asociados a efectos transitorios durante la medición con un flash de 100 μ s de duración de pico. Este resultado además valida las mediciones I - V con el método multiflash (figura 4.15) en donde no se observaron diferencias entre el modelo continuo y las mediciones.

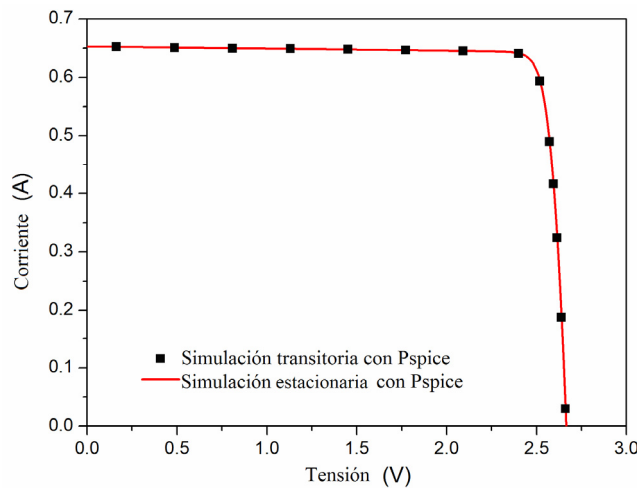


Figura 4.19. Barrido en corriente continua (*DC sweep*) del modelo de la celda triple junta a través del PSpice y puntos I - V discretos obtenidos considerando los valores pico de tensión y corriente en cada simulación transitoria para diferentes condiciones de carga.

4.7 Simulación de un módulo de potencia del satélite SAC-D

Una vez que el análisis dinámico aseguró el estado pseudo estacionario durante el máximo del pulso del flash, fue llevada a cabo una simulación final considerando la configuración de un módulo de potencia del panel solar del satélite SAC-D. En la figura 4.20 se muestra uno de los dos paneles solares de la misión SAC-D/Aquarius compuesto por 12 módulos FV de 108Wp cada uno. Un módulo solar del SAC-D (50cm x 75cm) está compuesto por seis cadenas de celdas en paralelo, llevando cada cadena 18

celdas conectadas en serie más un diodo de bloqueo [19]. La curva $I-V$ de un diodo de bloqueo fue medida a fin de introducirla en la simulación. Primero se realizaron simulaciones de la curva $I-V$ de la celda TJ con los valores de corriente generados por el flash. La tensión de la cadena se obtuvo multiplicando por 18 el eje X de dicha curva y posteriormente la característica $I-V$ del diodo de bloqueo se sustrajo de la curva $I-V$ de la cadena. Finalmente, para alcanzar la corriente del módulo es necesario multiplicar la corriente de la cadena por seis. El método aplicado asume que hay un alto grado de homogeneidad en los parámetros eléctricos de las celdas que conforman el módulo. De hecho, este es el caso, como se muestra en [20,21]. La curva simulada fue comparada con la verificación eléctrica realizada en varios módulos del panel solar del satélite SAC-D/Aquarius. Dichas verificaciones eléctricas fueron realizadas con la lámpara comercial de flash mencionada anteriormente y a la temperatura ambiente del laboratorio, controlada a 22°C, como se describe en ref. [19]

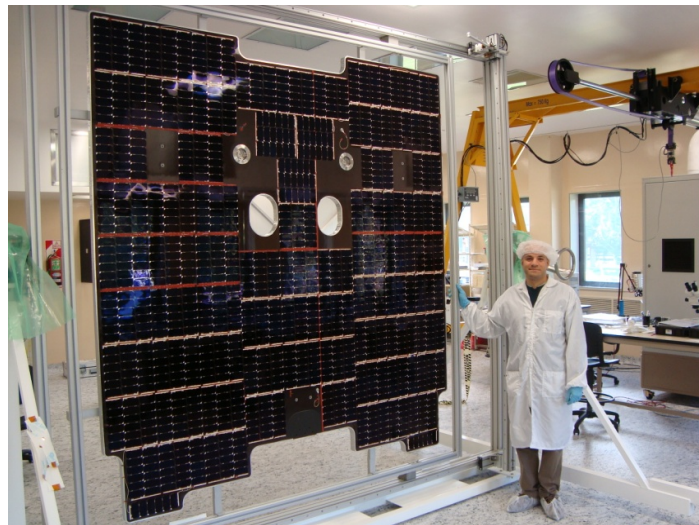


Figura 4.20. Panel solar de la misión Aquarius/SAC-D, se aprecian los grupos de 18 celdas formando las cadenas de los módulos FV.

Debido a la resistencia serie de los cables que conectan las cadenas de celdas y módulos, las resistencias parásitas de las soldaduras y teniendo en cuenta que el osciloscopio utilizado es un instrumento de 3 puntas en lugar de 4, fue necesario introducir una pequeña resistencia serie adicional para ajustar las simulaciones con la medición experimental. Todos los efectos relacionados con resistencias serie se

condensaron en una única resistencia por cada celda de aproximadamente 0,1ohm. Además, fueron necesarias correcciones por temperatura dado que las mediciones en el laboratorio se llevaron a cabo a 22°C y el modelo de la triple junta fue elaborado utilizando mediciones realizadas a 28°C, como se mencionara oportunamente.

La figura 4.21 muestra la simulación de un módulo de potencia del SAC-D bajo el espectro del flash y la medición experimental realizada sobre el módulo. También se presenta en la figura la simulación del módulo para espectro AM0 utilizando el método propuesto y considerando la resistencia serie. Se observa que la curva simulada utilizando el modelo numérico para el caso del flash está en buen acuerdo con la curva experimental, mientras que la simulación del mismo módulo considerando el espectro AM0 muestra algunas diferencias menores, aunque evidentes. Las diferencias porcentuales en el punto de máxima potencia entre una y otra y de la V_{ca} medida con el método multflash versus el estándar AM0 son +2% y +0,7% respectivamente.

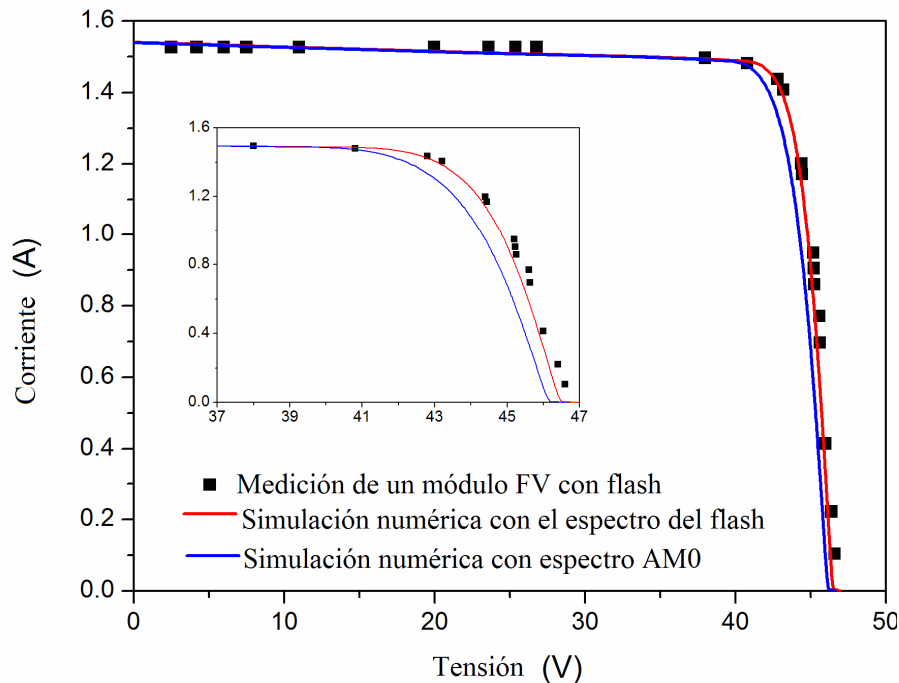


Figura 4.21. Simulaciones de un módulo de potencia considerando condiciones de espectro AM0 y espectro del flash. También se muestra la medición correspondiente a la verificación eléctrica utilizando multflash.

4.8 Conclusiones

En este capítulo se desarrolló un método para determinar la curva $I-V$ de una celda solar de triple juntura para un espectro de iluminación arbitrario basado en la medición de tres celdas isotipo calibradas. El mismo fue validado para condiciones de oscuridad y tres escenarios diferentes de iluminación: lámpara dicróica, un simulador solar *close math AMO* y una lámpara comercial de flash. En todos estos casos las simulaciones han mostrado una buena correlación con las curvas $I-V$ medidas de la celda de triple juntura para cada caso. Además, se realizó un extenso análisis dinámico para descartar la posibilidad de errores originados en fenómenos transitorios cuando un pulso rápido de flash es utilizado como fuente de luz para medir la curva $I-V$ de un dispositivo FV. Se realizaron mediciones de capacidad en función de la tensión ($C-V$) de las celdas isotipo a fin de poder estimar los valores de capacidad de cada subcelda y se introdujeron en un modelo dinámico de la celda de triple juntura con el objeto de realizar simulaciones con el *software* PSpice. Los pequeños sobreimpulsos de corriente a través del circuito externo que se observaron fueron explicados con el modelo eléctrico de la celda TJ en términos de corrientes transitorias fluyendo a través de las capacidades de las subceldas que limitan la corriente de la TJ. A pesar de este efecto y como conclusión final, los posibles errores asociados a efectos transitorios cuando se utiliza un pulso rápido como el analizado en este capítulo en la medición de curva $I-V$ no tienen implicancia para el caso tratado en este trabajo (celdas ATJ Emcore para 100 μ s de pico de flash)

Los resultados de las verificaciones eléctricas en los módulos de los paneles solares del SAC-D/Aquarius realizadas bajo un espectro no estándar, fueron interpretados en términos del modelo desarrollado en este trabajo. En este caso, el comportamiento bajo iluminación de una celda de triple juntura fue evaluado para el espectro de la lámpara de Xe. Además, considerando las correcciones apropiadas por temperatura y la estimación de una resistencia serie del módulo completo (debido al cableado y soldaduras) la curva $I-V$ de un módulo solar simulado fue correctamente ajustada con la verificación experimental llevada a cabo en la campaña de calificación de los paneles solares.

Los resultados obtenidos demostraron que las diferencias observadas entre las simulaciones utilizando condiciones estándar (1 sol AM0) y las mediciones sobre los módulos realizadas con un simulador fuera de estándar (lámpara de flash) se originan en las diferencias entre espectros de iluminación. La estimación de los errores mostraron para el caso de punto de máxima potencia una diferencia de +2% y +0,7% para V_{ca} , ambas mayores a los valores estimados utilizando el modelo numérico para AM0. Esto significa que el uso de esta clase de iluminación es una buena herramienta para la estimación de generación de potencia de un módulo. Finalmente el resultado de este trabajo puede ser utilizado para el correcto dimensionamiento de sistemas electrónicos pulsados en los cuales la electrónica asociada a los módulos FV debe considerar efectos transitorios debido al tiempo de respuesta de las celdas solares.

4.9 Referencias

1. ASTM E490 - 00a (2014) Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables.
2. ASTM E1036-96 Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells
3. Norma IRAM210013-2,1998. Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas.
4. ECSS-E-ST-20-08C – European Cooperation for Space Standardization “Photovoltaic assemblies and components” (July 2012)
5. W.M. Keogh, A.W. Blakers, A. Cuevas. Constant voltage I-V curve flash tester for solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 81, 183 (2004).
6. S.R. Kurtz, K. Emery, J.M. Olson. Methods for analysis of two-junction, two-terminal photovoltaic devices. *Proceedings of the 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawai, EE.UU., 1733 (1994).*
7. C. Dominguez, I. Antón, G. Sala. Multijunction solar cell model for translating I-V characteristics as a function of irradiance, spectrum, and cell temperature. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18, 272 (2010)

8. H.A. Ossenbrink, W. Zaiman, J. Bishop. Do multi-flash solar simulators measure the wrong fill factor?. Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, 1194 (1993).
9. M. Seapan, C. Limsakul, T. Chayavanich, K. Kirtikara, N. Chayavanich, D. Chenvidhya. Effects of dynamic parameters on measurements of IV curve. Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1, (2008).
10. J.J. Sturbecher, J.C. Larue. The mini-flasher: a solar array test system. Solar Energy Materials and Solar Cells 36, 91 (1994).
11. S. H. Lim, J.J. Li, E.H. Steenberg and Y.H. Zhang. Luminescence coupling effects on multijunction solar cell external quantum efficiency measurement. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 13, 344 (2013).
12. K. Nishioka, T. Sueto, M. Uchida, Y. Ota. Detailed Analysis of Temperature Characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell. Journal of Electronic Materials 39, 704 (2010).
13. Y. Tsuno , Y. Hishikawa, K. Kurokawa. Translation equations for temperature and irradiation of I-V curves of various PV cells and modules. Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, EE.UU., 2246 (2006).
14. J. Hohl-Ebinger, G. Siefert, W. Warta. Measuring the spectral distribution of a flash simulator. Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italia, 425 (2007).
15. T. Roth, J. Hohl-Ebinger, D. Grote , E. Schmich , W. Warta , S.W. Glunz , R.A. Sinton. Illumination-induced errors associated with suns-Voc measurements of silicon solar cells. Review of Scientific Instruments 80, 033106 (2009).
16. L. Castaner, S. Silvestre. Modelling photovoltaic systems using PSpice. Wiley: New York, 2003.
17. C.M. Ruiz, I. Rey-Stolle, I. Garcia, E. Barrigon, P. Espinet, E. Saucedo, V. Bermudez, C. Algara. Application of capacitance-based techniques to the characterization of multijunction solar cells. Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, 1600 (2009).

18. C.M. Ruiz, I. Rey-Stolle, I. Garcia, E. Barrigon, P. Espinet, V. Bermudez, C. Algora. Capacitance measurements for subcell characterization in multijunction solar cells. Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, 708 (2010).
19. M. Alurralde et al.. Flight Model for Aquarius/SAC-D satellite mission. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Alemania, 695 (2009).
20. E.M. Godfrin, D. Fernández Slezak, G. Berbeglia, J. Durán. Design and simulation of the power subsystems for two argentine satellites. Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italia, 692 (2007).
21. E.M. Godfrin , J. Plá , J.C. Durán. Statistical comparative analysis of the electrical parameters of CIC assemblies for Aquarius/SAC-D satellite mission. Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, España, 849 (2010).

Capítulo 5

Fabricación de dispositivos Fotovoltaicos para uso espacial

5.1 Introducción

Como fuera mencionado en los capítulos anteriores, el DES de la CNEA cuenta con un laboratorio de integración de paneles solares para uso espacial (denominado *clean room*, figura 5.1) en el cual se fabricaron los paneles solares de la misión SAC-D/Aquarius y en la actualidad están siendo integrados los paneles para las misiones SAOCOM 1A y 1B. Dicho laboratorio es de clase 10.000 [1, 2] con temperatura y humedad controladas y tiene 220m² de superficie.

En este capítulo se describirán algunas de las tareas concernientes a la integración eléctrica de un panel solar para uso espacial, y los componentes utilizados en cada caso con sus respectivas funciones. Se describirán además las tareas de fabricación e integración eléctrica de sensores solares de posición basados en celdas solares de *Si*. Dichos sensores, junto con los interconectores de celdas, y buses de conexión, son componentes que se fabrican íntegramente dentro del DES. Por último, se presentará la utilización de los sensores en diferentes misiones espaciales y sus características eléctricas, particularmente la corriente en función del ángulo de incidencia. El autor de este trabajo, miembro del área de ingeniería del DES ha participado activamente, y continúa haciéndolo, en las tareas de integración y medición eléctrica de los paneles solares de las misiones mencionadas más arriba.



Figura 5.1. Vista interior del laboratorio de integración de paneles solares para uso espacial del DES.

5.2 Integración eléctrica de un panel para uso espacial

5.2.1 Componentes utilizados

Como fuera descrito en el capítulo 4, desde el punto de vista eléctrico, un panel solar de uso espacial está compuesto por una determinada cantidad de módulos FV. A su vez, cada módulo FV está compuesto por la conexión en serie y paralelo de celdas solares en una determinada configuración. Comúnmente, se conectan tantas celdas en serie hasta alcanzar el valor de tensión de diseño del sistema, formando lo que se conoce como cadena (*string*) de celdas. Posteriormente, se colocan tantas cadenas en paralelo como sean necesarias para alcanzar la corriente requerida por el módulo. Para que esta interconexión en paralelo sea factible es necesario introducir en serie con cada cadena de celdas un diodo de bloqueo que sirve para bloquear un eventual drenaje de corriente de una cadena hacia otra.

A fin de evitar puntos calientes [3] producidos por el sombreado de alguna o varias celdas o bien para evitar la pérdida de una cadena completa en caso de que una celda se dañe y abra el circuito eléctrico, se coloca en paralelo con cada una de las celdas un diodo denominado diodo de paso. En cualquiera de las dos situaciones recientemente mencionadas el diodo de paso garantizará en todo momento la continuidad del circuito eléctrico.

Por otro lado, es deseable contar con información de las condiciones de funcionamiento de algunos dispositivos utilizados en los satélites, en el caso particular de los paneles solares se suelen incorporar sensores de temperatura en sectores donde se considere crítico conocer la temperatura de operación de las celdas. En las misiones SAC-D y SAOCOM se han utilizado como sensores de temperatura termorresistencias de platino (PT2000) ya que su resistividad es lineal con la temperatura en el rango de interés.

Al mismo tiempo, dado que los paneles solares sustentan una cierta superficie determinada por los requerimientos de potencia de la misión, se cargan electrostáticamente al recibir partículas cargadas provenientes del Sol o del cinturón de radiación que rodea a la Tierra. A fin de mantener equipotencial las partes activas de los circuitos del satélite con los generadores fotovoltaicos, y así evitar descargas electrostáticas potencialmente perjudiciales, se utilizan resistores de descarga conocidos como *bleeder resistors*.

Por último y como se verá pronto en este capítulo, los paneles solares para aplicaciones espaciales llevan incorporados sensores solares de posición, los cuales sirven al control de actitud al proveer información acerca de la orientación de los paneles fotovoltaicos con respecto al Sol. En la figura 5.2 se esquematiza la secuencia de los procesos involucrados en la integración de los componentes de vuelo para la fabricación de los paneles solares.

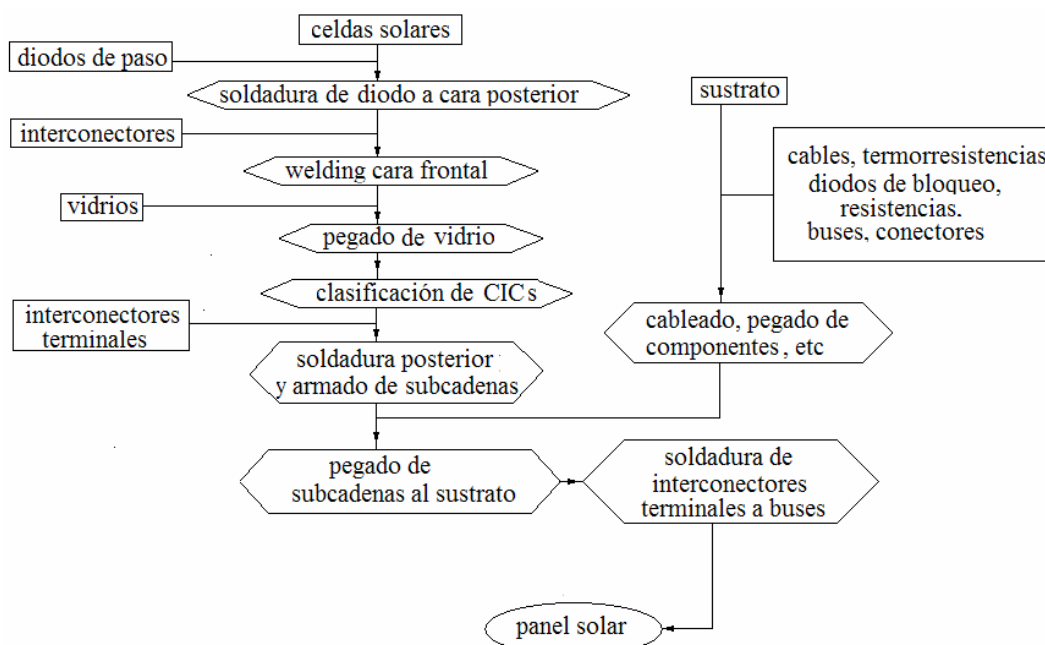


Figura 5.2. Esquema de los procesos involucrados en la integración de un panel solar.

Todos los componentes recientemente mencionados van montados sobre un soporte rígido, denominado sustrato del panel, el cual generalmente está compuesto por dos caras paralelas de laminado de fibra de carbono conteniendo en su interior una estructura de aluminio denominada panel de abeja (*honeycomb*). Esta combinación hace que se logre una estructura muy rígida y extremadamente liviana. En las misiones SAC-D y SAOCOM, estos sustratos fueron laminados y ensamblados por INVAP SE, para posteriormente ser utilizados en el DES para la integración de los paneles solares. Por último, para aislar eléctricamente el sustrato y el circuito de potencia (es decir, las partes activas del panel solar) se pega un film aislante sobre la capa de fibra de carbono frontal. De este modo, todas las cadenas de celdas son pegadas sobre este aislante. En las misiones SAC-D y SAOCOM se utilizó Kapton® para tal fin .

5.2.2 Fabricación de interconectores plateados

Para la conexión de celdas solares en serie se utilizan interconectores metálicos de Kovar plateados de 25µm de espesor (el Kovar es una aleación de hierro, níquel y cobalto). Entre los requerimientos más importantes que deben cumplir se destacan sus propiedades eléctricas y mecánicas. Por un lado, el interconector debe tener su

superficie apta para el correcto soldado con la cara frontal y posterior de la celda solar. Para ello es necesario que esté plateado a fin de tener las mismas propiedades que los contactos de las celdas (que son esencialmente de plata). Desde el punto de vista mecánico, el Kovar es uno de los materiales más apropiados dado que tiene una elevada resistencia a la fatiga. El interconector debe tener además un lazo de alivio con el fin de absorber la sollicitación mecánica entre celdas al dilatarse/contraerse el sustrato del panel solar debido a los ciclos térmicos. Dichos ciclos térmicos son consecuencia de los eclipses que sufre el satélite al pasar por la sombra de la Tierra durante su vida útil en órbita. En las figuras 5.3 c) y d) se aprecia un interconector de Kovar plateado desarrollado íntegramente en el DES, el proceso de plateado mediante electrólisis (figura 5.3 a)) y la matriz de corte de interconectores (figura 5.3 b)).

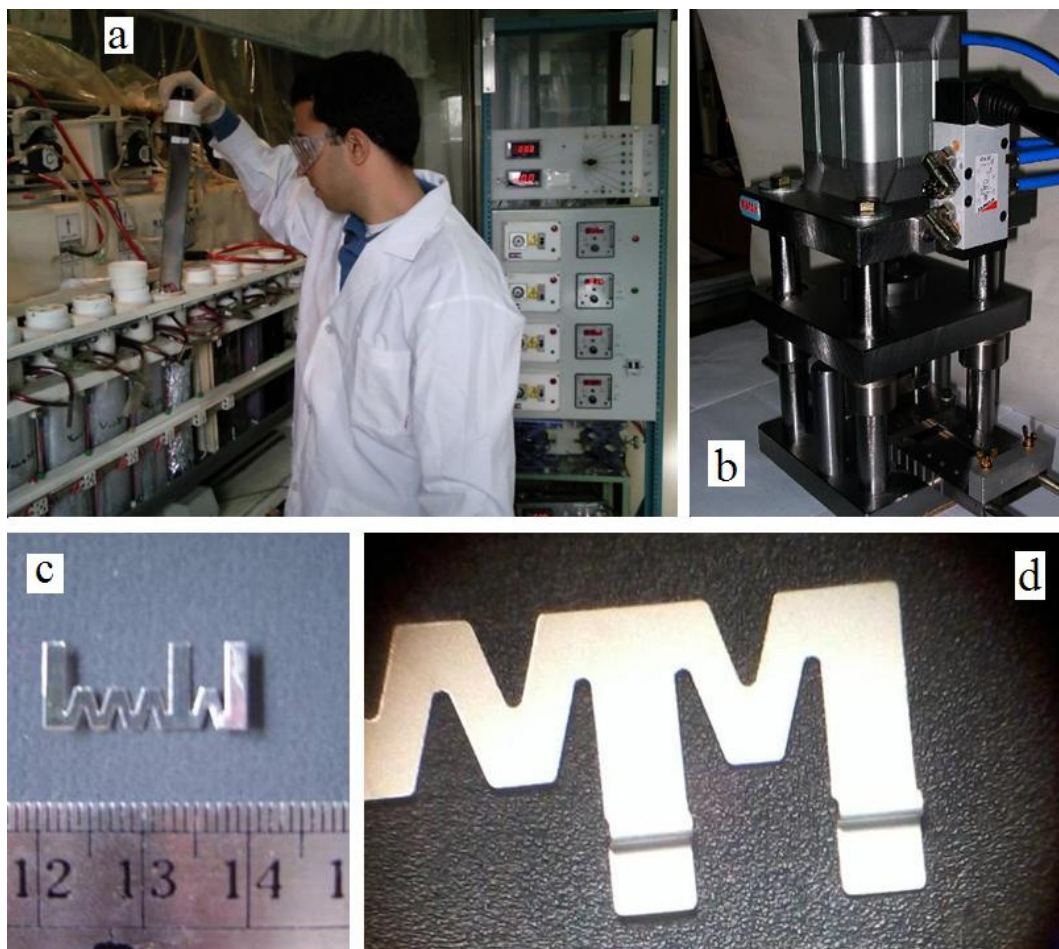


Figura 5.3. a) Cubas electrolíticas para el plateado de cintas de Kovar; b) matriz de corte de interconectores; c) dimensión del interconector de Kovar; d) lazo de alivio

Los procesos más destacados en la elaboración del interconector son:

- Plateado de la cinta de Kovar: se realiza mediante una deposición electrolítica de una bicapa de Ni-Ag sobre cintas de Kovar de 250mm de largo x 38mm de ancho y 25μm de espesor. Este proceso debe garantizar una excelente adherencia entre la plata y el Kovar a fin de evitar desprendimiento.
- Corte de la tira de Kovar: se realiza a través de una matriz de corte con punzón especialmente desarrollada para esta aplicación.
- Conformado del lazo de alivio, que se realiza a través de otra matriz; este proceso no debe dañar el baño de plata sobre el interconector.

5.2.3 Celdas CIC

El encapsulado de las celdas espaciales se diferencia de los módulos para uso terrestre debido a que las primeras no son agredidas por las condiciones climáticas tales como humedad, granizo, polvo ambiental, entre otros. Por otra parte, deben soportar alta intensidad de radiación ultravioleta, sufren degradación por partículas cargadas y su peso debe ser el menor posible. Es por ello que cada celda se encapsula en forma individual mediante un vidrio protector muy delgado (100μm de espesor) dopado con cerio para prevenir el oscurecimiento del mismo.

La denominación CIC (*covered and interconnected cell*) se utiliza para denominar a las celdas en el estado de integración dado por la soldadura de los interconectores frontales, del diodo de paso, y el pegado del vidrio sobre la cara frontal. El vidrio, que a su vez tiene una capa antirreflectante, además provee adaptación entre los índices de refracción del aire y del semiconductor mejorando de este modo las características de la interfase, disminuyendo así las pérdidas por reflexión como parte de la multicapa antirreflectante. La soldadura del interconector a la cara frontal se realiza mediante la técnica de soldadura por resistencia con electrodos paralelos (*resistance parallel gap welding*). Dicha soldadura debe asegurar un óptimo contacto eléctrico junto con una resistencia mecánica adecuada para las severas condiciones que se producen durante el despegue y la operación en órbita. En la figuras 5.4 y 5.5 se aprecia

el proceso de soldado de los interconectores de la cara frontal en una de las estaciones de trabajo y una bandeja conteniendo celdas CICs ya integradas.



Figura 5.4. Estaciones de soldado de interconectores a las celdas mediante *welding* y *soldering* (soldadura frontal y posterior respectivamente)

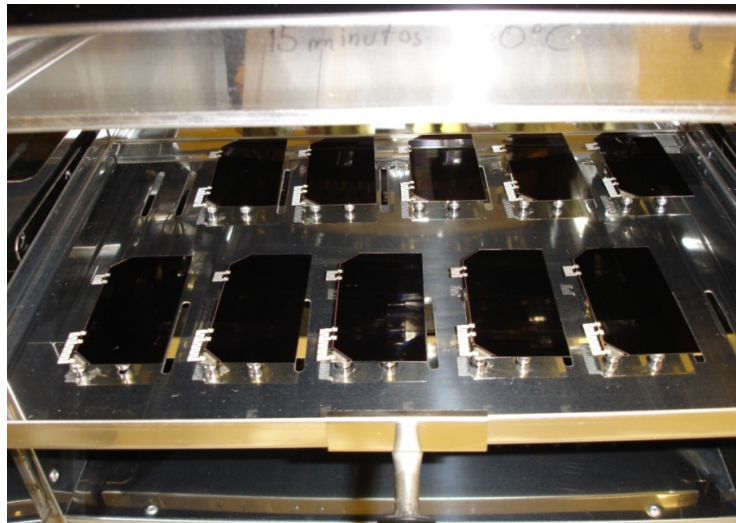


Figura 5.5. Celdas CIC con los interconectores frontales, el diodo de paso y el vidrio cobertor integrados previo al proceso de recocido del adhesivo.

5.2.4 Armado de cadenas y pegado sobre el sustrato

Para alcanzar la tensión de *bus* de una misión satelital se requieren sistemas alimentación de varias decenas de volts. Por ejemplo, en el caso del SAC-D la tensión de los módulos FV era de 41V en el punto de máxima potencia. Para la misión

SAOCOM dicha tensión de *bus* será de 74V. Esto implica que son necesarias 18 celdas de triple juntura conectadas en serie en el primer caso y 32 en el segundo. Para integrar una cadena sobre el sustrato la misma se fracciona en subcadenas para posibilitar su manipulación. Así, en los paneles del SAC-D una cadena de 18 celdas está compuesta por tres subcadenas de 6 celdas en serie. De este modo, se armaron cadenas de 6 celdas y luego de ser pegadas al panel se interconectaron entre sí mediante “buses de conexión” para obtener la cadena de 18 celdas.

Para el armado de las cadenas de celdas, se colocan las mismas en una base metálica diseñada especialmente que ya trae incorporadas las posiciones de cada una (figura 5.6). La soldadura en la cara posterior en este proceso se realiza mediante *soldering* (con aporte de aleación de estaño, plomo y plata fundida)

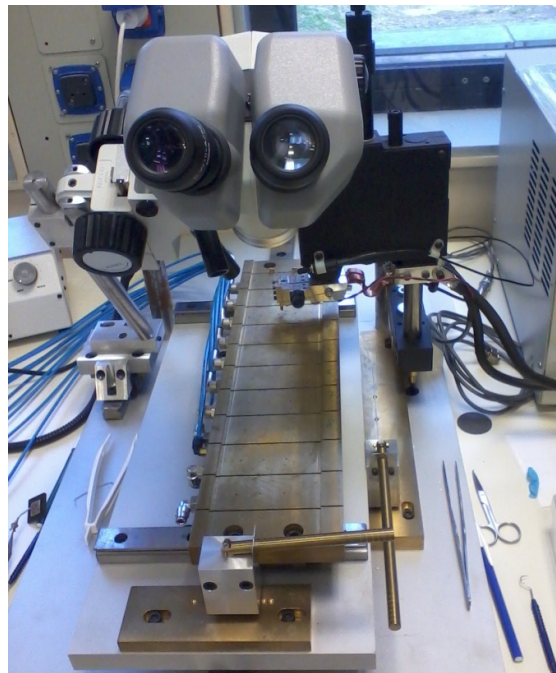


Figura 5.6. Posicionador de celdas CICs para la soldadura del interconector en la cara posterior para el armado de cadenas de celdas.

5.2.5 Cableado

Mientras que la cara frontal de un panel FV está prácticamente en su totalidad cubierta por celdas solares, sobre la cara posterior del panel se realiza el cableado. Los buses de interconexión terminales (positivo y negativo de la cadena de celdas) llevan

soldado un cable que inmediatamente pasa del otro lado del panel a través de un orificio hecho para tal fin. De este modo, la cara frontal carece prácticamente de cables. En la cara posterior se realiza todo el conexionado, en nuestro caso mediante el pegado de las denominadas “chapas concentradoras”, que sirven para conectar en paralelo las cadenas de celdas incluyendo también los diodos de bloqueo a fin de completar los módulos. Cabe aclarar que tanto los buses de interconexión como las chapas concentradoras se fabrican con el mismo material utilizado para los interconectores descrito anteriormente. Finalmente cada módulo FV es conectado al conector del panel mediante cableado redundado, por lo que se utilizan dos cables para llevar el terminal positivo y dos para el terminal negativo. Con el fin de minimizar el momento dipolar magnético generado por la corriente en los cables de los módulos, se realiza el trenzado de a pares de cables con sentidos de circulación de corriente contraria [4]. En las figuras 5.7 y 5.8 se aprecian detalles del cableado en la cara posterior de los paneles solares del SAC-D y SAOCOM 1A respectivamente.

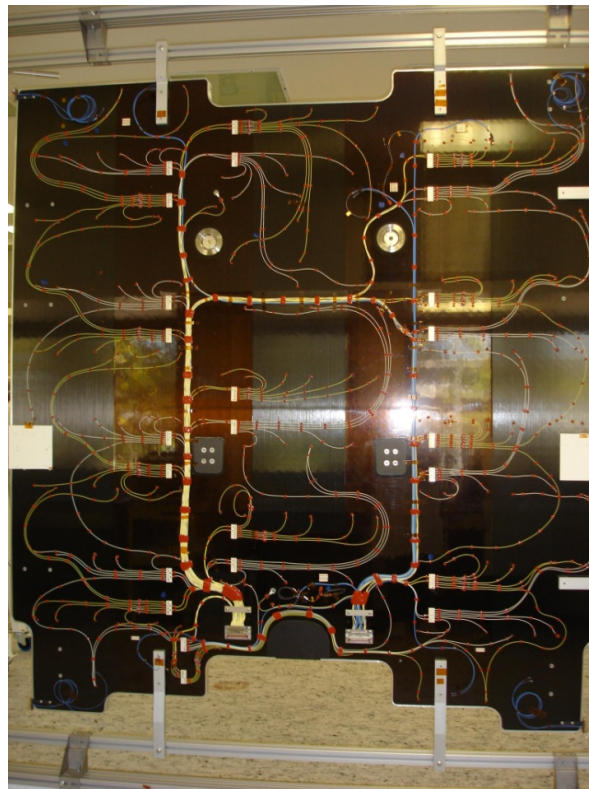
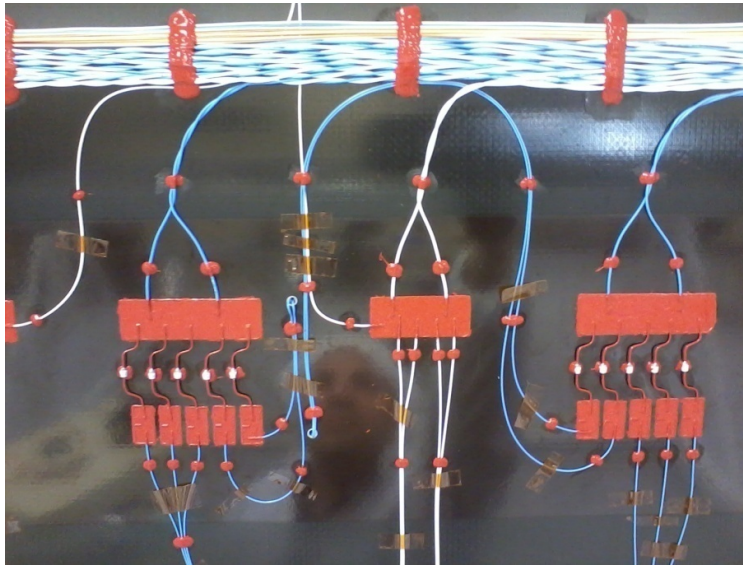


Figura 5.7. Cableado del lado posterior de un panel solar del satélite SAC-D.



***Figura 5.8.** Cableado del lado posterior de un panel solar del satélite SAOCOM 1A, donde se aprecian los diodos de bloqueo soldados sobre las chapas concentradoras. En rojo se ve el adhesivo (RTV) sobre las superficies de plata para su protección.*

5.3 Elaboración y caracterización de sensores solares gruesos de posición para aplicaciones espaciales

En esta sección se describirá la utilización de celdas solares de silicio cristalino como sensores solares gruesos de posición para aeronaves. Los mismos se fabrican, integran y ensayan en el Departamento de Energía Solar de la CNEA. Se describirá también su caracterización y utilización en las misiones espaciales Aquarius/SAC-D, el vector brasileño VS-30, y el satélite Amazonia I, siendo estas dos últimas colaboraciones con la agencia espacial brasileña [5].

5.3.1 Introducción

Las celdas solares fotovoltaicas pueden también ser utilizadas como sensores de posición para satélites y cohetes. Esto es factible debido a que la corriente eléctrica que una celda solar genera (en condiciones de cortocircuito) es lineal con la intensidad de la luz que recibe. Si consideramos que la superficie del sensor es perfectamente plana, la corriente de cortocircuito seguirá la ley del coseno al variar el ángulo de incidencia de la luz solar con respecto a la normal de la superficie del sensor. De este modo, a partir de la lectura de una corriente eléctrica es posible determinar el ángulo de llegada de la luz solar con respecto al sensor, y mediante el uso de arreglos de sensores orientados con

una geometría particular es posible determinar la orientación de una aeronave con respecto al Sol y por ende a cualquier sistema de referencia. En la figura 5.9 se aprecia un sensor típico de Si de 50mm² de área efectiva en su última etapa de integración.

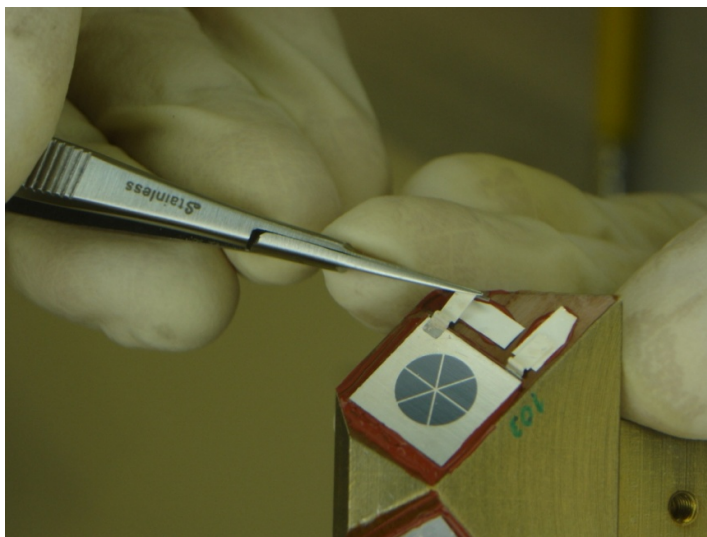


Figura 5.9. Sensor de Si con sus conectores soldados y vidrio pegado, montado en su base.

Los sensores de posición están hechos con pequeñas celdas solares de Si monocristalino y son fabricados íntegramente en el Laboratorio Fotovoltaico del DES. El proceso de fabricación abarca la difusión del dopante (en nuestro caso fósforo) utilizando un horno de difusión térmica e incluye los procesos de fotolitografía, evaporación y engrosamiento electrolítico de los contactos metálicos frontal y posterior. En una segunda etapa se realizan la soldadura de los interconectores y el pegado de un vidrio protector.

5.3.2 Experiencias en vuelo de sensores desarrollados en el DES

Los sensores solares de posición descriptos han sido utilizados en diferentes misiones espaciales al día de hoy, en todos los casos provistos por el DES de la CNEA. A continuación se repasarán sus misiones de aplicación.

Proyecto Aquarius/SAC-D

Los paneles solares de la misión SAC-D [6] llevaban un total de 12 sensores solares gruesos de posición en sus extremos (figura 5.10) a fin de tener redundancia en

la información para la orientación del satélite con respecto al Sol. Estos sensores formaban un sistema de orientación secundario y su telemetría sirvió para obtener conclusiones sobre la generación de energía prevista de los paneles en la órbita heliosincrónica como así también datos del albedo presente en la órbita [7].

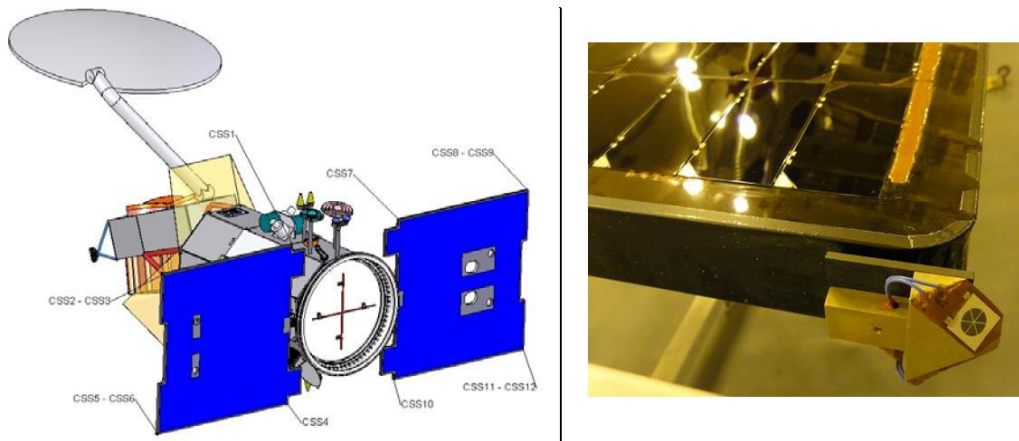


Figura 5.10. Izq.: ubicación de los 12 sensores solares en los paneles del satélite SAC-D. Der.: sensor de posición montado en la esquina de uno de los paneles de vuelo del SAC-D. Se observa su particular orientación con respecto al plano del panel.

Proyecto AMAZONIA I

En el marco de un contrato suscripto entre INVAP S.E. de Argentina y el INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales) de Brasil se proveyeron a la primera empresa 22 sensores solares gruesos de posición, caracterizados y ensayados para ser integrados en el satélite brasileño Amazonia I [8]. Se trata de los mismos sensores solares gruesos que se utilizaron en la misión SAC-D, por lo que su caracterización y ensayo, como se mencionará en la próxima sección, fueron los mismos que los realizados sobre los sensores del satélite SAC-D.

Proyecto carga útil VS-30

El VS30 fue un vector lanzado por Brasil y Argentina el 16 de diciembre de 2007. Fue la primera misión espacial conjunta entre estos dos países. Dentro del acuerdo específico con Brasil referente a lanzamientos suborbitales firmado en 1998, se desarrolló el Proyecto carga útil VS-30 [9] que consistió en la realización de un

experimento de ensayo de validación ambiental de una carga útil tecnológica no propulsada argentina, utilizando como vehículo un cohete-sonda brasileño VS-30. El objetivo del proyecto fue validar, en una prueba de vuelo sub-orbital, el desempeño del *hardware* y *software* de un sistema integrado de navegación (receptor GPS-unidad de mediciones inerciales-computadora asociada) y un sistema de control de actitud utilizando toberas de gas frío. La carga útil también incluyó un experimento brasileño de microgravedad. En la figura 5.11 se observa el vector con los arreglos de sensores montados sobre el exterior del mismo.



Figura 5.11. Cohete VS-30 durante la integración del mismo. Se observan sobre la franja amarilla dos de los arreglos de sensores de posición provistos por el DES para la orientación de la aeronave.

5.3.3 Caracterización I_{cc} vs ángulo de sensores

Una vez fabricados, los sensores de posición deben someterse a diversas mediciones y ensayos. Las mediciones, que son básicamente de índole eléctrica, comprenden la medición de su curva $I-V$ a irradiancia AM0, medición de su corriente de

cortocircuito (I_{cc}) en función del ángulo de incidencia de la luz y medición de respuesta espectral. Los ensayos que se realizan sobre los sensores ya encapsulados o integrados consisten básicamente en ensayos ambientales, tales como ciclado térmico, termovacío, vibraciones y daño por radiación por protones, este último realizado en el acelerador de partículas Tandem del CAC-CNEA [10].

En esta sección nos enfocaremos principalmente en la evaluación de la corriente de cortocircuito de un sensor en función del ángulo de incidencia de la luz a temperatura ambiente.

5.3.3.1 Medición de I_{cc} vs ángulo de incidencia.

Se dijo anteriormente que la corriente de cortocircuito de una celda solar en función del ángulo de incidencia de un haz lumínico sigue idealmente la ley del coseno. En la práctica, dado que la reflectividad de la superficie del sensor depende del ángulo de incidencia de la luz suelen producirse algunos apartamientos del comportamiento del sensor con respecto a esta ley. Este efecto es incluso más notable si se incorporan vidrios de protección y encapsulamiento para proteger al sensor del ambiente (sobre todo para ángulos de incidencia rasantes) como se verá en las próximas secciones.

Es por eso que previo a su utilización como sensores de posición, los sensores una vez encapsulados deben ser contrastados y calibrados con respecto a una curva coseno para su posterior corrección en el sistema de control de posición.

Para ello se realiza en el laboratorio el ensayo de medición de la corriente de cortocircuito en función del ángulo de incidencia de un haz lumínico, el cual consiste básicamente en montar un sensor en posición vertical sobre una plataforma rotante e iluminarlo con una fuente de intensidad y espectro apropiado (figura 5.12). Se efectúa entonces un barrido en ángulo de $\pm 90^\circ$ con respecto a incidencia normal y se grafica I_{cc} vs ángulo de incidencia.

Algunas apreciaciones que se deben tener en cuenta relacionadas al alcance en exactitud de estas técnicas son que el Sol no es una fuente de luz puntual, sino que visto desde la Tierra tiene un tamaño angular de $0,5^\circ$, y por lo tanto sus rayos luminosos tienen una dirección levemente convergente hacia un objeto en la Tierra. Esto hace en

primera instancia que este método no sea sensible a cambios en ángulos del orden de $0,5^\circ$.



Figura 5.12. Sensor de posición montado sobre el disco rotante graduado; la resolución de posición del cursor es de $0,5^\circ$.

Otra consideración a la hora de ensayar los sensores en el laboratorio, es que se debe contar con una fuente de luz que sostenga un tamaño angular de $0,5^\circ$. Generalmente los simuladores solares que se utilizan para la medición de celdas solares distan mucho de parecerse a fuentes puntuales, dado que su objeto es la de proveer una determinada intensidad y homogeneidad lumínica en una determinada área plana sin importar mucho la dirección de arribo del haz lumínico. Como ejemplo, la norma ASTM E927 [11] establece un límite de $\pm 30^\circ$ para simuladores solares comerciales, ya que no contemplan este tipo de aplicaciones.

Para estas mediciones en particular, fue necesario modificar el simulador solar Sciencetech SS1kW disponible en el DES para tener un haz lo más colimado posible. Dichos cambios se observan en la figura 5.13 y consisten básicamente en la colocación de una lente convergente de 20cm de foco a la salida del haz del simulador. Se realizaron estimaciones del tamaño aparente de la fuente, según la convergencia de los

haces (mediante evaluación de sombras) y se concluyó que el sistema proveía de un haz de intensidad apropiada, es decir 1367W/m^2 de irradiancia, y de 2° de convergencia desde la fuente. Lamentablemente el ajuste de estos dos parámetros es interdependiente ya que al aumentar la distancia entre la fuente y la muestra, la intensidad disminuye y el tamaño aparente de la fuente también. Como resultado de este ajuste se logró una fuente con la intensidad solar AM0 con cuatro veces el tamaño aparente del sol, por lo que los resultados de las mediciones están inevitablemente acoplados a este efecto.



Figura 5.13. Simulador solar Sciencetech SS1kW con haz de salida acondicionado mediante una lente convergente; la fuente de luz sostiene un tamaño aparente de 2° .

5.3.3.2 Medición de sensores solares para el vector VS-30

En esta misión se utilizaron arreglos de dos sensores de silicio de 7mm^2 de área y de $3,4\text{mA}$ de I_{cc} nominal para una intensidad de 1 sol AM0. Los mismos se montaron en la parte exterior del cohete, por lo que requirieron ser encapsulados adecuadamente. Para ello se integraron dentro de un módulo de vidrio dos sensores con la disposición de V invertida separados 8mm entre sí como se aprecia en la figura 5.14. El cohete llevó en el exterior cuatro de estos módulos para cubrir una visión de 360° , lo que permitía tener siempre cuatro sensores iluminados. Por tal motivo, la caracterización incluyó la medición al mismo tiempo de la corriente I_{cc} de los dos sensores involucrados en el

arreglo, cuyo ángulo de desfase era de 55° (es decir el ángulo complementario al interno de la V invertida).

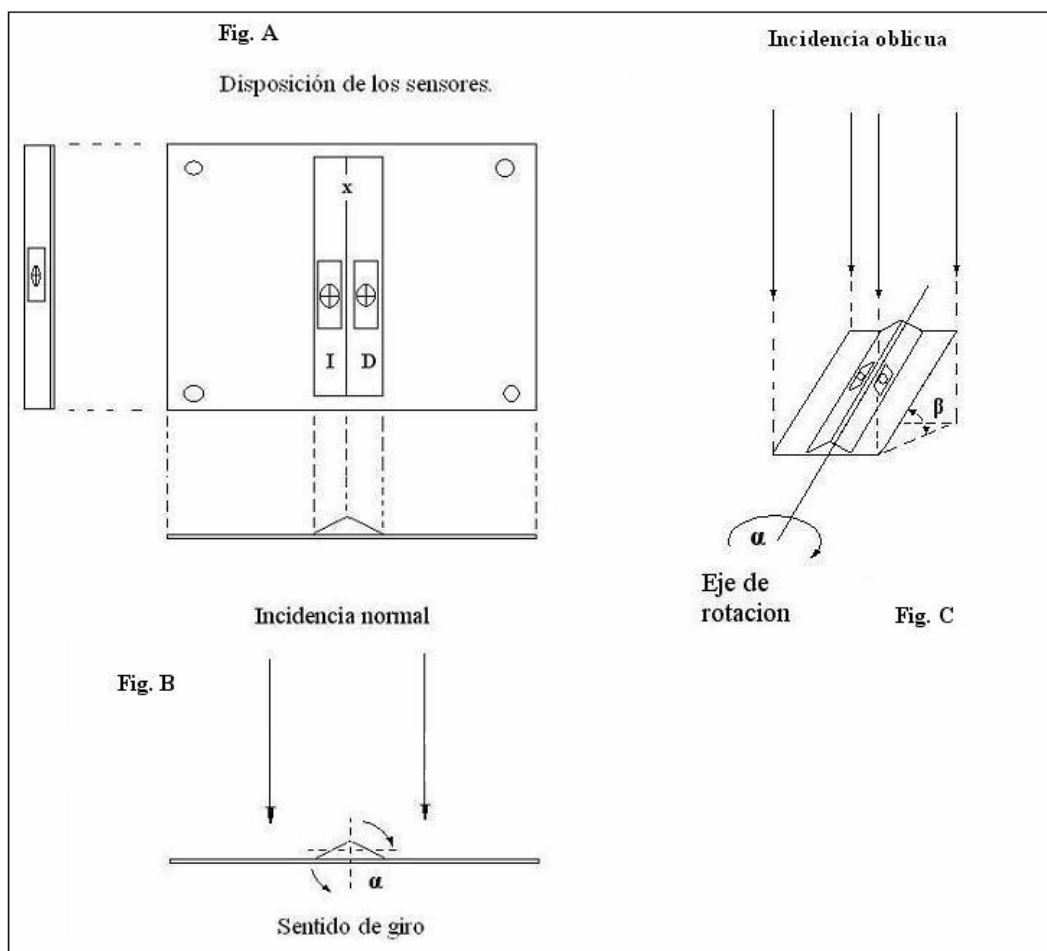


Figura 5.14. Montaje del arreglo de sensores de posición del VS-30

Para medir la corriente fotogenerada por los sensores, se utilizó un resistor de bajo valor a fin de poner a la celda cerca de corto circuito. El valor de calibración del resistor utilizado fue $1\Omega \pm 0,5\%$, y la caída de tensión sobre el mismo se midió con millivoltímetro Hewlett Packard modelo HP974. De esta manera todos los valores de corriente obtenidos estaban en mA. El *setup* completo estaba compuesto por un simulador solar clase B de la firma Sciencetech modelo SS1kW (con filtro AM0 a la salida del simulador) mencionado en la sección anterior y un plato divisor con 360 graduaciones. Dado que la separación entre sensores era de 8mm, se verificó que la homogeneidad lumínica dentro de esa zona fuera constante.

Se realizaron dos ensayos, uno con incidencia normal al arreglo y otro con un ángulo $\beta=54^\circ$ adoptado para incidencia oblicua (ver figura 5.14c). En la figura 5.15 se muestran los resultados de las mediciones

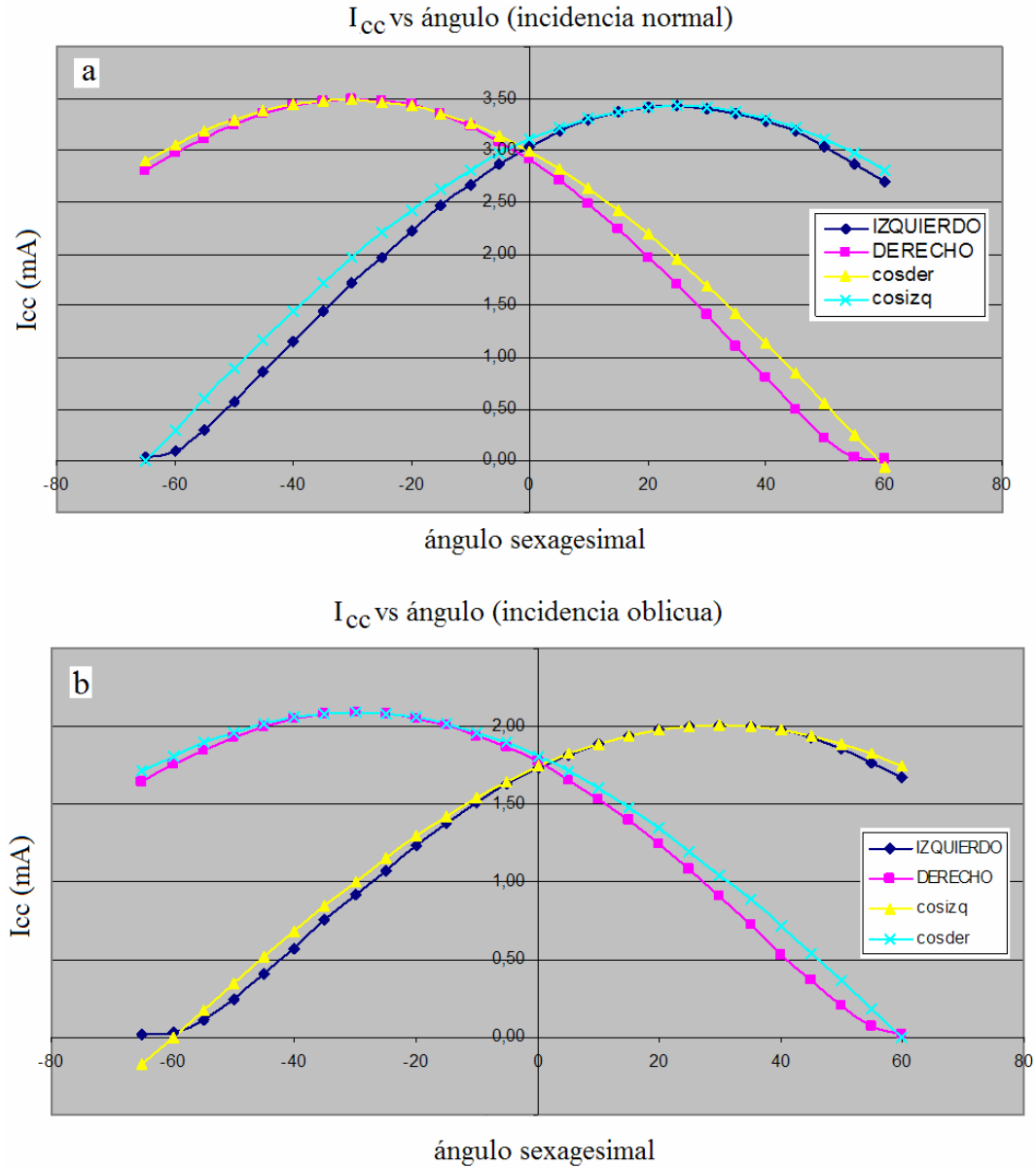


Figura 5.15 a) Medición de I_{cc} vs ángulo de un par de sensores de posición montados sobre el arreglo de la fig. 15 (incidencia normal). **b)** I_{cc} vs ángulo del mismo arreglo con incidencia oblicua. Se muestra también el valor del coseno teórico para ambos casos.

De las figuras 5.15 a) y 5.15 b) se desprende que la influencia del ángulo β es, como era de esperar, prácticamente despreciable, modificando solamente la corriente máxima alcanzada por el conjunto, es decir $I_{cc\beta} = I_{cc} \cdot \cos(\beta)$.

5.3.3.3 Sensores solares para las misiones Aquarius/SAC-D y AMAZONIA I

Los sensores solares gruesos utilizados en estas misiones fueron también de *Si* monocristalino, en este caso de 50mm² de área efectiva como el mostrado en la figura 5.9 (el área efectiva es la superficie de silicio expuesta a la luz). La corriente de corto circuito nominal para estos sensores es de 17mA a incidencia normal con intensidad de 1 sol AM0.

Los sensores utilizados en el marco de los proyectos Aquarius/SAC-D y Amazonia I fueron caracterizados en forma independiente y se realizó un barrido de $\pm 90^\circ$ con respecto a la normal al sensor.

Como la temperatura del ensayo fue estipulada en 23°C, para desarrollar la medición el haz de luz se obstruyó manualmente para evitar el incremento de temperatura sobre la muestra. La intensidad del simulador fue ajustada para 1 sol AM0 sobre el plano del sensor. Además se colocó sobre la base metálica que alojaba al sensor solar un sensor de temperatura a fin de verificar que la temperatura sobre la muestra sea la deseada.

Para medir la corriente fotogenerada por el sensor, se utilizó la misma metodología descrita anteriormente. En la figura 5.16 se muestra el resultado de este ensayo, en donde se aprecia un ajuste muy bueno entre ambas curvas en prácticamente todo el rango de visión del sensor solar (180°), mientras que el error entre curvas se eleva a 25% para ángulos mayores a $\pm 80^\circ$. De este modo se realizaron 22 mediciones de I_{cc} vs ángulo correspondientes a cada uno de los sensores gruesos involucrados. El detalle de estos ensayos se encuentra en el procedimiento e informe técnicos correspondientes al ensayo [12,13].

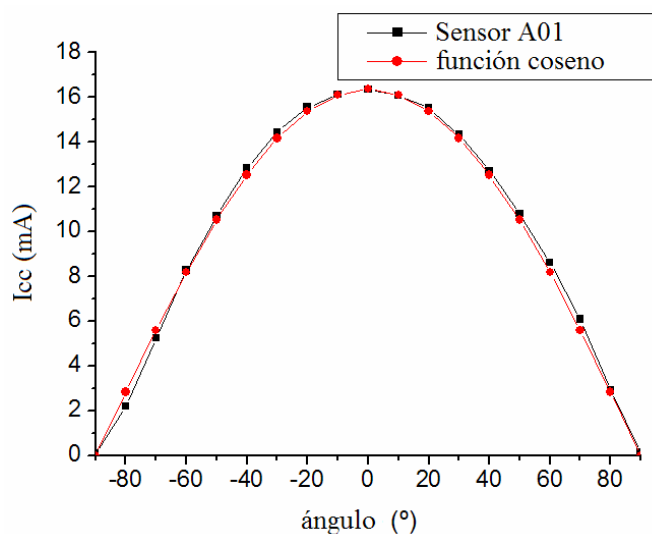


Figura 5.16. Ejemplo de medición de I_{cc} para sensores correspondientes a las misiones SAC-D y AMAZONIA I

La medición de temperatura se implementó mediante un circuito basado en un circuito integrado LM334 y un milivoltímetro. El LM334 fue colocado en la base portamuestra. Todas las mediciones se realizaron a $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

5.3.4 Errores de Medición

Como fuera mencionado, para la determinación de los ángulos se utilizó un plato divisor graduado en 360 grados, por lo que se asigna un error de $\frac{1}{2}$ grado al posicionado del disco. Adicionalmente existe una indeterminación en el posicionado de ángulo cero de un grado. Para las mediciones con el voltímetro se utilizó un voltímetro digital HP modelo 974A cuya especificación de la indeterminación para la escala de mV es $\pm (0,05\% + 2c)$.

Para las mediciones de resistencia de sensado se utilizó un micro-óhmmetro digital marca KEYTHLEY modelo 580 cuya indeterminación en el rango utilizado es de 0,5%.

5.4 Conclusiones

En el presente capítulo se ha expuesto sobre las actividades realizadas vinculadas a los desarrollos tecnológicos llevados adelante en el DES. El desarrollo de los paneles solares del satélite SAC-D fue la primera experiencia de fabricación de un sistema de potencia para un satélite de envergadura. Durante la vida útil de la misión

(Junio 2011 – Junio 2015) los datos de telemetría han mostrado un correcto funcionamiento de la totalidad de los módulos FV que formaban los dos paneles [7]. Por otro lado, durante el período mencionado no se manifestaron degradaciones apreciables en los parámetros eléctricos de los módulos FV como también en los sensores solares gruesos de posición.

Dichos sensores han sido utilizados en diferentes misiones espaciales al día de hoy y serán próximamente utilizados en las misiones SAOCOM 1A y 1B de la CONAE. Las mediciones de I_{cc} en función del ángulo de incidencia de la luz es la principal característica a evaluar de los sensores, ya que son necesarias para ajustar diferencias entre la curva real y un coseno teórico. Dichas diferencias se producen al introducir en el camino óptico vidrios de protección o cobertores, lo que produce un apartamiento de las curvas teóricas para ángulos rasantes.

El *setup* propuesto para los ensayos tiene limitaciones debidas al tipo de fuente de luz utilizada (tamaño aparente), además de errores de posicionamiento inicial del disco graduado, por lo que se asume un error de 1° en el posicionamiento de la muestra. A esto se le deben agregar los errores en la calibración de las resistencias de sensado y el error del instrumento utilizado, pero son de menor significancia con respecto a la fuente de error mencionada antes.

Para el caso de los sensores del vector VS-30 se realizaron mediciones para dos condiciones de incidencia distintas: normal y oblicua. La separación entre la curva empírica y el coseno teórico para ángulos alejados en más de 30° con respecto a la incidencia normal de cada uno de los sensores se atribuye a la cubierta de vidrio que protegía a los sensores cuya forma era ligeramente curva. Este efecto se observó sistemáticamente en los 4 módulos de sensores ensayados. La diferencia se va haciendo mayor para ángulos mayores (luz rasante). Se verificó además que dicha función es prácticamente independiente del ángulo β .

Para el caso de los sensores de las misiones SAOCOM, SAC-D y AMAZONIA I se concluyó que para ángulos mayores a 80° (luz casi rasante) el error se eleva a 25%. Esto se debe a un mayor peso relativo de la incertidumbre en la medición de la corriente

cuando el haz incide en forma rasante y además al tamaño aparente de la fuente utilizada, que fue de 2°.

5.5 Referencias

1. FED-STD-209D, Federal Standard: Airborne Particulate Cleanliness Classes In Cleanrooms And Clean Zones (15 Jun 1988) [S/S BY ISO14644-1 and ISO14644-2]
2. ISO 14644-1, Cleanrooms and associated controlled environments—Part 1: Classification of air cleanliness
3. W. Herrmann, W. Wiesner, W. Vaassen. Hot spot investigations on PV modules-new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes. Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, 1129 (1997).
4. M. Martinez Bogado. Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales. Tesis Doctoral. Instituto de Tecnología Prof. J. Sabato – Universidad Nacional de San Martin, 2004.
5. <http://www.aeb.gov.br/>
6. <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales/sac-d/objetivos>
7. E. Godfrin. Simulación y modelización de paneles solares y de sistemas de potencia para aplicaciones espaciales. Tesis Doctoral. Instituto de Tecnología Prof. J. Sabato – Universidad Nacional de San Martin, 2015.
8. http://www.inpe.br/produtos_servicos/engenharia_satelites/amazonia1.php
9. <http://www3.conae.gov.ar/index.php/english/education-public-outreach/225-conae-en/access-to-space/478-proyecto-carga-util-vs-30.html>
10. M.J.L. Tamasi, M.G. Martínez Bogado, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, I. Prario, M. Alurralde, A. Filevich. Photovoltaic sensors for Aquarius/SAC-D satellite mission: development and environmental tests. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 700 (2009).

11. ASTM E927-91 Standard specification for solar simulation for terrestrial photovoltaic testing.
12. H. Socolovsky. Electrical characteristics of ten fly models CSS as a function of the angle of incidence of light at room temperature. Report. Documento interno CAC-PSE-CSS-00441A-IN.
13. H. Socolovsky. Electrical characterization of CSS fly models as a function of the angle of incidence of light at room temperature. Procedure. Documento interno CAC-PSE-CSS-00641A-PR.

Capítulo 6

Conclusiones generales

1. Comentarios finales.

Las actividades desarrolladas en la presente tesis doctoral, realizada en el DES de la CNEA, se encuentran enmarcadas dentro del Plan Espacial Nacional llevado adelante por la CONAE. Dichas actividades se centraron en el estudio, caracterización y elaboración de dispositivos fotovoltaicos para uso espacial, particularmente aquellos fabricados a partir de materiales semiconductores III-V.

Los primeros dos capítulos, de carácter introductorio describieron, por un lado, la aplicación histórica de la energía solar fotovoltaica en misiones espaciales y los objetivos y alcances del Plan Espacial Nacional. Por otro lado, se describió el principio de funcionamiento de las celdas solares, el componente básico en la fabricación de paneles solares para uso espacial.

El objeto de estudio de este trabajo se centró básicamente en dos técnicas de caracterización de dispositivos fotovoltaicos: la medición de respuesta espectral de las celdas solares de triple juntura que utilizan los paneles solares de las misiones de la CONAE y la obtención de la característica $I-V$ tanto de una celda solar como de un módulo FV a través de la técnica multiframe. Por último se mostró la aplicación y caracterización de sensores solares de posición desarrollados en el DES utilizados en diferentes misiones espaciales.

Desde el punto de vista de la originalidad, el capítulo de medición de respuesta espectral contribuye con la obtención de condiciones de medición que minimizan los *artifacts* en las mediciones de RE debidos tanto a acoplamiento lumínico como a las condiciones de polarización lumínica y eléctrica propiamente dichas.

Por otro lado, el desarrollo del equipo de medición de respuesta espectral para dispositivos multijuntura presentado en el capítulo 3 hace que se cuente en el DES con un *setup* muy versátil desde el punto de vista del amplio rango de longitudes de onda en el que se puede medir respuesta espectral, así como también la capacidad de recrear diferentes condiciones espectrales de polarización lumínica para la medición de *RE* de dispositivos de gran área. Además, el sistema mostró ser fácilmente adaptable para la medición de otros tipos de dispositivos multijuntura, como ser celdas experimentales de doble y triple juntura de algunos mm^2 de área. Asimismo, se ganó experiencia en la determinación de las mejores condiciones espectrales de iluminación para la medición de los distintos tipos de dispositivos multijuntura que se ensayaron hasta el día de hoy.

Desde el punto de vista de los resultados de las mediciones, se pudieron realizar calibraciones de patrones secundarios a partir de dos patrones primarios calibrados en fábrica. A su vez, el sistema ha mostrado tener una excelente repetibilidad en las mediciones, lo que permitió poder estimar la incertidumbre en la medición de *RE* para el caso particular de celdas comerciales de triple juntura.

Las mediciones de *RE* han permitido explorar el comportamiento individual de cada subcelda que compone una celda de triple juntura. Como resultado de esto y como parte de las actividades de investigación del DES, se llevaron a cabo ensayos de daño por radiación en el acelerador de iones pesados TANDAR del CAC, tanto en sensores solares de posición como en las celdas de triple juntura utilizadas en las misiones SAOCOM y SAC-D. Parte de la evaluación de los daños producidos en cada subcelda se obtuvieron a través de la medición de *RE* logrando de este modo evaluar, desde el punto de vista de la generación de corriente, la degradación producida por la irradiación con partículas cargadas en cada subcelda componente.

El capítulo de medición de módulos FV mediante la técnica multiframe hace su aporte novedoso en relación al estudio del comportamiento dinámico de una celda de triple juntura al ser iluminada con un pulso de flash de muy corta duración.

En este capítulo se muestra la factibilidad de realizar mediciones eléctricas (curva *I-V*) de un módulo FV con un equipamiento de bajo costo y baja complejidad como lo es un flash de estudio fotográfico. Si bien existen simuladores solares

especializados para la medición de esta característica son costosos y voluminosos, por lo que no son transportables a otros laboratorios, por ejemplo durante una campaña de calificación de paneles solares para una misión. Por tal motivo, contar con la técnica multiframe es muy ventajoso en estos casos, pudiéndose determinar a través de esta técnica la potencia que genera un módulo FV previo a ser utilizado en un satélite. Como punto importante del trabajo, se logró cuantificar el error de la medición de los parámetros eléctricos característicos por utilizar un espectro no normalizado como es el caso del flash utilizado. Para este fin, se desarrolló un método capaz de predecir la curva $I-V$ de una celda solar de triple juntura para cualquier fuente de luz y se lo extrapoló a la dimensión de un módulo FV de un panel solar del satélite SAC-D/Aquarius. Finalmente se evaluaron estas diferencias, resultando la utilización de la técnica desarrollada una buena herramienta para la determinación experimental de la potencia generada por un módulo FV.

Por otro lado, dado que cualquier dispositivo electrónico tiene un determinado tiempo de respuesta fue necesario desarrollar un modelo dinámico de las celdas de TJ a fin de evaluar posibles errores en la medición debidos al tiempo de duración del pulso del flash. Para ello se desarrolló un modelo eléctrico de una celda de triple juntura que incorporaba las capacidades internas de dichos dispositivos y se simuló las condiciones de ensayo con el flash bajo estudio. Finalmente, se concluyó que para las celdas multijuntura III-V comerciales utilizadas en los paneles solares no se presentan errores de medición debidos a fenómenos dinámicos al ser iluminadas con un flash de estudio fotográfico común.

En cuanto a la fabricación de paneles solares para uso espacial, se presentó una descripción de las actividades concernientes a la integración de los módulos fotovoltaicos que componen los mismos, así como los componentes que se utilizan para la integración. Se mostraron además algunos desarrollos propietarios de CNEA como los interconectores de celdas, los buses de interconexión y los sensores solares de posición, siendo el desarrollo de éstos últimos un remarcable hecho dado que se trata de la fabricación de dispositivos semiconductores en el país. Además de las actividades desarrolladas en la integración de los paneles solares para las misiones SAC-D y SAOCOM, se trabajó en la caracterización de la corriente de cortocircuito de los mencionados sensores solares de posición en función del ángulo de incidencia de la luz,

concluyéndose que su respuesta es adecuada para su aplicación en un sistema de posicionamiento de un satélite o vector.

Cabe destacar que los paneles de la misión SAC-D/Aquarius, integrados en el laboratorio del DES han tenido un excelente desempeño durante la vida útil de la misión. Esto fue determinado mediante el estudio minucioso de la telemetría que se recibió a lo largo de los cuatro años de funcionamiento en órbita. Se concluyó asimismo que durante este lapso no hubo degradación significativa en los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos. Esta situación reafirma las capacidades logradas dentro del DES para la integración de paneles solares de satélites de órbita LEO, como lo son las próximas misiones de la CONAE: SAOCOM 1A y 1B y la serie tecnológica SARE.

De cara al futuro, las actividades de desarrollo de paneles solares para uso espacial realizadas en el DES dejan abierta la posibilidad de encarar otros emprendimientos de desarrollo vinculado con paneles solares para satélites geoestacionarios, según lo puedan requerir los proyectos satelitales argentinos en el marco del desarrollo de satélites de telecomunicaciones como lo fueron el ARSAT-1 y el ARSAT-2 cuyos sistemas de potencia fueron comprados en el exterior.

Artículos en revistas internacionales con arbitraje

“Development of solar arrays for argentine satellite missions”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, D. Fernández Slezak, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, J. García, E.M. Godfrin, L. González, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, C. Nigri, S.L. Nigro, J. I. Pérez, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, D. Raggio, C. Rinaldi, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, *Aerospace Science and Technology* 26, 38 (2013).

“Spectral and dynamical study of III-V triple junction solar cells and the application to multflash I-V measurement”, H. Socolovsky, E. Yaccuzzi, J. Plá, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 23, 1330 (2015).

En reformulación:

“A setup for spectral response measurement of multijunction solar cells based on narrow bandgap interference filters”, H. Socolovsky, J. García, J. Plá

Artículos en actas de congresos internacionales con arbitraje.

“Advances in the development of photovoltaics for space applications in Argentina”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, C. Nigri, S.L. Nigro, F. Palumbo, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, A. Vertanessian, *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milán, Italia, (2007), pág. 687.

“Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in Argentina”, M. Barrera, J. García, H. Socolovsky, F. Rubinelli, E. Godfrin, J. Plá, *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, España, (2008), pág. 781.

“Solar array qualification models for Aquarius/SAC-D satellite mission”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, C. Nigri, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, C. Rinaldi, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, España, (2008), pág. 785.

“Flight models for the Aquarius/SAC-D satellite mission”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, C. Nigri, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, D. Raggio, C. Rinaldi, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, A. Vertanessian, *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburgo, Alemania (2009), pág. 695.

“Setup development for spectral response measurement on multijunction solar cells”, H. Socolovsky, J. García, J. Plá, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference – 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, España (2010), pág. 854.

“On the illumination spectrum influence in the electrical characterization of multijunction solar cells”, H. Socolovsky, E. Yaccuzzi, E.M. Godfrin, J. Plá, Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburgo, Alemania (2011), pág. 795.

“In-situ and ex-situ characterization of III-V semiconductor materials and solar cells upon 10 MeV proton irradiation”, E. Yaccuzzi, E. Barrigón, S. Rodríguez, M. Ochoa, M. Barrera, P. Espinet-González, M.L. Ibarra, J. Garcia, H. Socolovsky, M.D. Perez, P. Giudici, M. Alurralde, C. Algora, I. Rey-Stolle, J. Plá, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, Francia (2013), pág. 526.

Artículos en actas de congresos y revistas nacionales con arbitraje

“Diseño, fabricación, caracterización y ensayos de sensores fotovoltaicos para la misión satelital Aquarius-SAC-D”, M. J. L. Tamasi, M. G. Martínez Bogado, S. E. Rodríguez, I. Prario, H. P. Socolovsky, J. C. Plá, M. A. Alurralde, C. Nigri, A. Filevich, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 11, 04.01 (2007).

“Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales III-V”, J. Plá, M. Barrera, F. Rubinelli, J. García, H. Socolovsky, M. Bosi, G. Attolini, C. Pelosi, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 11, 04.85 (2007).

“Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, Bruno C.J., P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, C. Nigri, S.L. Nigro, F. Palumbo, J. Plá J., I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, A. Vertanessian, Actas de la XXXIV Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, 19 al 23 de noviembre de 2007, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, trabajo N° 046.

“Modelos de ingeniería y calificación de los paneles solares para la misión satelital Aquarius/SAC-D”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, C. Nigri, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, D. Raggio, C. Rinaldi, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 12, 04.15 (2008).

“Aplicación de capas antirreflectantes en celdas solares”, H. Socolovsky, J. García, M. Barrera, J. Plá, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 13, 04.45 (2009).

“Elaboración de celdas solares de silicio monocristalino para aplicaciones espaciales con capas dieléctricas antirreflectantes: primeros resultados”, M. Barrera, H. Socolovsky, J. Plá, Actas del Congreso SAM/CONAMET 2009, pág. 2085 (2009).

“Desarrollo de un equipo de medición de respuesta espectral en celdas solares multijuntura: Última etapa”, J. García, H. Socolovsky, J. Plá, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 14, 04.01 (2010).

“Integración y ensayos de los paneles solares de vuelo para la misión satelital Aquarius/SAC-D”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, S. Nigro, J.M. Olima, J. Plá, M.C. Raffo Calderón, D. Raggio, C. Rinaldi, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 14, 04.49 (2010).

“Paneles solares para la misión satelital Aquarius/SAC-D: integración y ensayo del modelo de vuelo y análisis de datos de telemetría luego de la puesta en órbita”, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, J. García, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, J.M. Olima, J.I. Pérez, J. Plá, M.C. Raffo Calderón, D. Raggio, C. Rinaldi, S.E. Rodríguez, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi, Actas de la XXXVIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear (2011).

“Integración de los paneles de vuelo del satélite CUBEBUG-1”, C.G. Bolzi, C. Bruno, P. Cabot, E. Carela, J. Di Santo, J. Durán, J. Fernández Vázquez, E. Godfrin, V. Goldbeck, L. Gonzalez, A. Moglioni, S. Muñoz, J. Olima, J. Plá, J.I. Pérez, D. Raggio, H. Socolovsky, M. Tamasi, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 16, 04.49 (2012).

Participaciones en congresos

“Avances en la medición de la respuesta espectral de celdas solares de triple juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica”, J. García, H. Socolovsky, J. Plá. 93^a Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina (AFA), Buenos Aires, Argentina. Septiembre 15-19 (2008).

“Medición automatizada de la respuesta espectral de celdas solares multijuntura de estructura monolítica en el intervalo 300-1900 nm”, J. García, H. Socolovsky, J. Plá. 94^a Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina (AFA), Rosario, Argentina. Septiembre 15-19 (2009).

“Modelo de vuelo de los paneles solares para la misión satelital AQUARIUS/SAC-D”, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, L. González, M.G. Martínez Bogado, A. Moglioni, S. Muñoz, S.L. Nigro, J. Plá, D. Raggio, C. Rinaldi, H. Socolovsky, M.J.L. Tamasi. 94^a Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina (AFA), Rosario, Argentina. Septiembre 15-19 (2009).

“Medición de respuesta espectral de dispositivos fotovoltaicos”, J. García, H. Socolovsky, J. Plá. 95^a Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina (AFA), Malargüe, Argentina. 28 de septiembre – 1 de octubre (2010).

“Paneles solares para la misión satelital Aquarius/SAC-D: desarrollo, integración del modelo de vuelo y funcionamiento en órbita” M. Alurralde, M. Barrera, C. Bolzi, C. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C., D. Fernández Slezak, J. Fernández Vázquez A. Filevich, J. García, E.M. Godfrin, L. González, V. Goldbeck, A. Iglesias. M. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S. Muñoz, C. Nigri, S. Nigro, J. Olima, J. Pérez, J. Plá, I. Prario, M. Raffo Calderon, D. Raggio, C. Rinaldi, S. Rodríguez, H. Socolovsky, M. Tamasi., 97ª Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina, Villa Carlos Paz, Argentina, del 25 al 28 de setiembre (2012).

“Aplicaciones de nanociencia y nanotecnología en dispositivos fotovoltaicos”, M.D. Perez, M. Barrera, P. Giudici, J. García, M.L. Ibarra, H. Socolovsky, S. Rodríguez, E. Yacuzzi, M. Alurralde, J. Plá, XIII Encuentro de Superficies y Materiales Nanoestructurados, Mar del Plata, Argentina, 8 al 10 de Mayo (2013).

“Calibración simultánea durante la medición de la Respuesta Espectral en celdas solares multi-juntura de estructura monolítica”, P.G. Brichetto Orquera, J.A. García, H.P. Socolovsky, J. Plá, 99ª Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina, Tandil, Buenos Aires, Argentina, del 22 al 25 de septiembre (2014).

“Investigación y Desarrollo en Energía Solar Fotovoltaica en el Departamento Energía Solar de la CNEA”, M. Alurralde, M. Barrera, J. Garcia, P. Giudici, E. Godfrin, A. Koffman, M.L. Ibarra, M.D. Perez, J. Plá, H. Socolovsky, E. Yaccuzzi, 5º Congreso de la International Solar Cities Initiative, Ciudad de Buenos Aires, Argentina, del 17 al 18 de noviembre (2014).

Apéndice 1

ECSS-E-ST-20-08C – European Cooperation for Space Standardization “Photovoltaic assemblies and components” (July 2012)

Table 0-1: Classes of single and multi-source solar simulators

Wavelength Interval [μm]	Percent of Total Irradiance for between indicated Total Range of AM0 spectrum within various wavelength intervals		Bins [μm]	Class A	Class B	Class C
	Total Range 0,35 and 1,9 μm (121,74 mW/cm ²)	Total Range 0,35 and 1,1 μm (95,98 mW/cm ²)				
0,35 - 0,4	4,4	5,6	0,15	±15 %	±20 %	±25 %
0,4 - 0,5	15,3	19,4				
0,5 - 0,6	15,2	19,3	0,1	±15 %	±20 %	±25 %
0,6 - 0,7	13,1	16,6				
0,7 - 0,8	10,4	13,2				
0,8 - 0,9	8,4	10,6				
0,9 - 1,0	6,6	8,3				
1,0 - 1,1	5,5	7,0				
1,1 - 1,2	4,5		0,2	±15 %	±20 %	±25 %
1,2 - 1,3	3,8					
1,3 - 1,4	3,2					
1,4 - 1,5	2,7					
1,5 - 1,6	2,2					
1,6 - 1,7	1,9					
1,7 - 1,8	1,6					
1,8 - 1,9	1,2					

The nonconformity in the uniformity of the irradiance shall be calculated as follows:

$$\text{Nonconformity (\%)} = 100 \times (\text{MI} - \text{mI}) / (\text{MI} + \text{mI})$$

Where:

- MI = Maximum irradiance,
- mI = Minimum irradiance,

With the maximum and minimum irradiance measured with the detectors over the nominated test area (corrected for temporal instability).

Table 0-2: Classes of solar simulators with respect to nonconformity of irradiance uniformity

Class	Class A	Class B	Class C
Nonconformity (%)	± 2	± 5	± 10

The temporal (the time in between two consecutive calibrations of the solar simulator) instability shall be calculated with the following expression:

$$\text{Temporal instability (\%)} = 100 \times (\text{MI} - \text{mI}) / (\text{MI} + \text{mI})$$

Where :

- MI = Maximum irradiance,
- mI = minimum irradiance

with the maximum and minimum irradiance measured with the detector at any particular point of the nominated test area plane during the time of data acquisition.

Table 0-3: Classes of solar simulators with respect to temporal instability of irradiance

Class	Class A	Class B	Class C
Nonconformity (%)	± 1	± 5	± 10