

RESPUESTA ESPECTRAL EN CELDAS
SOLARES MULTI-JUNTURA DE
ESTRUCTURA MONOLÍTICA BASADAS EN
SEMICONDUCTORES III-V

Javier Andres Garcia

Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Marzo 2011

TEMA: Energía Solar.

ALUMNO: Javier Andres Garcia

LU N°: 569/03

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

DIRECTOR DEL TRABAJO: Dr. Juan Carlos Plá

CODIRECTOR DEL TRABAJO: Ing. Hernán Socolovsky

FECHA DE INICIACIÓN: Marzo de 2009

FECHA DE FINALIZACIÓN: Marzo de 2010

FECHA DE EXAMEN:

INFORME FINAL APROBADO POR:

Autor: Javier A. Garcia

Jurado

Director: Juan C. Plá

Jurado

Profesor: Mirta A. Gil

Jurado

Resumen

El presente trabajo consiste en la modificación, extensión de la capacidad, automatización y calibración de un equipo de medición de *Respuesta Espectral* originalmente diseñado para la medición de celdas solares de silicio cristalino. Para ello se paso revista de los conocimientos básicos sobre celdas solares, en particular de la *Respuesta Espectral* de estas, que permitieron definir las modificaciones mecánicas, eléctricas, de software, de hardware, y de las fuentes de luz necesarias para la medición de forma automática de la *Respuesta Espectral* de celdas multi-juntura de estructura monolítica. También se muestran los estudios realizados para colocar las celdas de triple-juntura monolíticas de InGaP/GaAs/Ge a medir bajo correctas condiciones de polarización lumínica y eléctrica. Esto permitió el desarrollo de métodos que permitan hallar estas condiciones para la medición de otros tipos de celdas. Además, una vez realizada la calibración del equipo, se muestran resultados de mediciones de la *Respuesta Espectral* de celdas de doble y triple-juntura y el cálculo de su *Eficiencia Cuántica Externa* a partir de la *Respuesta Espectral* medida, así como las mediciones realizadas de celdas mono y doble-juntura de 1 mm^2 de área para uso terrestre con concentración. Finalmente, se calcula la degradación en la corriente de cortocircuito de cada subcelda de una celda de triple-juntura luego de un ensayo de daño por radiación.

Agradecimientos

Estos agradecimientos no son solo a los que contribuyeron a la realización de este trabajo sino también a los que siempre creyeron en mí y en la posibilidad de que llegue este momento.

A mis padres, por el apoyo incondicional cuando les dije que iba a estudiar esta carrera “rara”, por su apoyo durante los largos años de estudio y por su apoyo actual. A mamá en particular por los innumerables gritos de ¡A comer! mientras yo estaba metido en el estudio y sus infinitas horas de trabajo dentro y fuera de la casa para que no me falte nada y pueda dedicarme full a estudiar, ni hablar de que fue con ella que vi por primera vez las películas de “Viaje a las Estrellas (Star Trek)”, entre otras, que me llevaron al mundo de la ciencia ficción, creo que sin ello hoy no querría tanto hacer ciencia!. A papá, el ingeniero que me genero el amor por los “fierros”, al armar y desarmar y a la tecnología Argentina!. Fue el quien me enseñó que con paciencia y esfuerzo casi no hay máquina, aparato o cosa que no pueda entender, desarmar y arreglar (o por lo menos aprender intentándolo). También me enseñó lo valioso del conocimiento, a nunca dejar de preguntar cuando no sé algo y a participar y aportar cuando sé algo (que son pocas veces!!!). Ni hablar del apoyo “financiero” durante tantos años... y las donaciones de material y conocimiento que hoy en día me sigue haciendo a mi y a la ciencia Argentina.

A Lila, por ser una segunda madre, por estar siempre ahí, por incontables horas de debate, tortas nucleares fallidas ☺, por sus muchas preguntas sobre ciencia, infinitos momentos compartidos e incondicional apoyo siempre.

A mis hermanos Her, Agus y Seba, aunque la convivencia fue difícil y muchas veces nos queríamos matar, de cada uno aprendí algo, poco, pero algo es algo. (Já!)

A mis amigos mas antiguos: Chino, Chelo, Chula, Flor, Fran, Tebo y otros tantos que por fortuna son muchos! Ellos siempre se bancaron a este “nerd”, que siempre tiene una explicación que dar, siempre se bancaron el -no, no pudo tengo que estudiar- e interminables horas de discusiones y de mi tratando de convencerlos sobre lo interesante que es la física y ciencia en general.

A aquellos amigos que por cuestiones de la vida uno deja de ver pero nunca dejan de ser amigos, cada uno de ellos formo parte de mi vida y fueron esenciales para llegar a este momento.

A mis amigos de la facu: Caro, Mop, José, Adrián, Pancho, Maxi, el “Gran Ed” (pilar fundamental para que me reciba!!!) y muchos, muchos, mas que pasaron en estos largos años “viviendo” en la facu. Todos ellos hicieron que fuera agradable pasar muchas horas en las aulas, muchas mas estudiando y otras muchas fuera de la facu.

A toda mi familia (abuelos, tíos y primos) que son muchos (somos Garcia) y me dieron siempre su apoyo y compañía.

Finalmente quiero agradecer enormemente a todas los integrantes del Departamento Energía Solar, en especial a los integrantes “del 50”, que me permitieron formar parte del desarrollo científico/tecnológico nacional y con los cuales pase incontables horas de charlas con café, hablando de infinitos temas, a veces, no muy científicos (jájá). Un agradecimiento especial a Juan, que acepto ser mi director desde el primer día que me aparecí para hacer labo 6 y 7, y que permitió que siguiera siendo su “pupilo” para realizar esta tesis y, como si fuera poco, también para hacer mi doctorado (es increíble pero parece que no se cansa de mí, jajá), él siempre esta para aclarar mis dudas y me da la libertad necesaria y fundamental para mi desarrollo como investigador y persona, sin su paciencia no hubiese llegado a este punto (perdón Juan por tantas fechas que te di para recibirme y nunca cumplí, hasta hoy!).

A todos gracias, muchas gracias por todo.

Índice general

Resumen	3
Agradecimientos	4
1. Introducción	8
1.1. El Recurso Solar	9
1.2. Semiconductores	10
1.2.1. Absorción en Semiconductores	12
1.2.2. Recombinación en Semiconductores	14
1.2.3. Ecuaciones Básicas	15
1.3. Celdas Solares	16
1.3.1. Características de la Junta $p-n$	16
1.3.2. Solución Aproximada para la Corriente de Portadores	16
1.3.3. Parámetros de Salida de las Celdas Solares	19
1.3.4. Circuito Equivalente	19
1.3.5. Celdas Solares Mono-juntura y Multi-juntura	20
1.3.6. Límites de Eficiencia	21
2. Respuesta Espectral	24
2.1. Medición de la Respuesta Espectral Absoluta	25
2.1.1. Método Normalizado de Medición de Respuesta Espectral en Mono-junturas	26
2.2. Respuesta Espectral en Celdas Solares Multi-juntura	27
2.2.1. Método Normalizado de Medición de Respuesta Espectral en Multi-junturas	29
2.3. Eficiencia Cuántica y Corriente Fotogenerada	31
2.4. Posibles Errores en la Medición de Respuesta Espectral	32
3. Dispositivo Experimental y Adquisición de Datos	34
3.1. Arreglo Experimental Inicial	34
3.1.1. Estudios Preliminares para la Utilización del Equipo	38
3.1.2. Procedimiento de Medición de Celdas Mono-juntura	41
3.2. Modificaciones Realizadas al Equipo	41
3.2.1. Modificaciones en el Equipo para la Medición de Celdas Multi-juntura	42
3.2.2. Modificaciones para la Automatización de la Medición	43
3.2.3. Modificaciones para Mejorar las Prestaciones Generales del Equipo	48
3.2.4. Configuración Final del Equipo	49
3.2.5. Procedimiento de Medición de Celdas Multi-juntura	50

4. Condiciones Experimentales para Medir Celdas Solares Multi-juntura	52
4.1. Estudio Sobre la Polarización Lumínica	52
4.1.1. Estudio de las Lámparas Utilizadas para la Polarización Lumínica .	52
4.1.2. Cálculo de los Espectros “Seleccionadores”	53
4.1.3. Espectros “Seleccionadores” para una Celda Triple-juntura GaInP- /GaAs/Ge	55
4.1.4. Estudio de las Condiciones de Funcionamiento de las Celdas Bajo los Espectros “Seleccionadores” Hallados	56
4.2. Estudio Sobre la Polarización Eléctrica	58
4.3. Transferencia de la Calibración	62
4.3.1. Característica de las Celdas de Referencia	62
4.3.2. Polarización Lumínica para las Celdas a Calibrar	62
4.3.3. Polarización Eléctrica de las Celdas a Calibrar	64
4.3.4. Transferencia del Patrón de Respuesta Espectral	64
5. Mediciones y Resultados	66
5.1. Medición de Celdas Multi-juntura Comerciales y su Eficiencia Cuántica Externa	66
5.2. Medición de Celdas Simple y Multi-juntura para uso con Concentración . .	67
5.3. Evaluación del Daño por Radiación y Degradación de la Corriente de Cor- tocircuito de las Subceldas	68
6. Conclusiones	71
Bibliografía	75

Capítulo 1

Introducción

En la década de los '70 con la llamada *crisis del petróleo* y nuevamente en los últimos años con la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles y el evidente *cambio climático global* las energías alternativas, también llamadas limpias o renovables, obtuvieron un gran impulso en todo el planeta.

Estas fuentes alternativas no sólo representan una contribución a la solución de problemas de contaminación ambiental y a la escasez energética, sino que pueden ayudar al desarrollo tecnológico, económico y social de los países que las posean.

Uno de estas fuentes alternativas es el recurso solar, en particular la conversión fotovoltaica. Los dispositivos de conversión fotovoltaica son fabricados a partir de uno o más materiales semiconductores orgánicos o inorgánicos. Entre los basados en semiconductores inorgánicos, el silicio ocupa un lugar privilegiado: su abundancia natural (es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre con casi el 30%), una industria muy establecida por su aplicación en la electrónica y su resistencia a la degradación, entre otras causas, hace que acapare la inmensa mayoría del mercado fotovoltaico mundial. Sin embargo en los últimos años están avanzando hacia una expectativa favorable en el mercado otros semiconductores como aquellos basados en compuestos III-V, que impulsados por la industria aeroespacial han permitido grandes avances en cuanto a tecnología y eficiencia.

Las celdas solares dependen del *Efecto Fotovoltaico* para su funcionamiento. Este efecto fue descubierto por *Henry Becquerel* en 1839, quien observó que se generaba una tensión cuando se iluminaba uno de los electrodos sumergidos en una solución electrolítica. Luego este efecto fue observado en el año 1876 por primera vez en un sólido mientras se realizaban experimentos con selenio.

Desde el primer reporte de un dispositivo fotovoltaico en 1941 por *Russell Ohl*, de Laboratorios Bell, se produjo una constante evolución, tanto en tipos y tecnologías de celdas como en la eficiencia de estas a nivel comercial, experimental y teórico. Como índice de esta evolución podemos considerar el mejoramiento de la eficiencia de conversión (relación entre la potencia recibida y la potencia entregada) desde 1941, con una eficiencia estimada menor que el 1%, hasta 32% en 2009 correspondiente al tipo de celdas multi-juntura GaInP/GaAs/Ge desarrollada por la empresa *Spectrolab* [1]. Para dispositivos que usan radiación concentrada por métodos ópticos, la eficiencia se eleva hasta el 42% [1].

Esta tesis, realizada en el *Departamento Energía Solar* de la *Gerencia Investigación y Aplicaciones* de la *Comisión Nacional de Energía Atómica*, tiene como objetivo contribuir

al progreso del conocimiento científico-tecnológico en el país en el campo de las celdas solares multi-juntura basadas en materiales semiconductores III-V y, en particular, a su caracterización eléctrica y electrónica. Los requerimientos de potencia y el área disponible determinaron que dichas celdas serán las utilizadas para la integración de los paneles de vuelo de las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D de la *Comisión Nacional de Actividades Espaciales* (CONAE), paneles cuyo diseño, simulación, integración y ensayo se ejecuta en la *Comisión Nacional de Energía Atómica* (CNEA).

1.1. El Recurso Solar

Las celdas solares convierten la radiación que proviene del *Sol* directamente en energía eléctrica haciendo uso de las propiedades electrónicas de los semiconductores. Como primer paso para la comprensión del funcionamiento de una celda solar, se considerarán las características físicas de la radiación proveniente del *Sol*.

Esencialmente, se puede considerar al *Sol* como una esfera gaseosa calentada por la reacción de fusión nuclear que se produce en su centro. Allí, se estima que se alcanzan temperaturas de unos 20 000 000 K. Sin embargo esta no es la temperatura que determina las características de las emisiones electromagnéticas del *Sol*. La mayor parte de la radiación producida en el interior es absorbida por la capa de iones de hidrógeno cercana a la superficie. La energía es transferida a través de corrientes de convección a la capa más exterior del *Sol*, llamada *fotosfera*, donde se reirradia a una temperatura sensiblemente menor que a la del interior: unos 6 000 K [2].

El espectro de radiación que emite la fotosfera y que se recibe en la *Tierra* antes de ingresar a la atmósfera, es similar al que caracteriza a un cuerpo negro a 6 000 K como se puede ver en la Figura 1.1. La intensidad de la radiación que se recibe fuera de la atmósfera es esencialmente constante y recibe el nombre de constante solar o radiación AM0 (*air mass zero*). El valor actualmente aceptado de la constante solar es de 1 366, 1 kW/m² [3]. La diferencia que se observa entre la distribución espectral de la radiación AM0 y la de un cuerpo negro ideal (Fig. 1.1), se debe a diferencias en la transmisividad de la atmósfera solar a distintas longitudes de onda [2]. El conocimiento exacto de la distribución de energía contenida en la luz solar es importante dado que las celdas solares responden de manera diferente a diferentes longitudes de onda.

Al atravesar la atmósfera terrestre, la luz solar resulta atenuada por lo menos un 30 % debido a la dispersión de *Rayleigh*, al *scattering* por moléculas y partículas de polvo y por absorción de los gases constituyentes de la atmósfera, en particular Oxígeno, Ozono, vapor de agua y Dióxido de Carbono.

El grado de atenuación es muy variable. En condiciones atmosféricas claras, el parámetro más importante para la determinación de la potencia total es la longitud del camino que recorre la luz a través de la atmósfera. Cuando el *Sol* está en dirección vertical, el camino es mínimo y decimos que la radiación es AM1 (*air mass one*). Si el ángulo respecto de la vertical es ϕ , resulta:

$$AM = \frac{1}{\cos \phi} \quad (1.1)$$

Por tanto, a diferencia de la situación fuera de la atmósfera, la luz solar en la superficie terrestre es muy variable en intensidad y composición espectral. Para permitir una

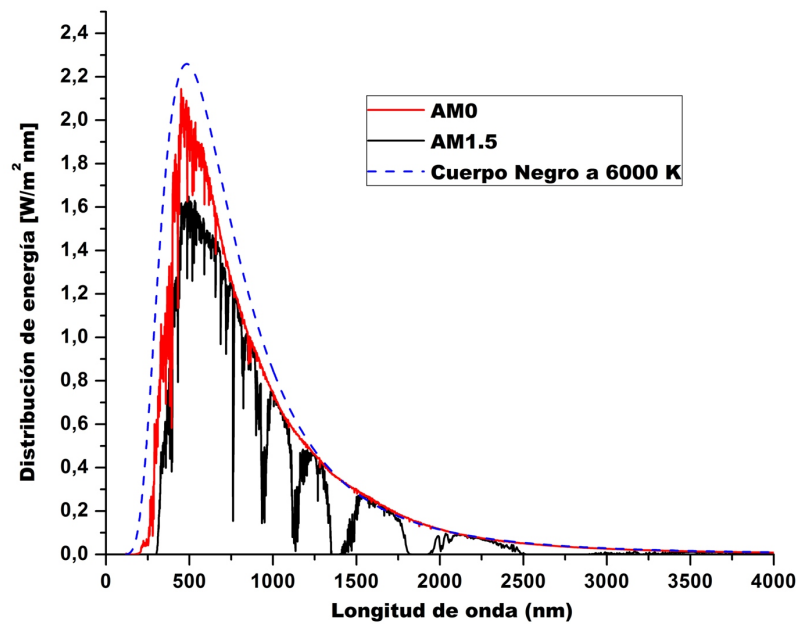


Figura 1.1: Distribución espectral de la radiación solar. Se muestran los casos AM0 y AM1.5 junto con la distribución correspondiente a un cuerpo negro a 6000 K.

comparación consistente entre las diferentes celdas solares en distintos lugares, se define el espectro AM1.5 (Fig. 1.1) estandarizado a una densidad de potencia global de 1 kW/m^2 . Este espectro es el usado como patrón para la medición de las características eléctricas de las celdas solares para aplicaciones terrestres.

Por otra parte, la radiación solar que llega a la superficie terrestre luego de atravesar la atmósfera se conoce como radiación solar directa; la dispersada por el aire y las nubes pierde la dirección definida y se conoce como radiación solar difusa (generalmente tiene una composición espectral diferente a la radiación directa); mientras que el albedo es radiación reflejada por el suelo. La radiación total sobre una superficie es la suma de las tres radiaciones (directa + difusa + albedo) y se conoce como radiación global o total [2].

Cuando se desee generar energía eléctrica por medio de la conversión fotovoltaica, deberá dimensionarse el sistema teniendo en cuenta la disponibilidad del recurso solar. Este no solo dependerá de la componente directa y difusa de la luz sino que también dependerá fuertemente de las características geográficas y climáticas, entre otras de la latitud y del número medio de días soleados. Con este fin existen mediciones solarimétricas, tomadas por estaciones en todo el mundo, del promedio anual por día del flujo de energía.

1.2. Semiconductores

La mayoría, de las celdas solares están compuestas por uno o más semiconductores. Un semiconductor es un material con la propiedad de conducir o no la corriente eléctrica según las condiciones en las que se encuentre. Su resistividad eléctrica a temperatura ambiente varía en el rango de 10^{-2} a $10^{+9} \Omega\cdot\text{cm}$ y en el cero absoluto de temperatura, cuando se hallan en su estado cristalino puro, son aislantes [4]. La mayoría de los semiconductores de interés fotovoltaico se utilizan en su forma cristalina (aunque no siempre, como el caso de celdas de silicio amorfo).

El material cristalino ideal se caracteriza por una disposición ordenada y periódica de los átomos que lo componen. En tales arreglos ordenados, es posible describir la estructura entera del cristal a partir de la repetición continua de una sección más pequeña de dicho arreglo. La más pequeña de estas secciones con la que es posible generar todo el cristal se conoce como *Celda Primitiva*. Esta *Celda Primitiva* contiene de forma natural toda la información necesaria para reconstruir la ubicación de los átomos en el cristal.

El problema de como se comportan los electrones en estas redes cristalinas puede ser resuelto a partir de la resolución, de manera aproximada, 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*. Como resultado de esto se llega a que los electrones pueden situarse en bandas de estados de energía permitida, siendo las regiones de energía no permitidas, las llamadas *bandas de energía prohibidas* o *band gaps* [4]. En la Figura 1.2 puede observarse el diagrama de bandas para el silicio (Si) y el arseniuro de galio (GaAs). A partir de estas bandas se pueden diferenciar metales, aislantes y semiconductores.

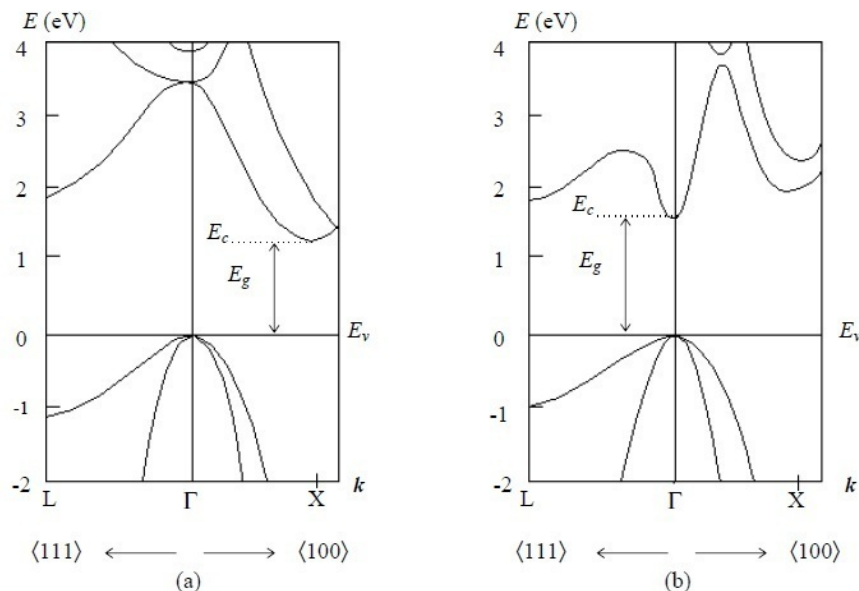


Figura 1.2: Estructura de bandas para dos semiconductores cristalinos, (a) Si y (b) GaAs.

A bajas temperaturas los electrones en el cristal ocupan los niveles mas bajos de energía hasta el *Nivel o Energía de Fermi* (E_F), a medida que la temperatura aumenta algunos electrones ganan energía por agitación térmica y pueden ocupar niveles de energía superiores.

Los metales tienen una estructura electrónica tal que la E_F se encuentra dentro de una banda permitida que no se llena completamente. Los aislantes tienen una banda totalmente ocupadas por electrones y una gran brecha de energía entre esta banda y la banda más próxima, que carece de electrones a bajas temperaturas, la E_F se encuentra dentro de la banda prohibida. Una banda en la que no hay electrones o que esta completamente llena no puede contribuir al flujo de carga ya que no hay electrones disponibles o estados disponibles (no hay vacantes en la vecindad donde pueda ir el electrón) respectivamente.

En un semiconductor el *gap* es menor que para los aislantes (para el Si es de 1,12

eV a temperatura ambiente), de modo que algunos electrones de la banda completamente llena (*banda de valencia*) pueden moverse por agitación térmica hacia el siguiente nivel de energía permitido (*banda de conducción*), quedando ahora niveles sin ocupar (*huecos*) en la banda de valencia. Se puede pensar a los huecos como partículas que poseen carga positiva, que se mueven en la dirección opuesta a los electrones ante la presencia de un campo eléctrico aplicado. Los electrones en la *banda de conducción* y los huecos en la *de valencia* contribuyen ahora al flujo de carga.

Existe una gran variedad de compuestos semiconductores, por ejemplo aquellos que se obtienen al combinar los elementos de las columnas III y V de la tabla periódica (GaAs, GaSB, InAs, GaP), y los cristales semiconductores provenientes de las columnas II y VI (ZnSe, CdS, CdTe).

Los semiconductores puros poseen igual concentración de electrones (e^-) que de huecos (h^+). Los mismos se denominan semiconductores *intrínsecos*. A fin de modificar las propiedades electrónicas de un semiconductor, se incorporan impurezas con una concentración mucho menor que la del constituyente básico. A este proceso se lo denomina *dopaje*. En este caso, el semiconductor se denomina semiconductor *extrínseco* y la cantidad de electrones no es igual a la de huecos.

Por ejemplo en el caso del Si, si las impurezas provienen de elementos la columna V de la tabla periódica (P, As, etc.), las mismas aportan cuatro electrones para satisfacer los enlaces covalentes, dejando un quinto libre. Estos dopantes se denominan *donores* o *dadores*. El electrón libre tiene una energía de ionización muy baja (~ 0.05 eV) y, a bajas temperaturas (~ 4 K), permanece en órbita alrededor de su átomo. A temperaturas más altas (en particular a temperatura ambiente) se ioniza y contribuye a la conductividad eléctrica, dejando atrás el ion positivo del átomo donador. A semiconductores dopados con elementos donores se los denomina semiconductores *tipo n*. Si el dopante introducido pertenece al grupo III (B, Al, etc.) que tienen tres electrones en su último nivel, no llegan a completar los cuatro enlaces con los átomos vecinos de *Si*, requiriéndose el atrapamiento de un electrón, que deja entonces un hueco positivo libre en la banda de valencia. Este semiconductor es de *tipo p* y a los átomos causantes de la conducción por huecos se los llama *aceptores*.

1.2.1. Absorción en Semiconductores

La forma de caracterizar la absorción de radiación electromagnética en un material es a través del coeficiente de absorción, $\alpha = \alpha(\lambda)$ donde λ es la longitud de onda de la radiación en cuestión. El coeficiente de absorción se define como la tasa relativa de decrecimiento de la intensidad de la radiación ($I(\lambda)$) a lo largo de su camino de propagación [5]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{d[I(\lambda)]}{dx} \quad (1.2)$$

En la Figura 1.3 pueden apreciarse el coeficiente de absorción para el silicio y varios semiconductores compuestos III-V.

Los mecanismos que conducen a la absorción de radiación electromagnética en semiconductores son:

a) *Absorción por portadores libres:*

Resulta de la transición de un electrón o un hueco de un estado de una partícula a otro

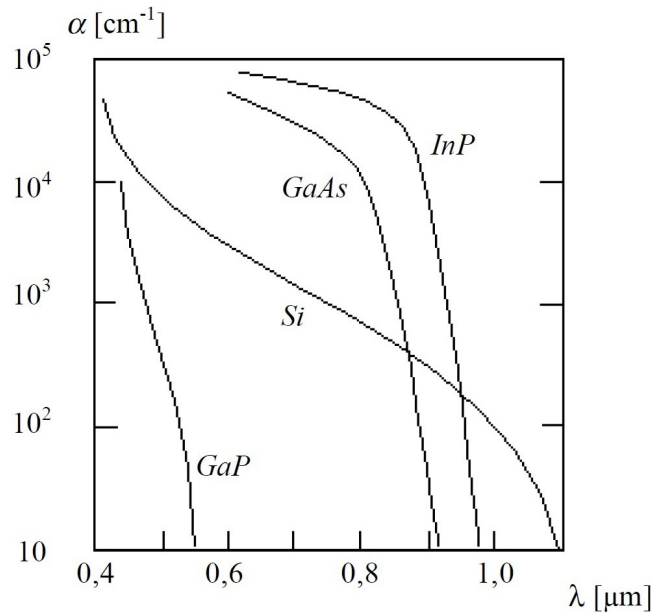


Figura 1.3: Coeficiente de absorción α en función de la longitud de onda para el silicio, de gap indirecto, y varios semiconductores compuestos III-V, todos ellos de gap directo.

dentro de una misma banda.

b) *Absorción por fonones:*

Ocurre normalmente en la región del infrarrojo del espectro y es causada, en materiales covalentes, por el cambio en el momento dipolar por procesos de un fonón [2,6]. Asimismo, los defectos e impurezas pueden permitir un proceso de absorción de un fonón ya que destruyen la periodicidad.

c) *Transiciones interbanda:*

Los electrones van desde estados de una partícula de la banda de valencia, a estados de una partícula en la banda de conducción por la absorción de un fotón.

d) *Otros:*

Formación de excitones, transiciones banda–estado localizado, transiciones estado localizado–estado localizado.

En semiconductores cristalinos, la absorción por transiciones interbanda está caracterizada por un marcado incremento en el coeficiente de absorción para frecuencias ν tales que $h\nu \geq E_g$. La forma funcional de $\alpha = \alpha(\lambda)$ dependerá de si el semiconductor es de *gap directo* (la energía mínima en la banda de conducción y la energía máxima en la banda de valencia se encuentran al mismo valor del momento del cristal, ver Figura 1.2.b) ó *indirecto* (la energía mínima en la *banda de conducción* y la energía máxima en la *banda de valencia* se encuentran en diferentes valores del momento del cristal, ver Figura 1.2.a). Dicha forma funcional, en la zona definida por las transiciones interbanda, es una propiedad del material muy importante para celdas solares, pues este tipo de procesos generan portadores libres en estados deslocalizados.

Para el caso del material de *gap directo*, un electrón puede ser excitado desde el tope de la *banda de valencia* hasta el fondo de la *banda de conducción* sin que se requiera ningún cambio en el vector k . Dado que en la escala de la figura puede decirse que el momento de un fotón es prácticamente nulo, no hay problemas para la conservación del vector k en

interacciones electrón-fotón que resulten en un electrón excitado a través de un *gap directo*. Este no es el caso en un semiconductor de *gap indirecto*. Un electrón excitado a través de un *gap indirecto* debe cambiar su vector k . El fotón no puede proveer dicho cambio, de modo que es necesaria la participación de un fonón. Los fonones pueden suministrar el momento necesario, pero ahora se deben conservar la energía y momento totales para las tres partículas: electrón, fotón y fonón. Esta necesidad de una interacción de tres partículas en un material de *gap indirecto*, tiende a disminuir la magnitud de $\alpha = \alpha(\lambda)$ en el valor donde se verifica $h\nu = E_g$ y para valores superiores en energía del fotón (ver Figura 1.3).

1.2.2. Recombinación en Semiconductores

Una vez que los electrones fueron excitados a niveles de mayor energía, pueden volver a una configuración de baja energía a través de distintos procesos conocidos como mecanismos de recombinación.

Físicamente, un electrón que fuera excitado a la banda de conducción por una perturbación decae a la banda de valencia aniquilándose con un hueco. Los mecanismos de recombinación predominantes en las celdas solares son:

a) *Recombinación radiativa:*

Los electrones y los huecos pueden recombinarse (es decir que el electrón decaiga a su nivel de energía original), mediante la emisión de un fotón. La relación entre absorción y emisión es establecida por la teoría de *van Roosbroeck* y *Shockley* [5, 6]. Esta teoría afirma que en equilibrio termodinámico la tasa de generación de pares electrón-hueco es igual a la tasa de recombinación radiativa. La teoría también indica que el tiempo de vida asociado con la recombinación radiativa banda-banda decrece con el incremento de la densidad de los dopantes y con el aumento de las desviaciones de las densidades de portadores con respecto a sus valores de equilibrio.

Este tipo de recombinación resulta más probable en semiconductores de *gap* directo que en semiconductores de *gap* indirecto.

b) *Recombinación Auger:*

Un par electrón-hueco puede recombinarse en forma no radiativa y, de hecho, en muchos semiconductores este es el proceso dominante. En la recombinación *Auger*, la energía entregada por un electrón que se recombina con un hueco es absorbida por otro electrón, el cual finalmente disipa su energía por medio de la emisión de fonones. Esta es una colisión de tres cuerpos en la que no hay emisión de fotones [5].

c) *Recombinación Shockley-Read-Hall (SRH)* o por niveles de atrapamiento:

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. La energía puede ser entregada en esta colisión como fonones, fotones o ambos [6].

d) *Recombinación superficial:*

Las superficies representan un defecto severo en la estructura cristalina, produciendo una gran cantidad de estados permitidos dentro del *gap*. La recombinación superficial

puede ser tratada como un caso especial de *SRH* para una dada densidad de centros distribuidos en una región delgada cerca de la superficie [7], produciendo estados permitidos en el *gap*.

En general los procesos de recombinación ocurren de manera simultánea. La tasa de recombinación total es entonces la suma de las tasas de recombinación debida a cada proceso

1.2.3. Ecuaciones Básicas

Las ecuaciones básicas que rigen el funcionamiento de un dispositivo semiconductor describen tanto el comportamiento estacionario como dinámico de los portadores bajo la influencia de perturbaciones que provoquen el apartamiento de las condiciones de equilibrio térmico. Estas ecuaciones son: la *Ecuación de Poisson*, que relaciona el campo eléctrico con la densidad de carga, las ecuaciones de la densidad de corriente (J), que dan cuenta del movimiento de portadores debido al campo eléctrico (corriente de *drift*) y al gradiente de la concentración (corriente de difusión) y, finalmente, las ecuaciones de continuidad, que establecen la conservación de la carga. A continuación se detallan, por simplicidad, en su forma unidimensional:

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{q}{\epsilon}(p - n + N_D - N_A) \quad (1.3)$$

$$J_e = q\mu_e\xi + qD_e\frac{dn}{dx} \quad (1.4)$$

$$J_h = q\mu_h\xi + qD_h\frac{dp}{dx} \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_e}{dx} = U - G \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_h}{dx} = -(U - G) \quad (1.7)$$

En la *Ecuación de Poisson* (1.3), ξ es el campo eléctrico, p y n son las densidades de huecos y electrones respectivamente, y N_D y N_A son las densidades de los donadores y aceptores (las impurezas se consideran completamente ionizadas, de modo que todas contribuyen a la densidad de carga); q es la carga del electrón y ϵ es la permitividad eléctrica. En las Ecuaciones (1.4) y (1.5) (correspondientes al flujo de electrones y huecos respectivamente), en el miembro derecho se tienen dos términos: el primero corresponde a la corriente debida al campo eléctrico asociada a la movilidad μ , en tanto que el segundo representa la corriente de difusión. Las movilidades (μ_e y μ_h) y los coeficientes de difusión (D_e y D_h) están relacionados a través de las conocidas relaciones de *Einstein* [2, 8]: $D_e = (kT/q)\mu_e$; $D_h = (kT/q)\mu_h$. En las ecuaciones de continuidad (1.6) y (1.7), U representa la tasa neta de recombinación debida a todos los mecanismos, en tanto que G es la tasa neta de generación por procesos externos tales como la iluminación.

Las Ecuaciones (1.3) a (1.7) forman un sistema de ecuaciones diferenciales acoplado para el cual no es posible encontrar soluciones generales analíticas, aunque pueden resolverse numéricamente en una computadora [2].

1.3. Celdas Solares

Para aprovechar los portadores fotogenerados en un material semiconductor, es necesario construir con él un dispositivo: la celda solar. Esta es básicamente una juntura $p-n$ (o $n-p$) de gran área, formada por la unión entre regiones *tipo n* y *tipo p* del material semiconductor.

Cuando se ilumina el dispositivo se genera un exceso de pares electrón-hueco. La asimetría inherente en las propiedades de transporte alienta el flujo de electrones generados en la región p a la región n , y un flujo de huecos en la dirección opuesta.

1.3.1. Características de la Juntura $p-n$

Consideremos dos piezas aisladas de material semiconductor, una *tipo n* y una de *tipo p*. Si se unen como se muestra en la Figura 1.4, se esperaría que por difusión los electrones fluyan desde regiones de alta concentración (lado de *tipo n*) a las regiones de baja concentración (lado de *tipo p*) y lo mismo para los huecos. Sin embargo, los electrones que dejan el lado *tipo n* crean un desequilibrio de carga en esta parte mediante la exposición de los donantes ionizados (carga positiva). Del mismo modo, los huecos que dejan el lado *tipo p* expondrán carga negativa. Por tanto en la zona próxima a la unión aparece una diferencia de potencial llamada “*tensión de difusión*”. A la zona de separación de los dos semiconductores se la llama región de transición, vaciamiento o de colección ya que cuando los portadores de carga llegan a esta región, por difusión desde la zona n o p o por generación de un par hueco-electrón dentro de la misma, el campo eléctrico los separa y los envía a las respectivas zonas p y n .

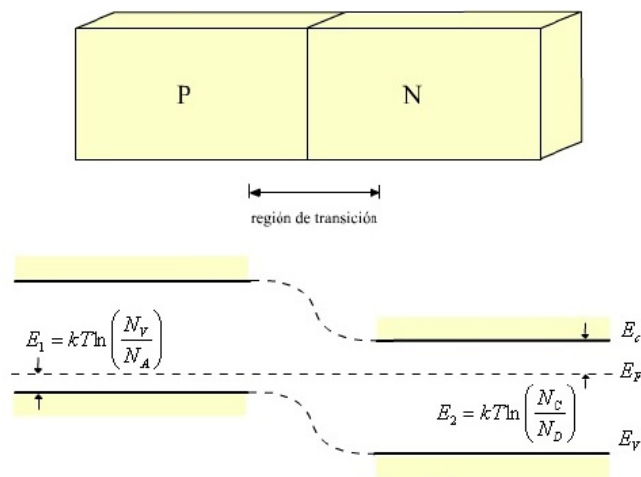


Figura 1.4: Diagrama de bandas de una homojuntura $p-n$ en equilibrio termodinámico.

Las características de la situación de equilibrio se pueden hallar al considerar los niveles de Fermi. Un sistema en equilibrio térmico solo puede tener un Nivel de Fermi [2]. Los detalles típicos del diagrama de bandas se muestran en la Figura 1.4: la *banda de conducción* (E_c), el *nivel de Fermi* (E_F), la *banda de valencia* (E_v), el *band gap* (E_g).

1.3.2. Solución Aproximada para la Corriente de Portadores

La corriente de portadores en las celdas solares (juntura $p-n$) se rige por las ecuaciones básicas de un semiconductor. Como se mencionó en el Sección 1.2.3 las Ecuaciones (1.3) a

(1.7) forman un sistema de ecuaciones diferenciales acoplado para el cual no es posible encontrar soluciones generales analíticas. Sin embargo, haciendo uso de algunas aproximaciones es posible obtener soluciones analíticas razonablemente buenas. Estas aproximaciones son:

- a) El dispositivo se divide en dos regiones: regiones cuasi-neutrales donde la densidad de carga espacial se asume nula (regiones fuera de la zona de transición entre el material *tipo n* y el *tipo p*), y la región de vaciamiento (*depletion region*), donde la concentración de portadores se supone lo suficientemente pequeña como para considerar que la contribución a la densidad de carga espacial proviene sólo de las impurezas ionizadas.
- b) En la región de vaciamiento, para una polarización moderada, el flujo neto de corriente es una pequeña diferencia entre el término de campo eléctrico y el de difusión en las Ecuaciones (1.4) y (1.5), de modo que en tal región resulta [2]:

$$q\mu_e\xi \approx qD_e \frac{dn}{dx} \quad (1.8)$$

$$q\mu_h\xi \approx qD_h \frac{dp}{dx} \quad (1.9)$$

- c) La concentración de los portadores minoritarios es mucho menor que la de los mayoritarios.
- d) En las regiones cuasi-neutrales se puede probar que el flujo de los portadores minoritarios es predominantemente por difusión, es decir:

$$J_e = -qD_e \frac{dn}{dx} \quad (1.10)$$

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx} \quad (1.11)$$

- e) Las corrientes de portadores minoritarios permanecen constantes a lo largo de la región de vaciamiento. Esto se debe a que el ancho W de esta región es generalmente mucho menor que la longitud característica del decaimiento de las corrientes de difusión en las regiones cuasi-neutrales [2], denominada *longitud de difusión*, el cual es un parámetro fundamental en el funcionamiento de una celda solar. Las longitudes de difusión L_e y L_h , está relacionada con los coeficientes de difusión y con los tiempos de vida en la forma [2]:

$$L_e = \sqrt{D_e\tau_e} \quad ; \quad L_h = \sqrt{D_h\tau_h} \quad (1.12)$$

La corriente total de portadores puede ser entonces calculada evaluando las corrientes de huecos y electrones en los bordes de la región de vaciamiento, dando lugar a la expresión para $G = 0$ (en condiciones de oscuridad) [2]:

$$J_{total} = \left(\frac{qD_en_{p0}}{L_e} + \frac{qD_hp_{n0}}{L_h} \right) (e^{qV/kT} - 1) \quad (1.13)$$

donde n_{p0} y p_{n0} son las concentraciones en equilibrio y V es la tensión de polarización. De esta expresión se obtiene la ley del diodo ideal:

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (1.14)$$

donde I_0 es la denominada corriente de saturación del diodo, la cual está dada por [2]:

$$I_0 = A \left(\frac{qD_en_i^2}{L_eN_A} + \frac{qD_hn_i^2}{L_hN_D} \right) \quad (1.15)$$

donde A es el área transversal del diodo.

Al iluminar la juntura se produce generación de pares electrón-hueco que se considera en las ecuaciones mediante la incorporación de la tasa de fotogeneración G que hace aparecer un término constante, independiente de la tensión, que es la corriente fotogenerada I_f [9]. Esta corriente establece una polarización en directa de la juntura por lo cual la corriente del diodo se puede considerar como una pérdida en el dispositivo.

Por simplicidad se supondrá un caso idealizado donde la tasa de generación de pares electrón-hueco por la iluminación es uniforme. Este caso corresponde a la situación física en la cual el dispositivo es iluminado por fotones de energía cercana al *gap*. La radiación sería absorbida débilmente y la generación de pares $e-h$ en el volumen sería aproximadamente constante.

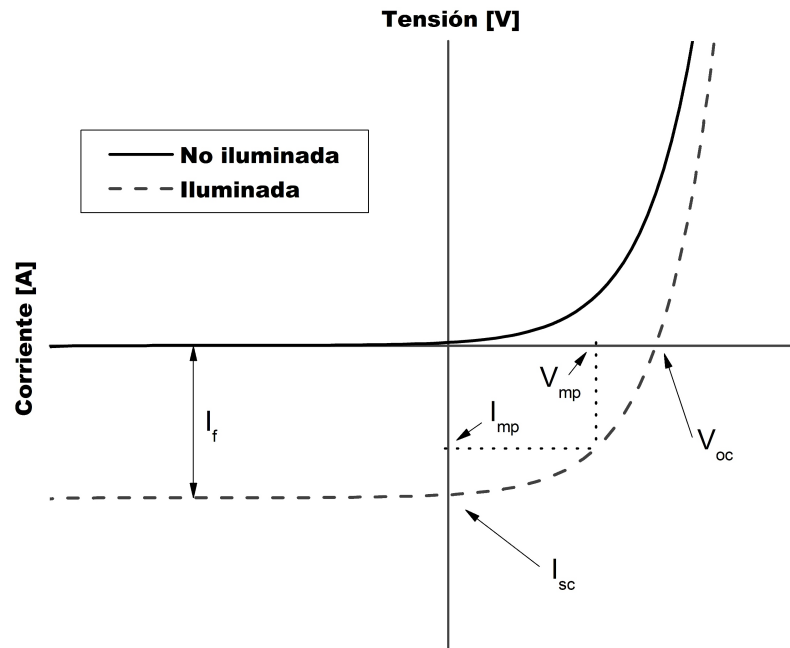


Figura 1.5: Características I-V de un diodo de juntura p-n en condiciones de oscuridad e iluminación.

La incorporación de una tasa de generación G , da el siguiente resultado para la característica corriente-tensión [2]:

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) - I_f \quad (1.16)$$

donde I_0 está dado por (1.15) e I_f tiene el valor:

$$I_f = qAG(L_e + W + L_h) \quad (1.17)$$

En la Figura 1.5 se muestran las características en condiciones de oscuridad e iluminación. La forma de la Ecuación (1.17) sugiere que la corriente fotogenerada I_f tiene un

valor igual al que se esperaría si todos los portadores generados por la luz en la región de vaciamiento del diodo y dentro de una longitud de difusión de los portadores minoritarios a cada lado de ésta región contribuyeran a la corriente. Este volumen define la región activa de colección de una celda solar de juntura $p-n$ [2].

1.3.3. Parámetros de Salida de las Celdas Solares

Los parámetros normalmente utilizados para la caracterización eléctrica de una celda solar son [2]:

Corriente de cortocircuito (I_{sc} , *short circuit current*): es el punto de la característica $I-V$ correspondiente a $V = 0$ el cual, idealmente, coincide con la corriente fotogenerada I_f , según se puede ver en la Figura 1.5. A partir de la corriente de cortocircuito puede definirse la *Densidad de Corriente de corto circuito* (J_{sc}) como el cociente entre la corriente de cortocircuito y el área total de la celda.

Tensión de circuito abierto (V_{oc} , *open circuit tension*): Para $I = 0$, se puede obtener el valor ideal de V_{oc} despejando de (1.16):

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_f}{I_0} + 1 \right) \quad (1.18)$$

V_{oc} está determinada por las propiedades del semiconductor a través de su dependencia con I_0 . En el cálculo de la ecuación del diodo ideal se supuso a la juntura formada por la unión de materiales *tipo n* y *p* infinitamente extensos. Este no es el caso en un dispositivo real: la corriente de saturación I_0 (y por lo tanto V_{oc}) se modifica por la influencia de la recombinación superficial en las superficies expuestas.

Factor de Forma (FF , *fill factor*): El punto particular de operación del dispositivo (V_{mp} , I_{mp}) que se observa en la Figura 1.5, corresponde al que hace máxima la potencia de salida. El factor de forma se define como:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.19)$$

y es una medida de cuan cuadrada es la característica de salida. Idealmente, es solo función de la tensión de circuito abierto V_{oc} [2].

Finalmente, la eficiencia de conversión está dada por:

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (1.20)$$

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

1.3.4. Circuito Equivalente

La resistencia de los contactos, la resistencia de contacto metal–semiconductor, y la resistencia del semiconductor que constituye la celda solar, son contribuciones a lo que se denomina resistencia serie de la celda. Por otra parte, existe también una resistencia paralelo causada por pérdidas en la juntura en zonas cercanas al borde de la celda, y la presencia de defectos cristalinos y el precipitado de impurezas en la zona de la juntura. El funcionamiento de una celda solar puede ser descrito en términos de un dispositivo que provea un resultado equivalente, el cual es representado esquemáticamente por el

circuito de la Figura 1.6. El circuito equivalente consta de una fuente de corriente que representa la fotogeneración (I_f), una impedancia no lineal dada por la juntura (R_j), y las resistencias serie (R_s) y paralelo (R_p), más una eventual resistencia de carga asociada al circuito externo (R_c).

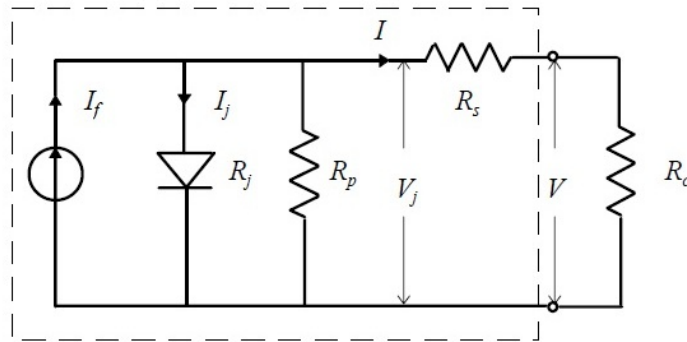


Figura 1.6: Circuito equivalente de una celda solar en condiciones de iluminación.

1.3.5. Celdas Solares Mono-juntura y Multi-juntura

Distinguiremos entre dos tipos de estructuras de celdas, las mono o simple-juntura (SJ), basadas en una sola juntura $p-n$, de ahí su nombre, que puede ser tanto homojuntura (semiconductor A – semiconductor A) o heterojuntura (semiconductor A – semiconductor B) y las multi-junturas (MJ) que pueden tener 2 o más junturas $p-n$ y que a su vez pueden ser homojunturas, heterojunturas o combinar homojunturas con heterojunturas.

Entre las celdas mono-juntura podemos mencionar a las de Si, GaAs o Ge, este tipo de celdas (principalmente las de silicio) son todavía utilizadas debido principalmente al menor costo y al mayor tiempo presentes en el mercado mundial que las multi-juntura. Sin embargo, en los últimos años ha crecido el mercado de las MJ de la mano de la industria aerospacial y de la alta eficiencia de éstas en aplicaciones terrestres con concentración.

La principal ventaja de las celdas MJ, y de ahí su alta eficiencia, es la utilización de materiales con distinto *band gap* (E_g) de modo que cada uno absorbe una porción diferente del espectro solar (Figura 1.7). Cada celda, mirando desde la cara frontal hacia la posterior, posee menor *band gap* que la precedente, diseño que permite que los fotones menos energéticos pasen a través de las subceldas superiores y sean absorbidos por las subceldas inferiores.

Existen dos tipos de configuraciones para una celda multi-juntura [10]. En una de ellas las mono-juntura están físicamente separadas y unidas entre sí mecánicamente, de modo de formar un “paquete” relativamente compacto (*mechanical stack*). Esta configuración requiere que todas las mono-juntura, excepto la que está abajo, sean transparentes a la luz por debajo de sus *band gaps*. Otro modo de obtener una multi-juntura es fabricar todas las mono-juntura de modo de formar una estructura monolítica sobre un mismo sustrato (*celda monolítica o tándem*).

Para un conjunto de m subceldas conectadas en serie (como en el caso de las tándem) con sus respectivas curvas $I_i - V_i$ descritas como $V_i(I)$ para el i -ésimo dispositivo, la curva $I-V$ para la multi-juntura está dada por:

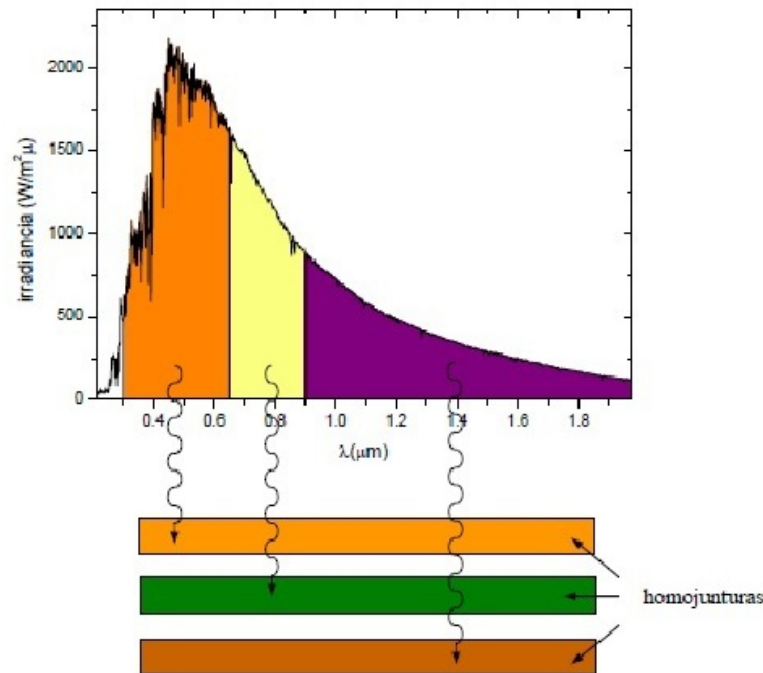


Figura 1.7: Esquema de absorción de la radiación de una celda triple-juntura.

$$V(I) = \sum_{i=1}^m V_i(I) \quad (1.21)$$

es decir que la tensión a una dada corriente es equivalente a la suma de las tensiones de las subceldas a una dada corriente. Además existe una única corriente que circula por las subceldas, de manera tal que la misma se encuentra limitada por la menor corriente de cortocircuito.

1.3.6. Límites de Eficiencia

Si bien ha habido un continuo incremento de la eficiencia desde el primer dispositivo construido en 1941 ($\eta < 1\%$) hasta más del 32% en nuestros días, correspondiente al tipo de celdas multi-juntura GaInP/GaAs/Ge, o 42% para dispositivos que usan radiación concentrada por métodos ópticos [1], existen límites fundamentales relacionados con los procesos y leyes físicas que ocurren en la conversión fotovoltaica que impiden, por más que se mejore el diseño, obtener eficiencias mayores que un cierto límite.

Las causas para la existencia de límites de eficiencia, pueden ser divididas en dos categorías distintas. La primera son las *Pérdidas Extrínsecas*, tales como la resistencia serie, recombinación parasitaria y sombras de contactos, pueden limitar sustancialmente la eficiencia del dispositivo, sin embargo, son teóricamente evitables. La segunda son las *Pérdidas Intrínsecas* que son inevitables en el diseño de dispositivos y siguen presentes en una celda solar idealizada [11].

Pérdidas Extrínsecas

Como se mencionó anteriormente, este tipo de pérdidas son teóricamente evitables y dependen pura y exclusivamente del diseño y método de fabricación por lo que solo des-

cribiremos brevemente algunas de ellas.

Los defectos presentes en la estructura cristalina, particularmente la superficie, dan lugar a niveles de atrapamiento en el *gap*, posibilitando la recombinación del tipo *SRH*. Este suele ser un factor limitante de importancia dependiendo, además, del material de partida y de la introducción de impurezas y efectos de *gettering* (captura de impurezas en zonas no activas del dispositivo) que se producen en el proceso de fabricación [12]. Los contactos de una celda solar están hechos de metales de buena conductividad eléctrica, pero no infinita. Debido a esto tendrán entonces asociadas pérdidas óhmicas. Asimismo se tendrá una resistencia de contacto en la interfaz metal-semiconductor que originará pérdidas del mismo tipo. Aunque existen diseños de celdas con los contactos depositados en su totalidad en la cara posterior [13], la sombra producida por la grilla de contactos frontal produce el bloqueo de parte de la radiación incidente en la celda. Otras fuentes de pérdidas son la reflectividad de la cara frontal y la transmisividad de la cara posterior. Si bien se realizan tratamientos antirreflectantes que reducen considerablemente la reflectividad, la reflectividad de la cara frontal nunca es 0. Tampoco la reflectividad en la cara posterior puede llegar a ser total.

Pérdidas Intrínsecas

Existen cinco procesos que generan pérdidas intrínsecas, estos son [11]:

Pérdida de fotones de energía por debajo de E_g : Parte del espectro solar no puede ser absorbido por tener fotones de energía menor a E_g . Este tipo de pérdida puede ser reducido drásticamente en celdas multi-juntura

Pérdida por Termalización: La fuerte interacción entre portadores excitados y los fonones de la red introduce una pérdida por termalización en la medida que los portadores decaen hacia el borde de la banda prohibida.

Pérdida por Emisión: Las pérdidas debidas a la fluorescencia que se emite desde la celda debido a la recombinación radiativa de pares $e-h$, siempre que la radiación producto de este mecanismo no sea nuevamente absorbida en el semiconductor.

Pérdida de Carnot: Una celda solar puede ser considerada una máquina térmica donde el calor fluye desde un depósito caliente (el *Sol*) a un depósito frío (la atmósfera) haciendo trabajo en el proceso. La conversión de energía térmica en eléctrica requiere el sacrificio de un poco de energía en el depósito frío y por lo tanto siempre habrá pérdida de energía. En una celda solar, esta pérdida se manifiesta como una caída de tensión a la que se refiere como el factor de *Carnot*. Esta pérdida solo puede ser eliminada en el límite de un gradiente térmico infinito entre el *Sol* y la celda solar.

Pérdida de Boltzmann: Por último, la desigualdad entre los ángulos de absorción y emisión resultan en un proceso de generación de entropía por la expansión de los modos de los fotones. Esta pérdida se puede reducir en celdas con concentración o con ángulo de emisión restringido.

Estas pérdidas definen las características corriente-voltaje de un dispositivo. Un balance detallado de estos procesos conduce al cálculo de la eficiencia límite en condiciones normalizadas, en la Figura 1.8 puede verse cuanto afecta cada proceso para cada E_g a la

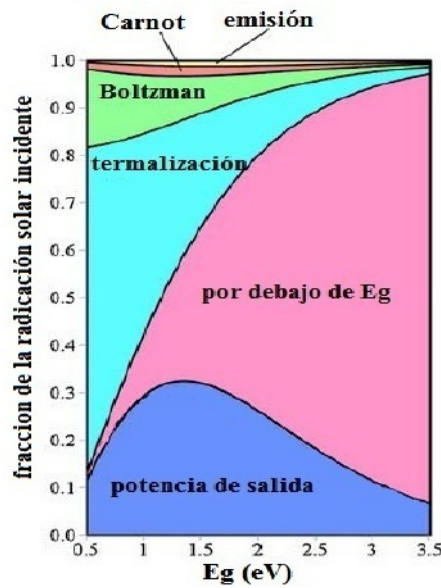


Figura 1.8: Procesos de pérdida intrínseca y, por tanto, de Potencia. Estos se muestran de forma dependiente con E_g .

potencia de salida. Esta eficiencia límite fundamental esta lejos de ser de ser la eficiencia máxima límite en la conversión fotovoltaica. Una simple mejora de diseño como puede ser concentrar la radiación solar con lentes o espejos, reduce la caída de tensión asociada a la pérdida de *Boltzmann* e incrementa la eficiencia.

Otra forma de aumentar la eficiencia ya mencionada anteriormente es por medio de las celdas multi-juntura, Henry [14] calculó la eficiencia límite en condiciones AM1,5, para 1, 2, 3 y 36 *band gaps*; las eficiencias respectivas son 37, 50, 56 y 72%. En la Figura 1.9 se muestra cuanto afecta cada proceso de pérdida en función del número de juntas. Se observa que los mecanismos de pérdida son dependientes con el número de juntas en el dispositivo.

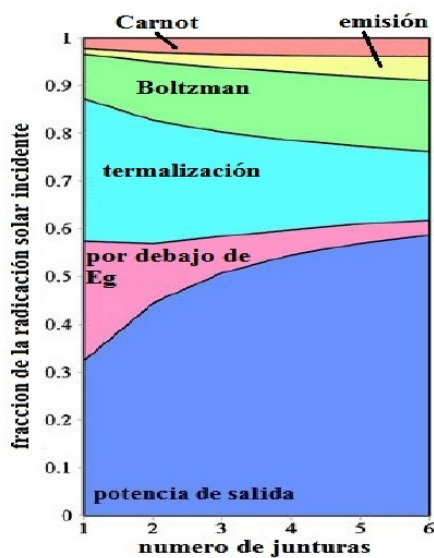


Figura 1.9: Procesos de pérdida intrínseca y, por tanto, de potencia en dispositivos multi-juntura. En cada caso se utilizaron Band Gaps óptimos.

Capítulo 2

Respuesta Espectral

La *Respuesta Espectral* (RE) de una celda solar la caracteriza desde el punto de vista electrónico y se define como la corriente de cortocircuito por unidad de potencia incidente de luz monocromática, en función de la longitud de onda [15]:

$$RE(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} = \frac{J_{sc}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (2.1)$$

donde $I_{sc}(\lambda)$ es corriente de cortocircuito para la longitud de onda λ y $P_{in}(\lambda)$ es la potencia de luz incidente sobre la celda para la longitud de onda λ , $J_{sc}(\lambda)$ es la densidad de corriente de la celda para la longitud de onda λ y $E(\lambda)$ es la irradiancia con que se ilumina por longitud de onda. Las unidades de la RE son Amper/Watt. En condiciones de cortocircuito, la corriente es lineal con la irradiancia y poco sensible frente a pequeños cambios de tensión, dependiendo dicha corriente de la longitud de onda incidente. La RE se mide usando la corriente de cortocircuito, y por lo general es la misma que la fotocorriente a excepción de las celdas en que la generación de corriente depende de la tensión, como los dispositivos de *a-Si*. Los dispositivos fotovoltaicos funcionan normalmente cerca de su punto de máxima potencia; se supondrá entonces que la RE es la misma en la máxima potencia que en los puntos de corto circuito.

La *Respuesta Espectral* es esencial para la comprensión de la generación, recombinación, y mecanismos de difusión de dispositivos fotovoltaicos y es por ello que la comunidad fotovoltaica ha diseñado muchos sistemas para la medición de RE a lo largo de los años. Se pueden encontrar basados en filtros de interferencia, monocromadores e interferómetros [16]. Además día a día se incorporan equipos que utilizan nuevas tecnologías como ser láseres o LEDs [17].

Para determinar la RE de una celda mono-juntura se ilumina esta con luz monocromática pulsada (*choppeada*) y con otra fuente de luz continua mucho mas intensa que coloca a la celda en condiciones de funcionamiento. La corriente alterna que produce la luz monocromática pulsada se convierte en una caída de tensión y es medida con un amplificador *lock-in*: generalmente la fotocorriente pulsada generada toma valores entre los μA y los mA.

Distinguiremos entre *Respuesta Espectral absoluta* (RE) y la *Respuesta Espectral relativa* (RE_{rel}), la primera queda definida mediante la Ecuación (2.1), mientras que la RE_{rel} la definiremos como la RE absoluta normalizada. Esta normalización puede ser hecha dividiendo la RE para cada longitud de onda por la RE máxima medida, esto es:

$$RE_{rel}(\lambda) = \frac{RE(\lambda)}{RE_{max}(\lambda_0)} \quad (2.2)$$

siendo RE_{max} la *Respuesta Espectral* máxima y λ_0 la longitud de onda donde se midió la máxima RE . También se puede obtener la RE_{rel} dividiendo la RE para cada longitud de onda por la RE en alguna longitud de onda conveniente [18].

2.1. Medición de la Respuesta Espectral Absoluta

La determinación de la RE absoluta requiere del conocimiento de la energía contenida en el haz con la que se la ilumina. Para ello se puede utilizar un radiómetro piroeléctrico o un fotodetector calibrado, de manera de medir la potencia incidente, luego la corriente de cortocircuito y utilizar la Ecuación (2.1) para calcular la RE . Sin embargo podemos independizarnos de la necesidad de conocer la energía contenida en el haz (y con ello del radiómetro o fotodetector) si la RE se calcula sobre la base de una celda calibrada en *Respuesta Espectral*. Este cálculo se realiza por comparación según la expresión:

$$RE^{cel}(\lambda) = \frac{A^{ref} V^{cel}(\lambda)}{A^{cel} V^{ref}(\lambda)} RE^{ref}(\lambda) \quad (2.3)$$

donde V^{cel} y V^{ref} son las tensiones medidas (sobre una resistencia en serie con la celda y por lo tanto proporcionales a la corriente de cortocircuito) para las celdas a medir y de referencia respectivamente, A^{cel} y A^{ref} son las áreas activas de las celdas a medir y de referencia respectivamente, y RE^{ref} es la *Respuesta Espectral* absoluta de la celda de referencia. Se hace evidente que la proporcionalidad entre tensión medida y corriente de cortocircuito deben ser las mismas en el caso de la celda a medir y referencia de manera de que la comparación sea válida. En cuanto A^{cel} y A^{ref} , si las celdas a medir y la referencia son geoméricamente iguales tanto en forma como en distribución y características de los contactos frontales, el cociente de estos parámetros en la Ecuación (2.3) puede ser tomado como la unidad sin problemas; pero en el caso de celdas diferentes en forma o en distribución y características de los contactos frontales será necesario tener en cuenta este factor. Como la *Respuesta Espectral* absoluta depende del área efectivamente iluminada de la celda, las líneas que definen el contacto frontal y que bloquean la iluminación monocromática deben tenerse en cuenta, o sea deben restarse del área iluminada de la celda. Cualquier error en las mediciones de área se transfieren directamente a la *Respuesta Espectral* absoluta, por esta razón deben minimizarse [19].

En la Figura 2.1 se muestra la *Respuesta Espectral* típica de una celda de silicio cristalino (la *Eficiencia Cuántica (QE)* se definirá en la Sección 2.3). Dado que para longitudes de onda cortas (típicamente 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 RE 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 [2].

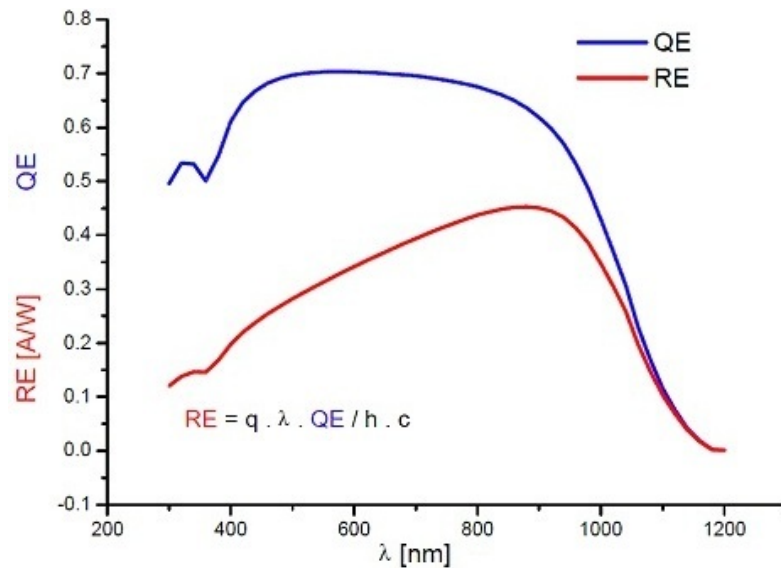


Figura 2.1: Respuesta Espectral típica de una celda de silicio cristalino.

2.1.1. Método Normalizado de Medición de Respuesta Espectral en Mono-junturas

El método para la determinación de la *Respuesta Espectral* relativa o absoluta de una celda fotovoltaica lineal (la linealidad de un dispositivo fotovoltaico, se refiere a la linealidad de su corriente de cortocircuito con la irradiancia en determinado intervalo) según Normas IRAM [19] y ASTM [18], 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 [18], como es el caso de la mono-juntura 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) y el haz de luz pulsado.

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 aproximadamente igual a aquella 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.

Estas normas definen los conceptos referidos a *Respuesta Espectral* absoluta y relativa, como también las características básicas que deberá cumplir el equipo de medición [19]:

- Para la generación de la radiación luminosa monocromática, deben utilizarse alguna de las alternativas siguientes: monocromadores de prismas o de red de difracción, que utilizan 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 estrecha, 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. Esta 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 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, medir la corriente de cortocircuito de la celda de referencia es equivalente a la medición de la potencia de la luz monocromática incidente.

2.2. Respuesta Espectral en Celdas Solares Multi-juntura

Para medir la *Respuesta Espectral* en celdas solares multi-juntura 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 2.2, donde se esquematiza una celda triple-juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica o tándem. Se representa la grilla de contacto frontal, el contacto posterior y la capa antirreflectante que se utiliza para maximizar la energía absorbida.

A fin de seleccionar la subcelda a medir, se aprovecha la característica constitutiva de la multi-juntura donde las subceldas están conectadas eléctricamente en serie entre sí, 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. Una vez seleccionada la subcelda a medir el procedimiento de medición es análogo al utilizado en celdas mono-juntura, pero la luz monocromática debe estar definida sobre un intervalo de longitudes de onda que incluya la respuesta de todas las subceldas.

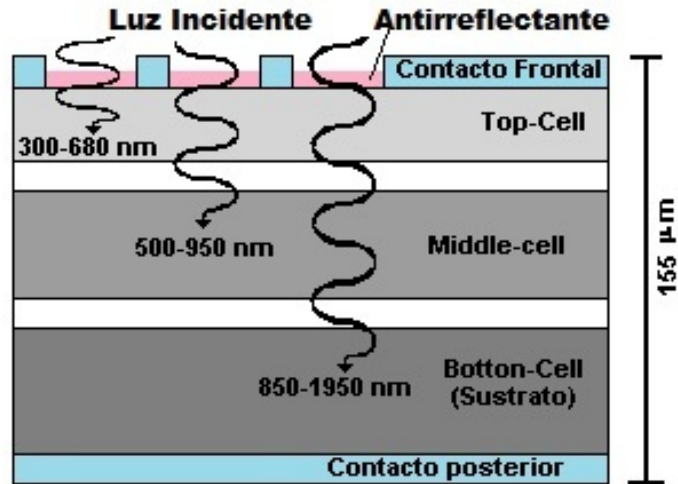


Figura 2.2: Esquema de una celda triple-juntura InGaP/GaAs/Ge. Pueden apreciarse las subceldas top (Superior, de InGaP), middle (Media, de GaAs) y bottom (Inferior, de Ge).

Por otra parte, es necesario distinguir entre la caída de tensión en los terminales de la celda y la tensión de operación de cada subceldas 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, es decir $V_{cel} = 0$, no significa que la caída de tensión en la subcelda a medir sea 0 [20]. En el caso de una celda multi-juntura esta condición no implica que cada subcelda esté en cortocircuito, sino que cada una resulta polarizada en inversa por las otras dos. En la Figura 2.3 se observa como limitando la celda de germanio (*bottom*) de una celda triple-juntura de InGaP/GaAs/Ge las dos subceldas superiores (*top* y *middle*) trabajan en conjunto en un valor cercano a la suma de sus tensiones de circuito abierto y que por este hecho si la caída de tensión en el circuito externo es 0 la celda de Ge esta polarizada con $V_{Ge} = -(V_{GaAs} + V_{InGaP})$

Si la tensión de ruptura no es muy pequeña y las celdas tienen una resistencia paralelo alta, es decir si realmente la celda funciona como un diodo ideal, esto no representa un problema y la medición puede hacerse, colocando la tensión de la celda en cero, 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-junturas mencionadas anteriormente), hay que seguir un procedimiento más cuidadoso para colocar dicha subcelda en condiciones de cortocircuito. Una discusión mas detallada acerca de los problemas que pueden aparecer en la medición de la RE en multi-junturas se encuentra en Meusel et al. [20].

La Figura 2.4 muestra la RE típica de una celda de triple-juntura estructura monolítica [21]. Se aprecian tres curvas diferentes, cada una correspondiente a una subcelda y cada una diferente de cero en la zona donde esa subcelda tiene respuesta.

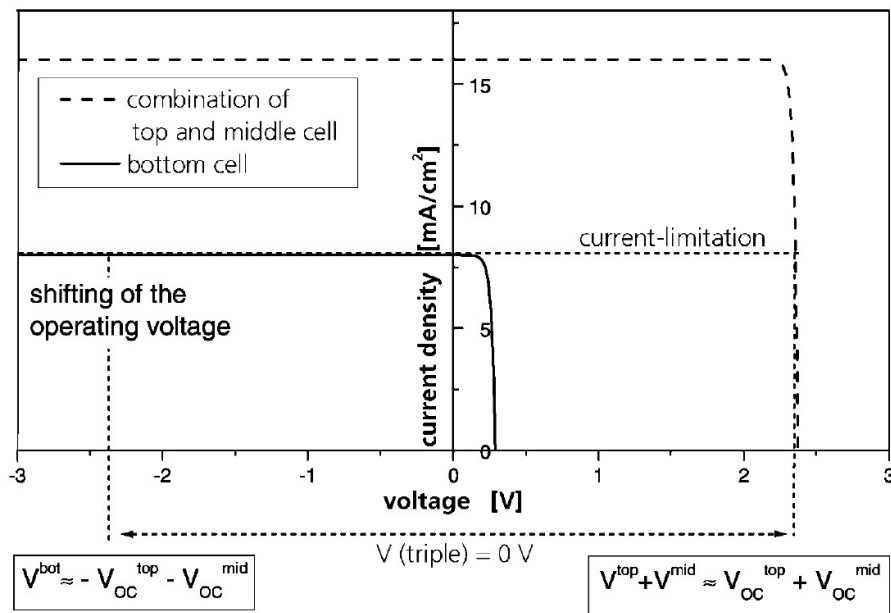


Figura 2.3: Ejemplo de limitación de corriente y cambio en la tensión de operación, visualizado por las curvas I-V calculadas con la ecuación del diodo ideal [20].

2.2.1. Método Normalizado de Medición de Respuesta Espectral en Multi-junturas

Al igual que para el caso de celdas mono-juntura, existen normas para la medición de *Respuesta Espectral* de celdas multi-juntura. 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 multi-junturas no ha sido confeccionada, pero si existe la norma ASTM de medición de *RE* en celdas MJ [22].

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 espectro variable, de manera de poder seleccionar cada subcelda variando el contenido espectral de luz de polarización. Esta fuente puede ser un simulador solar ajustable espectralmente o una fuente luminosa de intensidad adecuada y una serie de filtros.
- Celdas de referencia 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 de corto circuito. El circuito externo para polarizar y la fuente de polarización eléctrica debe ser compatible 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:

- Colocar el dispositivo bajo estudio en el equipo de medición

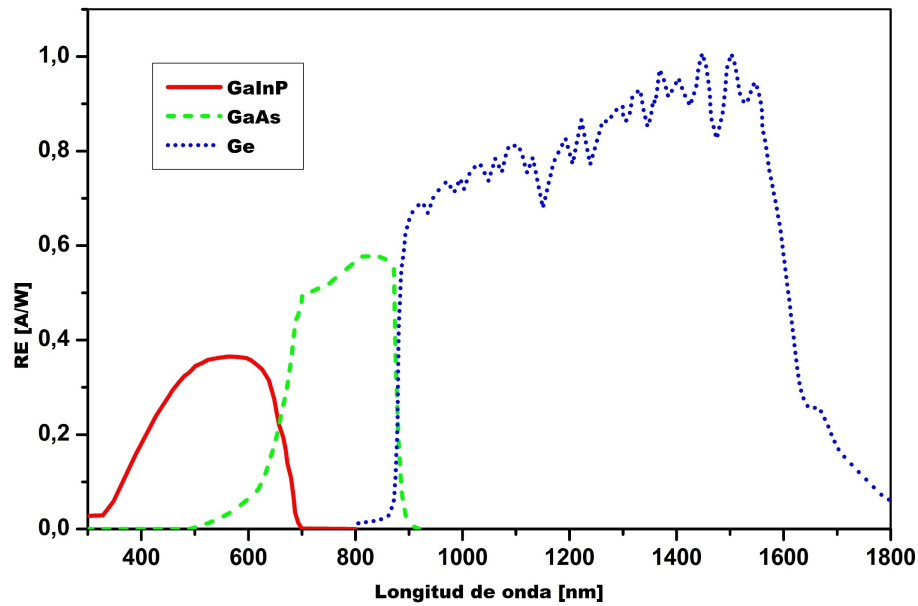


Figura 2.4: Curva característica de RE de una celda triple-juntura InGaP/GaAs/Ge [21].

- 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_{oc}) 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 igual que en el caso de 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 tienen por que cumplir con las normas y procedimientos aquí enunciados. Sin embargo es aconsejable tener conocimiento de estas normas y tenerlas en cuenta a la hora de diseñar un equipo y de realizar mediciones con este. De esta forma será más fácil la comparación de mediciones realizadas en diferentes equipos.

2.3. Eficiencia Cuántica y Corriente Fotogenerada

Como ya se mencionó anteriormente la *Respuesta Espectral* caracteriza a la celda desde el punto de vista electrónico, y permite calcular entre otros la *Eficiencia Cuántica Externa* (EQE , por su sigla en inglés), *Eficiencia Cuántica Interna* y *Corriente de Cortocircuito* que tendrá la celda al ser iluminada con un determinado espectro.

Definiremos la *Eficiencia Cuántica Externa* (externa porque tiene en cuenta la transmitancia óptica de la capa antirreflectante además de las características electrónicas de la celda) como el cociente, expresado en porcentaje, entre el número de electrones que circulan en el circuito externo por unidad de tiempo (n_e) y el número de fotones incidentes sobre la celda (n_f), esto es [23]:

$$EQE(\lambda) = \frac{n_e(\lambda)}{n_f(\lambda)} \quad (2.4)$$

Considerando que $n_e = I t/q$ y que $n_f = P_{in}(\lambda) t/h\nu$, donde I es la corriente que circula por el circuito generada por la luz monocromática, t el tiempo, q la carga del electrón, h la constante de *Planck*, ν la frecuencia y $n_f = P_{in}(\lambda)$ es la potencia de luz incidente de la luz monocromática sobre la celda. La relación entre la *Respuesta Espectral Absoluta* y la *Eficiencia Cuántica Externa* está dada por [23]:

$$EQE(\lambda) = \frac{hc RE^{cel}(\lambda)}{q \lambda} \quad (2.5)$$

donde c es la velocidad de la luz. Un ejemplo de la EQE típica de una celda de silicio cristalino puede verse en la Figura 2.1.

A partir de la EQE y la reflectividad de la celda en estudio se define *Eficiencia Cuántica Interna* como:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE}{1 + R} \quad (2.6)$$

donde R la reflectividad de la muestra.

Finalmente, conocida la RE y el espectro de la radiación incidente bajo la cual va a trabajar la celda, se puede calcular su densidad corriente de corto circuito J_{sc} :

$$J_{sc} = \int RE(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (2.7)$$

siendo $E(\lambda)$ la irradiancia por longitud de onda del espectro de iluminación a utilizar.

2.4. Posibles Errores en la Medición de Respuesta Espectral

Medir la *Respuesta Espectral* requiere la medición de la fotocorriente producida por la luz en una determinada longitud de onda y potencia. La fotocorriente es medida con conversores corriente-tensión, de los cuales existen y se usan varios formatos, por ejemplo: amplificadores operacionales de potencia con resistencias de ganancia controlada por computadora, una simple resistencia para sensar la corriente, que puede ser adecuada para los sistemas que miden el mismo tipo de dispositivo fotovoltaico todo el tiempo, preamplificadores comerciales de corriente, un amplificador operacional configurado como un convertor de corriente-tensión que permite la inserción de una fuente de alimentación en serie con el dispositivo fotovoltaico, dando una amplia gama de voltajes de polarización (esta característica es fundamental para medir en dispositivos multi-juntura), un amplificador *lock-in* para detectar la señal de corriente periódica (utilizado en la mayoría de los casos). Todos estos métodos introducen fuentes de errores en la medición de la fotocorriente.

A continuación se listan las fuentes de errores más comunes en la medición de la fotocorriente [15, 16]:

I- Del instrumental electrónico:

- a) Conversión de corriente a tensión: ganancia, linealidad, ruido, *Offset*, calibración, derivas, termovoltajes
- b) Adquisición de la señal del convertor corriente-tensión con:
 1. Amplificador *lock-in*: calibración, resolución, precisión, factor de corrección de forma de onda, sobrecarga, ruido, rango dinámico, constante de tiempo.
 2. Voltímetro de *CA*: ganancia, *Offset* del nivel de ruido, linealidad, constante de tiempo.

II- De la celda fotovoltaica:

- a) Temperatura [24], tiempo de respuesta con relación a la perturbación monocromática, linealidad de la celda, uniformidad espacial de la luz monocromática, medición de la tensión de polarización en la celda, contenido espectral de la luz de polarización.

III- De lo mecánico del arreglo:

- a) Movimientos de la óptica, vibraciones, haz *choppeado* monocromático errante.

Estas fuentes de errores pueden o no estar presentes, y pueden o no ser importantes comparadas entre sí. Para el caso en que la *RE* se mide por comparación con una celda calibrada en *RE*, muchos de estos factores desaparecen, si se miden la referencia y la celda bajo estudio con el mismo amplificador y demás electrónica [15, 16].

También para medir la *Respuesta Espectral* se requiere conocer la intensidad de la luz de polarización y del haz monocromático. Medir esta intensidad tiene asociado introducir errores en el cálculo de la *RE*. Estos errores pueden provenir por ejemplo de fluctuaciones en la intensidad y características espectrales de los haces por envejecimiento de las lámparas o fluctuaciones en las corrientes que circulan por las mismas.

Si la intensidad de los haces es medida en tiempo real hay que considerar el ruido, las características del detector, la deriva con el tiempo de calibración del detector. Si en cambio se usa una calibración guardada de los haces hay que considerar la deriva de esta calibración con el tiempo. En todos los casos hay que tener en cuenta la luz dispersa o parásita, que puede afectar de manera diferente a la referencia con respecto a la celda a medir, sobre todo si las áreas de una y otras son diferentes. Es importante señalar que la medida de la intensidad de los haces incorpora los errores asociados a la electrónica mencionadas para el caso de la medición de la fotocorriente.

Finalmente existen errores asociados solamente al haz monocromático. Algunos ejemplos son: defectos en los filtros, variación de la polarización con la longitud de onda, corrimientos en la longitud de onda, cambios con la temperatura en la longitud de onda, luz choppeada dispersa, sombras y variación de respuesta espacial en el dispositivo fotovoltaico [15, 16].

Capítulo 3

Dispositivo Experimental y Adquisición de Datos

Parte de las actividades programadas en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales argentinas en el *Departamento Energía Solar* (DES) (ex Grupo Energía Solar) de la *Comisión Nacional de Energía Atómica* (CNEA) [25–28] está referida al estudio de celdas solares multi-juntura basadas en materiales semiconductores III-V y, en particular, a su caracterización eléctrica y electrónica [29]. Los requerimientos de potencia y el área disponible determinaron que dichas celdas serán las utilizadas para la integración de los paneles de vuelo de las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D de la *Comisión Nacional de Actividades Espaciales* (CONAE) Parte de la mencionada caracterización incluye la medición de *Respuesta Espectral* de dispositivos fotovoltaicos.

Con anterioridad fue desarrollado en el DES un equipo apto para la medición de la *RE* de celdas solares mono-juntura de silicio cristalino [30, 31] con el cual se realizaron, por ejemplo, mediciones que fueron parte de la evaluación del daño por radiación sobre celdas y sensores de silicio [26, 30, 32, 33]. Este equipo está formado por dos fuentes luminosas, una para la radiación monocromática y otra para la luz de polarización, una serie de filtros ópticos de interferencia de banda angosta que definen la longitud de onda monocromática incidente sobre el dispositivo, un amplificador *lock-in* que permite medir la perturbación introducida por la radiación monocromática, un circuito externo que pone a la celda bajo estudio en condiciones de cortocircuito, y una base termostatazada que mantiene a la celda a temperatura controlada.

Para poder medir la *RE* de las subceldas que componen una celda multi-juntura de estructura monolítica, es necesario introducir modificaciones en el equipo descrito en el párrafo anterior. A fin de seleccionar la subcelda a medir, se aprovecha la característica constitutiva de la multi-juntura donde las subceldas están conectadas eléctricamente en serie entre sí, 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.

3.1. Arreglo Experimental Inicial

Como ya se mencionara, el equipo utilizado en este trabajo fue originalmente desarrollado para la medición de la respuesta espectral en celdas de silicio, por lo que se expondrá a continuación la historia y características iniciales del equipo.

En el desarrollo del equipo se tuvieron en cuenta las normas ASTM e IRAM [18, 19] de las cuales se habló en la Sección 2.1.1. En base a estas normas se optó por utilizar dos fuentes luminosas. Una de ellas se utiliza para generar la radiación monocromática por medio de una lámpara halógena de tungsteno de 250 W con ventilación forzada, con un diseño óptico que asegura una homogeneidad en el plano de medición de $\pm 2.5\%$ en un área aproximada de 6 cm \times 8 cm (suficiente para medir varios formatos y tamaños de celdas), como se muestra en la Figura 3.1. Se determinó asimismo que la distancia mínima entre la fuente monocromática y la base debe ser de 95 cm (Figura 3.3.I), a fin de lograr una homogeneidad en la intensidad del haz que cumpla las especificaciones de las normas antes expuestas.

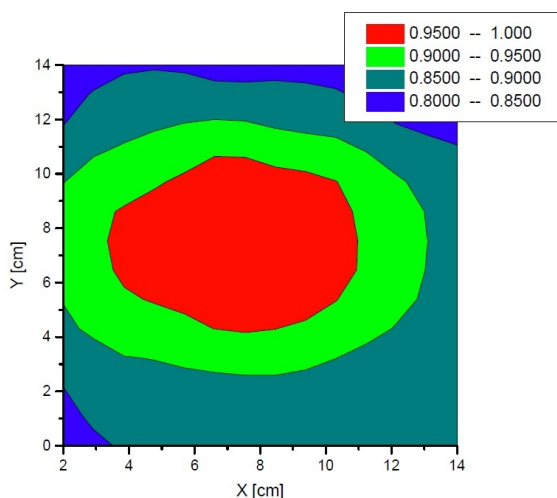


Figura 3.1: Distribución de intensidad de la luz monocromática en unidades normalizadas al máximo valor de intensidad.

La otra fuente luminosa es la luz de polarización que se pone a la celda a medir en condiciones similares a las de funcionamiento; dicha luz de polarización es provista por una lámpara halógena con deflector dicróico de 150 W, también con ventilación forzada y esta colocada a una distancia aproximada del plano de medición de unos 35 cm para lograr una homogeneidad de $\pm 10\%$ en un área aproximada de 10 cm \times 9 cm, según se ve en la Figura 3.2, que es el requisito de las normas antes mencionadas. Esta lámpara está montada en un soporte especialmente diseñado para incluir hasta dos filtros de interferencia pasabanda con el fin de modificar su espectro de iluminación (Figura 3.3.III). La distancia entre la lámpara y los soportes para los filtros se fijó en 15 cm a fin de que no se produjeran sombras sobre el plano de medición.

La fuente de luz utilizada para generar la radiación monocromática es acondicionada por un condensador formado por dos lentes plano-convexas de cuarzo ($\phi = 50,8$ mm) de modo que el haz pueda ser interceptado por un conmutador (*chopper*) colocado en el foco imagen del condensador. Luego el haz atraviesa los filtros de interferencia óptica de banda angosta (10 nm) que cubren el intervalo de 300 nm a 1100 nm con 50 nm de diferencia entre ellos, para un total de 17 filtros. Estos están montados en una rueda de aluminio anodizado, que gira en el plano perpendicular al haz monocromático, que permite un cambio de éstos filtros de modo rápido y reproducible. Recordamos que la cantidad de longitudes de onda requeridas por las normas son 12.

La fuente de luz monocromática, el condensador, el conmutador y los filtros están

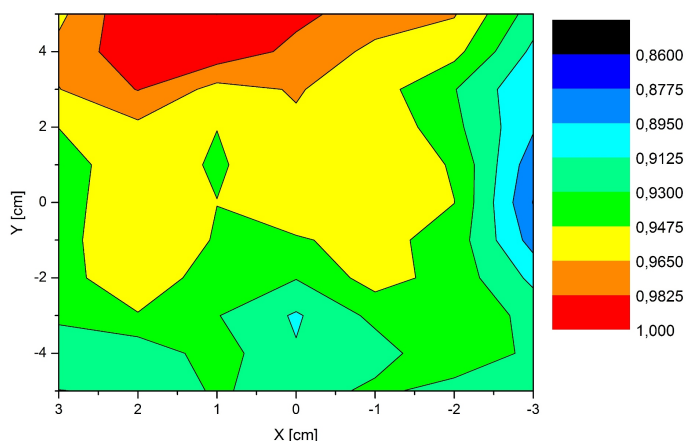


Figura 3.2: Distribución de intensidad de la luz de polarización en unidades normalizadas al máximo valor de intensidad.

montados sobre una columna en forma alineada y separada, de modo de que la distancia entre la luz monocromática y el plano de medición se pueda variar para asegurar siempre la homogeneidad requerida. También se observa que la lámpara de polarización, está montada sobre un aro de forma de poder moverla para asegurar la homogeneidad requerida. En la Figura 3.3, puede verse el estado del equipo al comenzar con el presente trabajo. Se puede observar en esta figura que el soporte de la refrigeración de la fuente de luz monocromática y de polarización es independiente al soporte de los demás elementos del sistema de manera de evitar introducir vibraciones en el equipo. Además todo el equipo tiene las superficies expuestas de color negro mate para así minimizar reflexiones que puedan afectar las mediciones.

Como ya se mencionó, para medir RE se debe colocar a la celda en condiciones de cortocircuito, y al mismo tiempo se debe medir con el *lock-in* la señal pulsada que genera la luz monocromática, para lo cual se utiliza el circuito mostrado en la Figura 3.4. Dicho circuito cuenta con un pre-amplificador, que junto con una resistencia hace de conversor corriente-tensión, de modo que el pre-amplificador entrega a su salida una tensión proporcional a la corriente que circula por el circuito. Esta tensión es adquirida mediante el amplificador *lock-in*. Además, el circuito contiene una fuente regulable (polarización eléctrica) especialmente diseñada para el equipo y un voltímetro, en paralelo con la celda, de manera de poner fácilmente la celda en estudio en condiciones de cortocircuito o en condiciones de polarización eléctrica predeterminadas.

Si bien el desarrollo de equipo tiene en cuenta las normas ASTM e IRAM se mencionó anteriormente que éstas no contemplan la medición de RE por el método por comparación con una celda calibrada en *Respuesta Espectral*. Sin embargo se optó por este método de medición. De esta forma, dado que el DES cuenta con celdas calibradas en RE de silicio y triple-juntura InGaP/GaAs/Ge, no fue necesaria la adquisición de un radiómetro piroeléctrico o un fotodetector calibrado.

Para adquirir los datos se utiliza una PC y un programa desarrollado para simular el proceso de medición tal como lo haría un operador del *lock-in* en forma manual. Para ello se utilizó el puerto RS-232 que posee el *lock-in* para conectarlo al puerto serie de un ordenador mediante un cable serie directo. Utilizando comandos propios del *lock-in* enviados desde la PC es posible controlar el equipo mediante software. El desarrollo del programa fue en código *Visual Basic*® que permite el uso de una interfaz gráfica “amigable” al usuario.

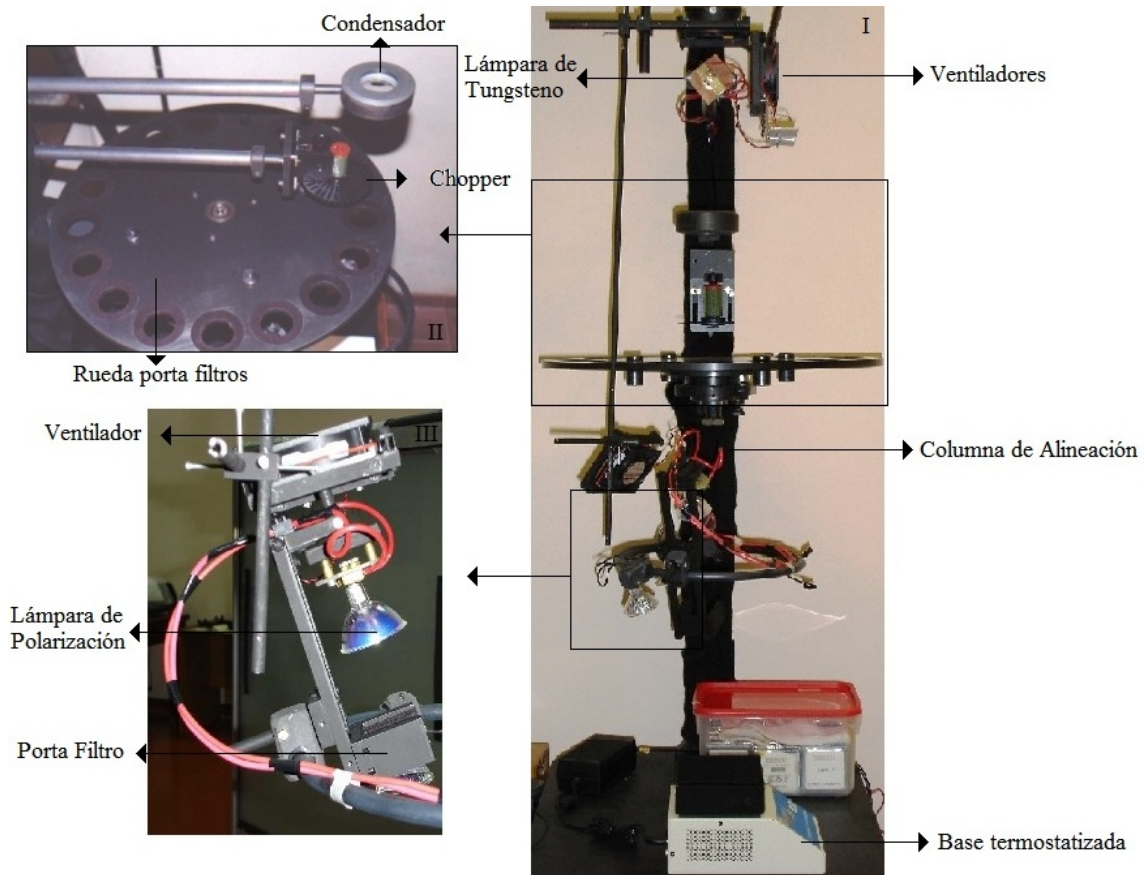


Figura 3.3: : I-Vista general del dispositivo. II-Detalle del condensador y conmutador de filtros que proveen la luz monocromática. III-Detalle de la lámpara de polarización y el portafiltros.

Algunas de las funciones de este programa que emula el accionar de un operador son: tomar decisiones acerca de cuando subir o bajar la constante de integración y la sensibilidad, decidir cuando la medición es estable, calcular el error de de la medición, almacenar en una planilla de *Excel*© los datos medidos. El archivo *Excel*© de salida lista la medición correspondiente a cada longitud de onda tanto de la referencia como de la celda bajo estudio. Al utilizar este programa, el usuario del equipo, luego de colocar la celda en el plano de medición y ponerla en condiciones de cortocircuito solo debe cambiar el filtro de banda angosta o la celda de referencia por la celda bajo estudio cuando el programa así lo solicita.

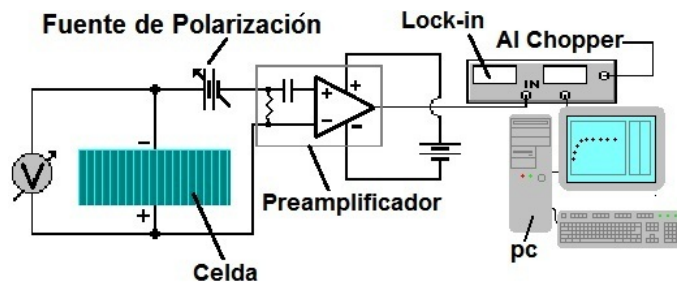


Figura 3.4: Circuito eléctrico para poner a la celda en condiciones de cortocircuito y medir RE.

3.1.1. Estudios Preliminares para la Utilización del Equipo

Para la correcta utilización de este equipo es necesario realizar algunos estudios preliminares sobre las fuentes de luz, tiempos de integración del lock-in, influencia de la luz ambiente y la frecuencia de funcionamiento más adecuada del chopper.

Estabilidad de las Fuentes de Luz

Cuando se encienden las lámparas de polarización y de la fuente de luz monocromática, estas se calientan y pasa un cierto tiempo hasta que llegan al equilibrio térmico con el ambiente, tiempo durante el cual la intensidad de las componentes espectrales de la luz que emiten cambian. Es importante determinar cuanto tiempo hay que esperar entre el encendido de las lámparas y el comienzo de la medición de *RE*. Para determinar experimentalmente este tiempo se utiliza el propio equipo de *RE* y un programa que registra el valor que mide el *lock-in* en función del tiempo.

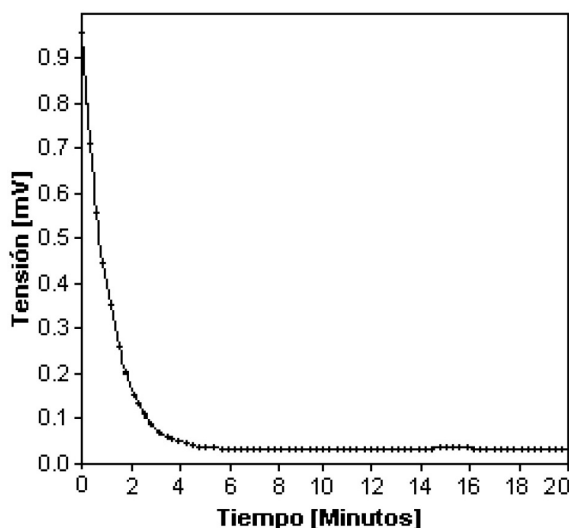


Figura 3.5: Medición del tiempo que tardan las lámparas en llegar al equilibrio térmico.

En este estudio se midió la respuesta de una celda de silicio cristalino ante luz *choppeada* de 700 nm. La medición se comienza inmediatamente luego de encendida la fuente de luz monocromática y se la deja correr por 20 minutos; el resultado de esta medición se muestra en la Figura 3.5. El análisis de la Figura 3.5 indica que hay que dejar pasar al menos 8 minutos luego de encender las lámparas antes de comenzar la medición de *RE*. Al ser la luz de polarización lumínica de similares características que la fuente de luz monocromática se considera que los tiempos que hay que esperar para la estabilización en ambos casos son del mismo orden.

Tiempos de Integración del *Lock-in*

Cuando se mide con el amplificador *lock-in* es necesario esperar un tiempo de integración que depende de la constante de tiempo seleccionada, que dependerá a su vez de la relación señal-ruido que se tenga, antes de que el instrumento comience a registrar el valor de tensión correcto. Para determinar este tiempo se utilizó nuevamente el equipo de *RE* y el programa que registra el valor que mide el *lock-in* en función del tiempo. Al igual que en el caso del tiempo de estabilidad de las lámparas se estudia la respuesta ante luz *choppeada* de una celda de silicio cristalino, cuando se comienza la medición se utiliza una constante de tiempo de por ejemplo 10 segundos y se deja medir durante 20 minutos,

luego sin dejar de medir, se cambia la constante a 30 segundos (valor de la constante de tiempo que le sigue a 10 segundos) y se mide durante 20 minutos más. Los valores para este caso se muestran en la Figura 3.6. Se observa en dicha figura que el valor registrado en el primer intervalo de tiempo vuelve a ser registrado luego de un período de transición que ocurre cuando se modifica la constante de tiempo.

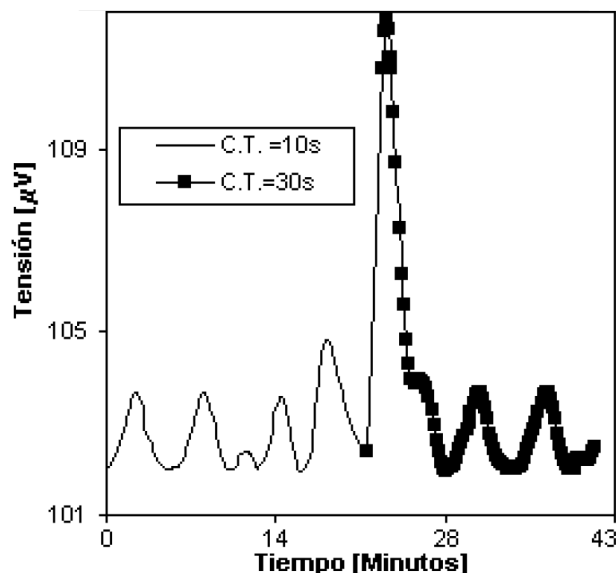


Figura 3.6: Medición del tiempo de integración para el caso de cambiar la constante de 10 a 30 s.

Realizando experimentos similares con los demás valores de constantes de tiempo permitidas por el *lock-in*, se determinó que el tiempo de integración debe ser de por lo menos 5 veces el valor de la constante de tiempo.

Influencia de la Luz Ambiente

Otro factor a tener en cuenta es si afecta o no la luz ambiente del laboratorio en la medición de *RE*. Para ello se utiliza la misma configuración que en los casos anteriores y el programa que permite registrar el valor que mide el *lock-in* en función del tiempo. Con la iluminación ambiente desconectada, y el *lock-in* configurado con una constante de tiempo en 10 segundos se corre el programa durante 4,5 minutos, momento en el que se enciende la luz ambiente y se registra el valor que mide el *lock-in* durante otros 5 minutos con el fin de detectar si hay diferencia en la medición al encender la iluminación.

Puede observarse en la Figura 3.7 que la luz del ambiente influye notablemente en el nivel de ruido con que se realiza la medición: en ausencia de iluminación la dispersión del error se puede estimar en $\sigma = 2 \mu\text{V}$, y en su presencia $\sigma = 10 \mu\text{V}$. Así, se concluye que la mejor opción es tener las luces del laboratorio apagadas durante la medición.

Elección de la Frecuencia del Chopper

La elección de la frecuencia a la cual hacer funcionar el *chopper* se realizó mediante el análisis del espectro de ruido que ingresa al *lock-in*. Para ello se conecta un osciloscopio a la entrada del *lock-in* y se coloca en el equipo de medición de *RE* la celda de silicio como si se fuera a medir, pero en este caso con las lámparas de polarización y de la luz monocromática apagadas (al igual que la iluminación del ambiente). De esta manera el osciloscopio solo registrará el ruido de la medición. Una vez obtenida la señal se le aplica a

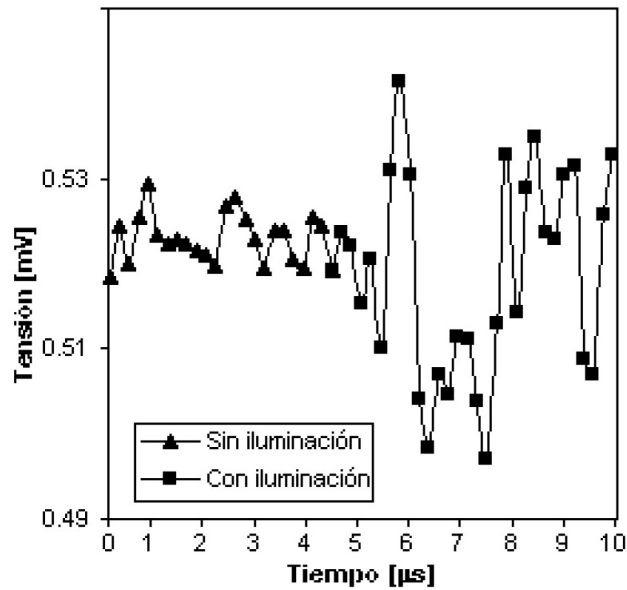


Figura 3.7: Medición del valor registrado por el lock-in en función del tiempo, a los 4.5 minutos se enciende la iluminación.

los datos una transformada de Fourier discreta para poder analizar el espectro del ruido. En la Figura 3.8 se muestra el espectro del ruido en la entrada del *lock-in*.

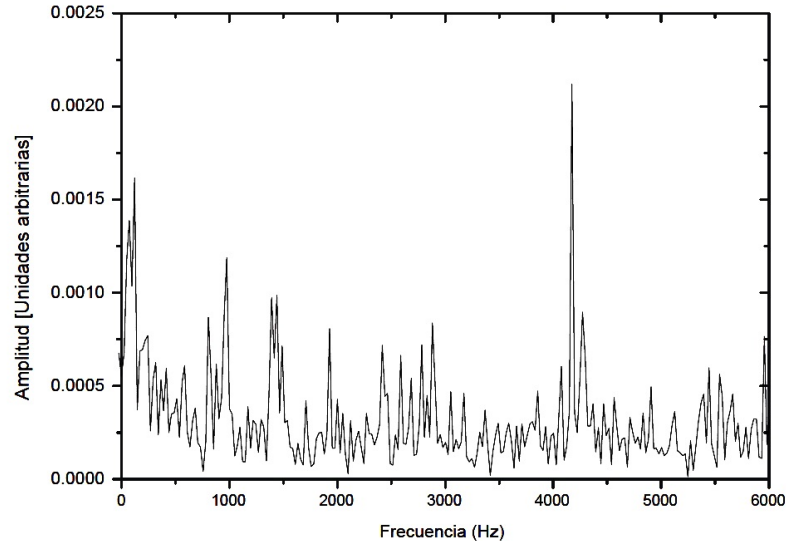


Figura 3.8: Espectro del ruido en la entrada del lock-in.

Debido a que el *lock-in* registrara la señal que le llegue con la misma frecuencia que el *chopper* la mejor elección para la frecuencia de este será aquella en la cual el ruido sea mínimo. Analizando la Figura 3.8 y considerando que el rango de frecuencias posibles del *chopper* es de entre 1 y 1000 Hz la elección más adecuada para la frecuencia del *chopper* se halla entre los 700 Hz y 800 Hz donde se observa un mínimo en la intensidad del ruido.

3.1.2. Procedimiento de Medición de Celdas Mono-juntura

Teniendo en cuenta lo expuesto en la sección anterior, se estableció el siguiente procedimiento de medición para celdas mono-juntura:

1. Se prenden todos los equipos: *lock-in*, PC, chopper, base termostatzada, las 2 fuentes de alimentación de las lámparas y la fuente de polarización eléctrica verificando que su tensión esté colocada en 0 V.
2. Se esperan 15 minutos para que las lámparas lleguen al equilibrio térmico.
3. Se posiciona la celda de referencia en el plano de prueba, se conecta al circuito de medición (ver Figura 3.4) y se deja termalizar a 25 °C.
4. Se coloca a la celda en condiciones de cortocircuito variando la tensión entregada por la fuente de polarización eléctrica.
5. Se ejecuta el programa y se procede a la medición de la señal producida por el haz monocromático para todas las longitudes de onda disponibles entre 300 nm y 1100 nm. El programa avisará cuando finalizó la medición en una longitud de onda para que el usuario cambie el filtro. Finalizada la medición en todas las longitudes de onda el programa pedirá el cambio de celda y esperará la orden para continuar.
6. Se reemplaza la celda de referencia por la celda a medir y se deja termalizar.
7. Se continúa con el programa y se procede a la medición de la señal para todas las longitudes de onda igual que en el paso 5.
8. Una vez finalizada las mediciones se coloca a la fuente de polarización eléctrica nuevamente en 0 V.
9. Se desconecta la celda.
10. Se apagan todos los equipos excepto la PC.
11. Se calcula a partir de la Ecuación (2.3) y los datos del archivo de salida del programa la *Respuesta Espectral* de la celda.

Este procedimiento se diseñó en base a la experiencia adquirida usando el propio equipo y teniendo en cuenta las normas para la medición de *RE*. Cabe señalar que cualquier modificación del equipo puede introducir modificaciones a este procedimiento.

3.2. Modificaciones Realizadas al Equipo

Lo expresado en la sección anterior se refiere al estado del equipo previo al comienzo del presente trabajo [34, 35]. Sin embargo, cabe aclarar que todo lo expuesto fue estudiado y verificado para poder encarar las modificaciones necesarias para adaptar el equipo a mediciones de *Respuesta Espectral* en celdas multi-juntura como así también para la automatización de las mismas.

3.2.1. Modificaciones en el Equipo para la Medición de Celdas Multi-juntura

Una característica fundamental de las celdas multi-juntura es que pueden aprovechar la luz incidente en un rango de longitudes de onda mayor que las celdas mono-juntura. Por ejemplo una celda de silicio cristalino responde en el rango de 300 a 1100 nm (el equipo fue diseñado originalmente para medir este tipo de celdas) mientras que una triple-juntura de InGaP/GaAs/Ge responde en el rango de 300 a 1900 nm. Por ello, la primera modificación realizada al equipo fue la extensión del rango de medición para llevarlo del rango original a 300-1900 nm [36]. Esto se logró mediante el agregado de una segunda rueda porta filtros de banda angosta. El diseño de la nueva rueda porta filtros está basado en la anterior, pero para sostener filtros circulares de 25,4 mm de diámetro, lo que permite la construcción de una rueda más pequeña (los filtros utilizados en la primer rueda son cuadrados de 50,8 mm de lado). Las dimensiones de la rueda son 200 mm de diámetro y 7 mm de espesor, y está construida en aluminio y anodizada con un pigmento negro para evitar reflexiones. La rueda está sostenida por un brazo que permite la movilidad necesaria para ubicarla en el lugar deseado. Una fotografía de la nueva rueda, antes de ser anodizada, puede observarse en la Figura 3.9.

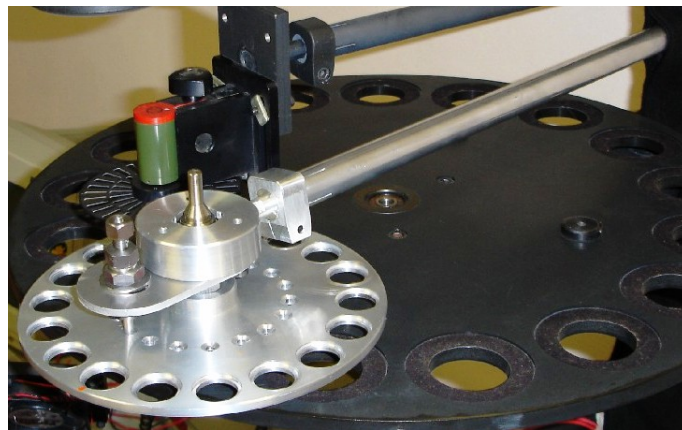


Figura 3.9: Fotografía de la nueva rueda, se observan los agujeros sobre los que se colocan los filtros.

La longitud de onda central de los filtros a colocar en la segunda rueda son: 1150 nm, 1200 nm, 1250 nm, 1300 nm, 1350 nm, 1400 nm, 1450 nm, 1500 nm, 1550 nm, 1600 nm, 1650 nm, 1700 nm, 1750 nm, 1800 nm, 1850 nm y 1900 nm. 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.

Por otra parte, las celdas multi-junturas son normalmente diseñadas para su utilización en el espacio o en la superficie terrestre con concentración, por lo que la intensidad de luz bajo la cual trabaja la celda es 1367 W/m^2 o superior. Por ello es necesaria la modificación del sistema de polarización lumínica para aumentar la potencia y acercarla a la de funcionamiento de los dispositivos a medir. Esto se logra mediante el cambio de la lámpara de 150 W por una de 250 W. Esto produce la necesidad de la modificar el sistema de refrigeración de dicha lámpara cambiando el ventilador existente por uno de mayor caudal de aire que se enciende automáticamente al encender la alimentación de la lámpara para evitar la fatiga térmica de la lámpara, lo que se logra mediante la conexión del ventilador a la misma fuente con que se alimenta la lámpara y la incorporación de un regulador de tensión conectado entre la lámpara y el ventilador, puesto que esta última

trabaja a 24 V y el ventilador lo hace a 12 V.

La irradiancia en el plano de medición de la lámpara de 250 W para una distancia que garantice condiciones de homogeneidad suficiente es muy cercana a los 1367 W/m² correspondientes a la radiación solar AM0. Sin embargo si consideramos que, como se mencionó anteriormente, para medir una subcelda particular de una celda multi-juntura es preciso modificar las componentes espectrales de la luz de polarización, y que cualquier anteposición de un filtro a la lámpara para lograrlo bajará la intensidad en el plano de medición, resulta necesario aumentar la intensidad del sistema de polarización lumínica. Esto se logra fácilmente mediante el agregado de una segunda lámpara de polarización (también dicróica de 250 W) que cuente con su correspondiente base que permita montarla como la ya existente y también con su refrigeración y soporte de filtro independiente. El diseño de este segundo soporte es de similar características que el ya existente. Para refrigerar esta segunda lámpara se utilizó un ventilador igual al mencionado anteriormente, utilizando también un regulador de tensión para alimentarlo con la misma fuente de la lámpara. Asimismo fue necesaria la construcción de los soportes mecánicos para independizar el montaje del ventilador respecto del dispositivo de medición, y así evitar vibraciones que pudieran introducir ruido debido a la modulación mecánica de la señal.

Con la incorporación de la segunda lámpara de polarización conseguimos en el plano de medición el doble de intensidad necesaria lo que nos permite un amplio rango de posibilidades en cuanto a la modificación espectral sin alejarnos de la irradiancia requerida. Cabe aclarar que se utilizan fuentes de corriente continua independientes para cada una de las 3 lámparas de modo de asegurar lo mejor posible la estabilidad en la irradiancia de las lámparas.

3.2.2. Modificaciones para la Automatización de la Medición

Las dos modificaciones mencionadas hasta ahora permiten, por si solas, extender la capacidad del equipo a celdas multi-junturas. No obstante la propuesta de trabajo implicaba automatizar la medición de la *Respuesta Espectral*, por lo que fue necesario incorporar otras modificaciones. La más importante de ellas fue la incorporación de motores paso a paso, controlados mediante una computadora, acoplados a ambas ruedas porta filtros para posicionar estos de forma automática. Esta modificación costa de tres partes: el acople mecánico a las ruedas, la fuente de alimentación de los motores e interfaz al ordenador, y el desarrollo de software para manejarlos.

La primera parte, el acople mecánico de los motores a cada rueda porta filtros, fue realizado de manera diferente para la rueda original ($R_{original}$) que para la rueda nueva (R_{nueva}). En el caso de la $R_{original}$ hay que mencionar que cuando fue diseñada no se tuvo en cuenta la posibilidad de acoplarle un motor, por lo que su automatización fue mas difícil que para la R_{nueva} , la cual fue diseñada pensando en esta posibilidad. Para rotar mediante el motor la $R_{original}$ fue necesario el agregado de un engranaje especialmente diseñado en la parte inferior de esta, el cual puede verse en la Figura 3.10. Este engranaje es accionado mediante un piñón acoplado al eje del motor paso a paso (ver Figura 3.10). La relación de diámetro entre el engranaje y el piñón es la necesaria para un adecuado nivel de torque y de precisión en el posicionamiento de la rueda. En la Figura 3.10 puede observarse como fue acoplado el motor al brazo de soporte de la $R_{original}$ (el soporte permite desacoplar el motor sin mayor esfuerzo) Debido a que el motor solo es accionado en momentos donde no esta siendo adquirida una medición no fue necesaria la separación

de este del cuerpo principal del equipo para evitar vibraciones como en el caso de los ventiladores de refrigeración.

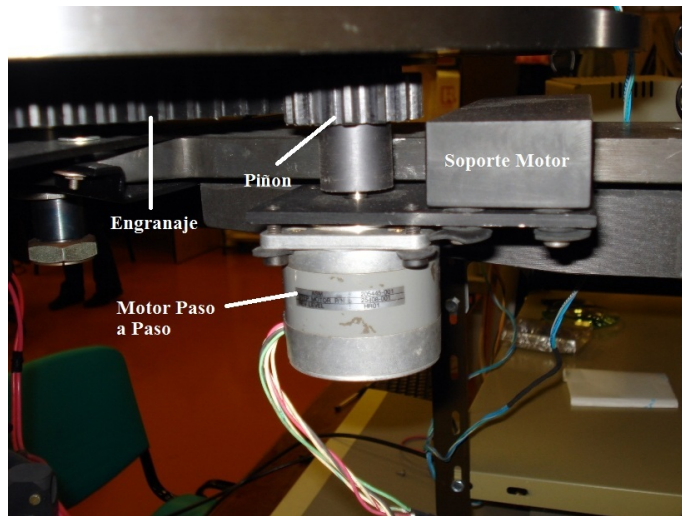


Figura 3.10: Sistema de posicionamiento de la rueda porta filtros de 300 a 1100 nm.

La rotación de la R_{nueva} se logra mediante el acople directo al eje de esta de un motorreductor lineal el cual es accionado mediante el motor paso a paso. Este mecanismo puede verse en la Figura 3.11, donde se aprecia la diferencia de tamaño del motor respecto al utilizado en la $R_{original}$, esto es así ya que esta rueda es mucho mas pequeña que la primera y por ende es necesario mucho menor torque para generar su rotación. Al igual que en el caso de la relación de diámetro de los engranajes en la $R_{original}$ la necesidad del motorreductor entre el motor y la rueda es para lograr en nivel adecuado de precisión en el posicionamiento.

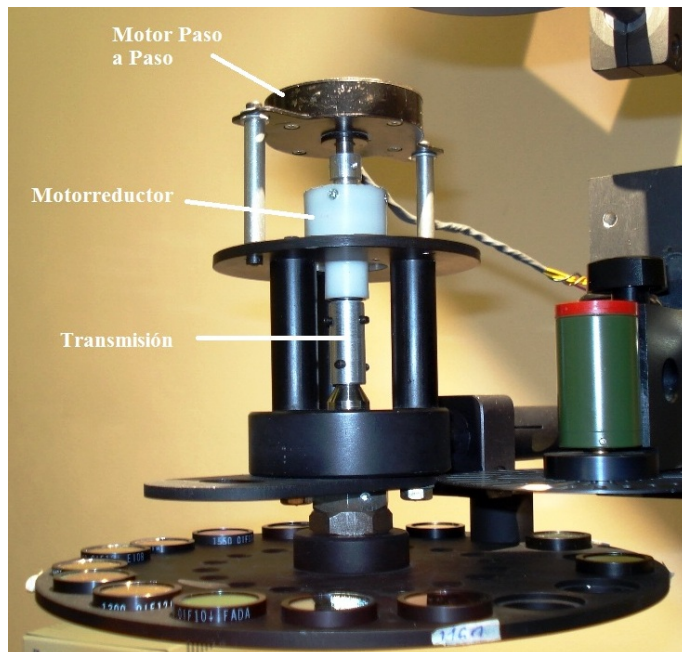


Figura 3.11: Sistema de posicionamiento de la rueda porta filtros de 1150 a 1900 nm.

Para fabricar la fuente de los motores e interfaz al ordenador, segunda parte de esta

modificación, hay que considerar como funciona esta clase de motores. Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una determinada cantidad de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control. El motor paso a paso se comporta de la misma manera que un convertidor digital-analógico y puede ser gobernado por impulsos procedentes de sistemas lógicos [37]. Dicho de otra manera, controlando la secuencia de impulsos que se le apliquen en sus cuatro terminales (cada uno maneja un conjunto de bobinas internas del motor) controlaremos el movimiento del motor. Un ejemplo de este mecanismo puede verse en la Figura 3.12, donde siguiendo una secuencia de un terminal con un impulso y el resto desconectados se logra el giro del eje del motor.

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

Figura 3.12: Secuencia básica de control de un motor paso a paso.

Controlando la velocidad de la secuencia de impulsos se puede regular la velocidad de giro del motor, y contando el número de impulsos se puede controlar cuanto rota el eje del motor (el ángulo mínimo que puede rotar un motor está determinado por su diseño y viene especificado de fábrica).

La secuencia de control es fácilmente generada por una computadora, y dado que se pretende controlar los motores desde el programa que realiza la medición de *RE* esta es la mejor opción. Lo necesario entonces es enviar esta secuencia de control desde la PC a los motores, para lo cual se utiliza el puerto paralelo de la PC que dispone de 8 canales de salida de un bit cada uno, en donde el valor binario 1 corresponde a 5 V y el 0 a 0 V. Como cada motor necesita para su control 4 canales es posible, mediante este puerto, controlar ambos motores. Sin embargo, el motor paso a paso de la rueda grande y el de la rueda chica necesitan 6 V y 12 V de tensión de alimentación respectivamente y una corriente de aproximadamente 1 A y 0.25 A, respectivamente, valores que no puede entregar el puerto. Para solucionar este inconveniente se construyó una interfaz que convierte los bits de 5 V de la PC a bits de 6 V y 12 V que usan los motores y provee la corriente necesaria para su funcionamiento. Además, la interfaz aísla eléctricamente la PC del resto del equipo evitando que algún error o falla provoque daños en la PC. La aislación eléctrica se logra mediante el uso de optoacopladores, que consisten en un *LED* que puede prenderse o apagarse controlado por la señal de entrada y un fototransistor a la salida. Así,

cambios en la tensión de entrada se traducen en cambios en la intensidad de la luz que emite el *LED* y por lo tanto en cambios de la polarización del transistor que domina la corriente que circula entre el colector y el emisor. Con estos cambios de corriente es posible recuperar la señal original, amplificarla e ingresarla a otro circuito, que permanece aislado eléctricamente de la entrada. El optoacoplador utilizado es el *TIL111*, cuyo fototransistor admite una corriente máxima de 50 mA. Como la corriente máxima que consumen los motores es del orden de 1 A se conecta según se indica en la Figura 3.13 un transistor externo (*TIP122*) cuyo rango de trabajo permite la circulación de hasta 5 A. Sobre este último se conecta el motor. De esta manera al activar la salida 1 mediante el envío de un 1 a esa salida del puerto paralelo el optoacoplador se cerrará y permitirá la circulación de corriente por la bobina del motor.

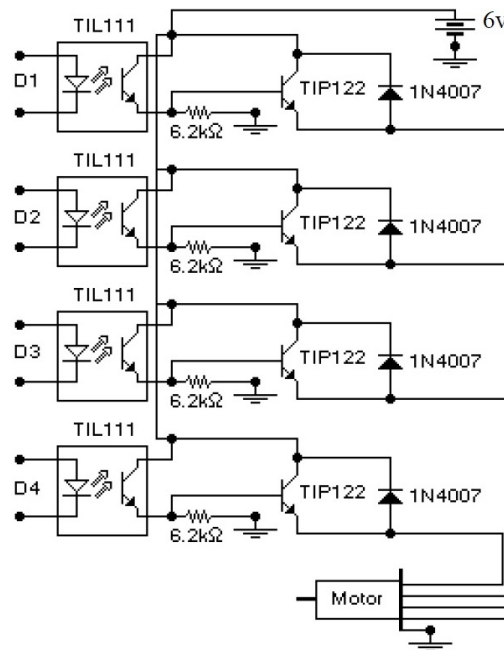


Figura 3.13: Circuito eléctrico de la interfase para un motor paso a paso. *D1* a *D4* van conectados directamente al puerto paralelo. El diodo 1N4007 protege al circuito de posibles picos de tensión que se generan cuando se hace girar el eje del motor en forma manual, actuando el motor como si fuera un *dinamo*.

El circuito que gobierna el segundo motor es idéntico al mostrado en la Figura 3.13, y se conecta a las 4 salidas restantes del puerto paralelo. También fue construida la fuente de ambos motores, la cual no se detallará por tratarse de una fuente convencional basada en un transformador, un puente de diodos y capacitores como filtro (todo adecuadamente dimensionado para soportar las corrientes requeridas). Tanto los circuitos de control como la fuente fueron colocados en un gabinete, el cual contiene además una llave de encendido, fusible y conectores para el fácil conexionado de los motores y la PC. La configuración final del conjunto fuente e interfaz puede verse en la Figura 3.14.

La última parte de la modificación para la automatización de la medición es el desarrollo del software que permite manejar los motores y posicionar adecuadamente el filtro que corresponda a un dado punto de la medición. Este programa fue desarrollado en *Visual Basic*© para poder integrarlo fácilmente al programa de medición de *Respuesta Espectral* ya existente [36].

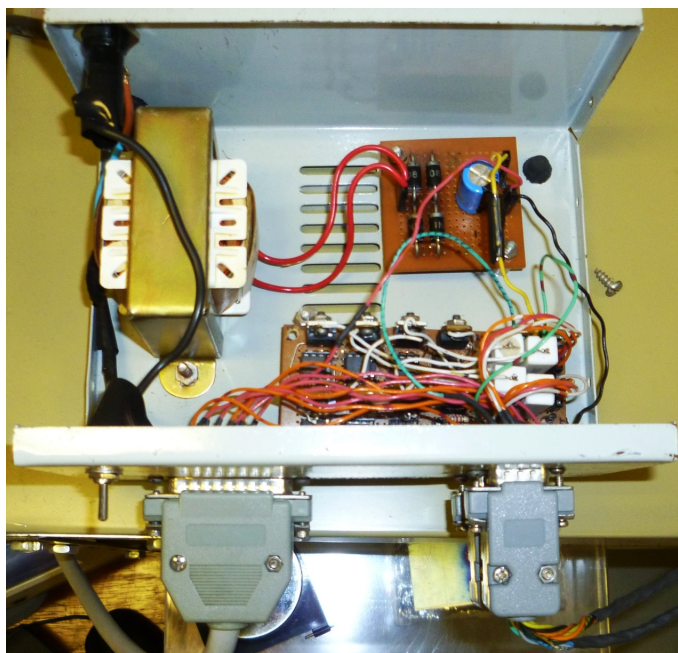


Figura 3.14: Fuente de los motores e interfaz al ordenador.

Básicamente, este programa utiliza una instrucción que permite activar o desactivar mediante un número binario cada canal del puerto paralelo, es decir enviar un 1 o un 0 a cada salida según corresponda. Utilizando esta instrucción dentro de un *loop* se envía la secuencia que permite girar al motor (esta secuencia es la mostrada en la Figura 3.12). Por ejemplo se envía inicialmente el número 10000000, que activará la primera bobina del primer motor, luego en el otro ciclo del *loop* se envía el número 01000000 que activará la segunda bobina del primer motor y así sucesivamente. Los primeros 4 bits manejan el primer motor por lo que después de activar la cuarta bobina del primer motor se debe continuar con la primera bobina de este para que gire correctamente, entonces el número enviado debe ser el 1000000 nuevamente. La secuencia para el segundo motor es análoga pero utilizando los 4 bits restantes. Si se controla el tiempo entre un número enviado al puerto y el siguiente se maneja la velocidad de rotación del motor.

Utilizando esta rutina es posible posicionar los filtros controlando la cantidad de pasos que avanza el motor. Para cada rueda la cantidad de pasos necesaria para pasar de un filtro al otro es una constante puesto que el desplazamiento angular necesario entre filtros es constante por su distribución uniforme sobre las ruedas. El número de pasos necesarios para pasar de un filtro a otro en cada rueda fue hallado experimentalmente haciendo pruebas hasta lograr el correcto posicionamiento.

Con la colocación de los motores, la realización de la interfaz/fuente de alimentación y el desarrollo del software que posiciona los filtros, se procedió a la última modificación necesaria para la automatización. Esta modificación no es de tipo físico, sino que fue a nivel software mediante la modificación del programa de adquisición de *RE* ya existente, para permitir la medición de forma automática de celdas multi-juntura (inicialmente celdas de 2 o 3 juntas).

Las modificaciones realizadas al programa original fueron muchas y de muy variada magnitud (actualmente el código fuente cuenta con más de 10000 líneas que abarcan unas 50

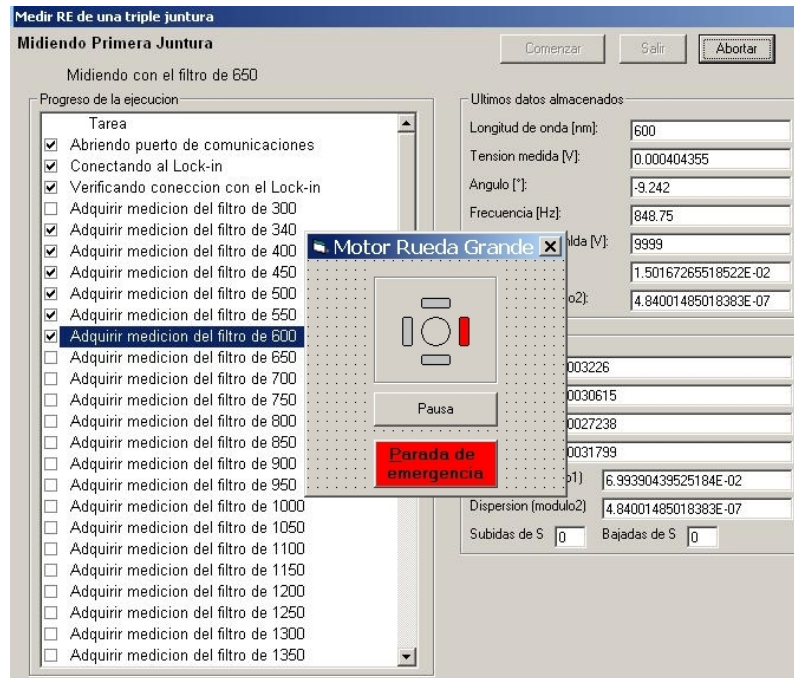


Figura 3.15: Vista del programa que permite la medición automática de Respuesta Espectral, en este ejemplo ejecutando un cambio de filtro mediante los motores paso a paso incorporados.

subrutinas); algunas de estas modificaciones fueron: agregar la posibilidad de medir longitudes de onda más allá de 1100 nm (hasta 1900 nm), la posibilidad de elegir que tipo de celda se desea medir (simple, doble o triple-juntura), las incorporación del programa de control de los motores a este programa de forma que los maneje automáticamente en el momento requerido, realizar los cálculos necesarios para llegar al valor final de RE de manera automática, elegir la referencia adecuada para los cálculos según el tipo de celda medida, solicitar al usuario el valor de área de la celda, graficar en tiempo real la RE medida, y la posibilidad de medir o no la celda de referencia.

Estas son solo algunas modificaciones entre otras que se realizaron, ya que al tratarse de la primera versión presenta errores o fallas propias de cualquier programa en desarrollo por lo que es modificado constantemente para solucionarlos, a la vez que se intenta hacer de este un programa “más inteligente”, posibilidad que no existiría si el programa fuera comercial. En la Figura 3.15 se muestra la información que se visualiza mientras se realiza la medición de forma automática en el momento particular de la medición en que se está realizando automáticamente el cambio de filtro.

3.2.3. Modificaciones para Mejorar las Prestaciones Generales del Equipo

Además de las modificaciones enumeradas en las secciones anteriores, se realizaron algunas otras con la finalidad de mejorar las prestaciones generales del equipo.

La primera de las modificaciones fue la incorporación de una cubierta oscura colocada entre las discos porta filtros y el plano de medición a fin de disminuir la influencia en la medición de la luz ambiente, efecto mostrado en la Sección 3.1.1, así como de posibles reflexiones de luz *choppeada*. Además se agregó una segunda cubierta entre la base termostatizada y las luces de polarización con el mismo objetivo recién mencionado. Estas

cubiertas pueden verse en la Figura 3.17.

La segunda modificación se realizó con el objeto de dar mayor reserva dinámica al amplificador *lock-in* y además para minimizar al extremo la introducción de ruido por parte de la electrónica. Para ello se cambió el pre-amplificador utilizado hasta el momento y se introdujo como etapa pre-amplificadora un circuito basado en un amplificador operacional *OP-07* en configuración no inversora, cuya ganancia es de 300 veces y cuya impedancia de entrada es de relativamente bajo valor para asegurar un bajo nivel de ruido a la salida del mismo. Por otro parte, se ha probado la linealidad del pre-amplificador para el rango de tensiones de entrada de $1 \mu\text{V}$ a 10 mV (valores normales sentidos sobre la resistencia en la medición de *RE*).

La tercera modificación fue agregar al equipo la posibilidad de concentrar la luz monocromática mediante la incorporación de una o dos lentes convergentes (según el nivel de concentración que se desee). Estas lentes están colocadas por debajo de los filtros de banda angosta y por encima de las luces de polarización para no interferir con estas. De esta forma se puede medir la *RE* celdas con áreas por debajo del centímetro cuadrado y mantener una buena relación señal-ruido. Esta modificación es fundamental para poder medir celdas desarrolladas para uso con concentración debido a que su área generalmente es de unos pocos milímetros cuadrados. Por otro lado esta modificación genera la reducción del área iluminada por el haz monocromático a unos pocos centímetros cuadrados, por lo que es necesario contar con celdas de referencia adecuadas para este caso.

Finalmente se construyó y agregó al equipo un sistema de posicionamiento de las celdas sobre el plano de medición basado en un puntero láser. Esto es de suma importancia para el posicionamiento de las celdas para uso con concentración debido a su pequeña área.

3.2.4. Configuración Final del Equipo

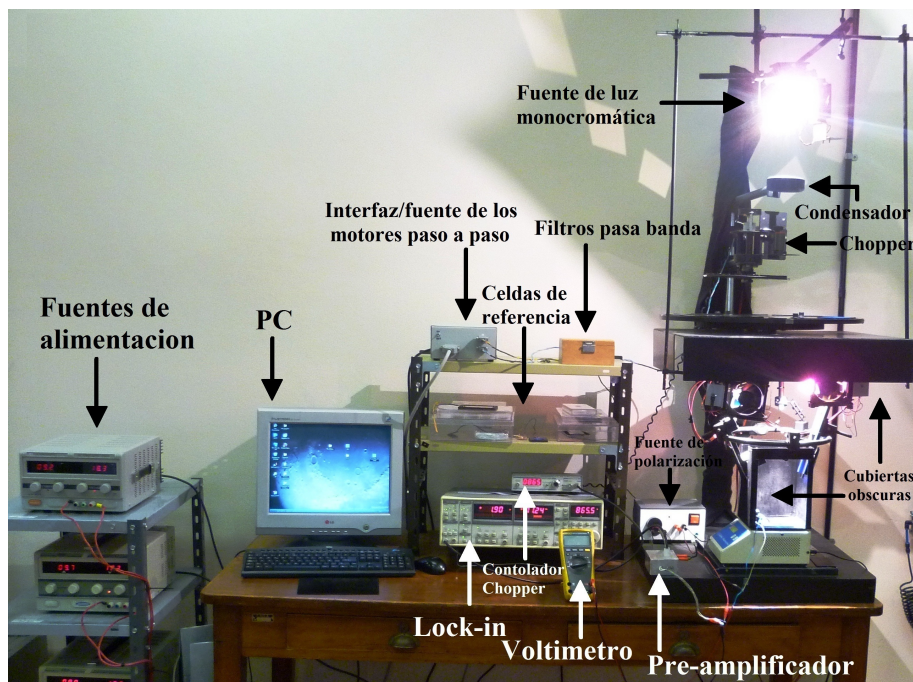


Figura 3.16: Arreglo experimental final, vista panorámica.

La configuración actual (no se descartan posibles modificaciones futuras) del equipo completo puede, observarse en la Figura 3.16. En dicha figura puede observarse la vista panorámica del equipo, que incluye las fuentes de alimentación, la PC y toda la electrónica mencionada en secciones anteriores. En esta figura también puede apreciarse la columna de medición, cuyo detalle se visualiza en la Figura 3.17

En la Figura 3.17 pueden apreciarse la mayoría de las modificaciones realizadas al equipo y como a cambiado la columna de medición en comparación con el estado de dicha columna en el equipo original (ver Figura 3.3).

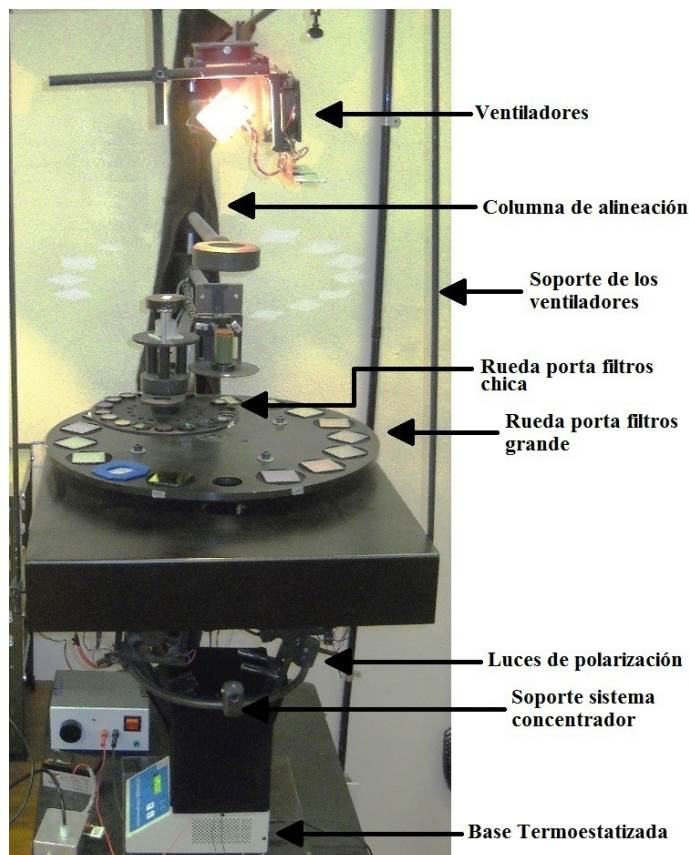


Figura 3.17: Detalle columna de Medición.

3.2.5. Procedimiento de Medición de Celdas Multi-juntura

El procedimiento que se estableció para medir la *Respuesta Espectral* en celda multi-juntura con el equipo modificado y automatizado es muy parecido al expuesto en la Sección 3.1.2 para la medición de celdas mono-juntura. Sin embargo se deben realizar algunas aclaraciones.

- Cuando se encienden todos los equipos (paso 1) se debe encender además la fuente de los motores paso a paso e interfaz al ordenador.
- Una vez colocada la celda en el plano de medición y conectada al circuito de medición (paso 3), se coloca el juego de filtros que selecciona la subcelda a medir en las lámparas de polarización (el juego de filtros a utilizar se estudiará más adelante). Luego se deja termalizar.

- Se polariza la celda mediante la variación de la tensión entregada por la fuente de polarización eléctrica, hasta que el voltímetro muestre una caída de tensión adecuada (reemplaza al paso 4, la tensión adecuada para cada subcelda se estudiará en una sección siguiente)
- Se ejecuta el programa de medición (paso 5), este solicitará al usuario que elija el tipo de celda a medir, cuantas juntas de dicha celda va a medir (en el caso de que haya más de una), si quiere o no medir la referencia y otros parámetros iniciales requeridos. Luego pedirá que se verifique que la posición de ambas ruedas es la correcta para iniciar la medición y comenzará a medir la RE automáticamente hasta llegar a la última longitud de onda.
- Según los parámetros ingresados inicialmente el programa solicitará el cambio del juego de filtros que selecciona la subcelda a medir o el cambio de la celda de referencia por la celda a medir y continuará con la medición hasta finalizar.
- En el caso del reemplazo de la celda es necesario dejar termalizar (paso 6)
- Se repite el procedimiento para cada subcelda a medir tanto para la referencia como para la celda bajo estudio (paso 7).
- Se siguen todos los pasos finales expuestos en el procedimiento de medición de una celda mono-juntura, solo que el archivo de salida de la medición ya contiene la RE absoluta de la celda bajo estudio calculada automáticamente por el programa.

Capítulo 4

Condiciones Experimentales para Medir Celdas Solares Multi-juntura

Como fuera mencionado anteriormente en el presente trabajo, la forma de seleccionar una determinada subcelda de una celda multi-juntura 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 menor fotocorriente que las demás. Esto se podría lograr directamente mediante la eliminación, en la luz de polarización, de las componentes espectrales en la cuales responde la subcelda, sin embargo, esto alejaría a la celda de sus condiciones normales de funcionamiento pues la irradiancia total no sería suficiente y además la subcelda a medir no generaría la corriente para la que fue diseñada. Es por ello que para hallar espectros “seleccionadores” satisfactorios de cada subcelda se realizó un análisis detallado de los espectros de las lámparas. Luego, utilizando la transmitancia de los filtros pasa banda que se poseen y los espectros de las lámparas utilizadas, se calcularon dichos espectros “seleccionadores” mediante simulación numérica.

4.1. Estudio Sobre la Polarización Lumínica

4.1.1. Estudio de las Lámparas Utilizadas para la Polarización Lumínica

Para saber que filtro o juego de filtros hay que 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 espectrómetro marca *Analytical Spectral Device, Inc*; modelo *FieldSpec Pro FR* propiedad de la CONAE, cuyo rango de medición es de 350 nm a 2500 nm. Los resultados de estas mediciones se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2 [38]; se realizaron mediciones para diferentes distancias de la lámpara respecto del plano de medición (Figura 4.1.I) y para diferentes tensiones de alimentación de la lámpara (Figura 4.1.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. También, se midió el espectro para cada lámpara de polarización por separado, verificándose que el comportamiento espectral de dos lámparas es similar (Figura 4.2).

Si se observa la distribución espectral de la lámpara dicróica de 250 W (Figura 4.2) y se la compara con la del espectro solar AM0 se nota que el primero 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

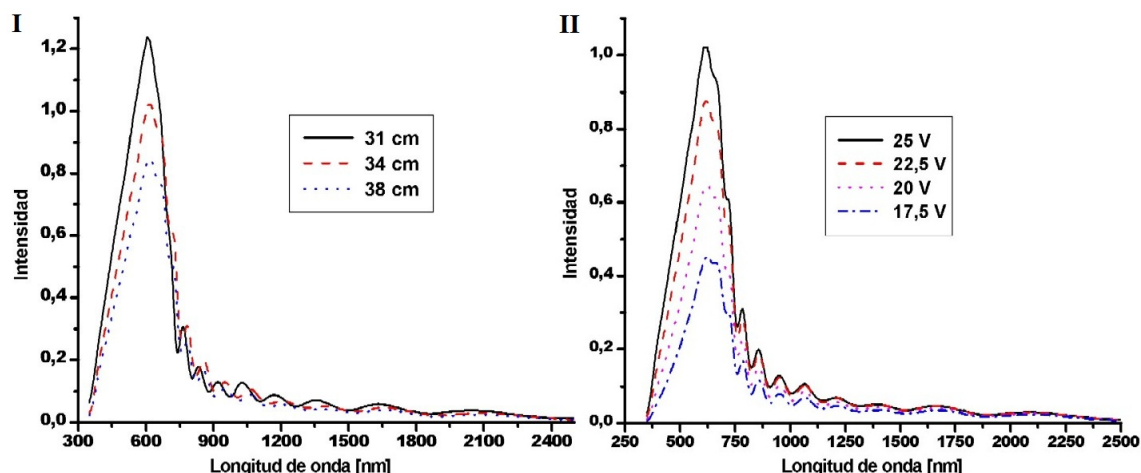


Figura 4.1: I- Espectro de la lámpara de polarización para diferentes distancias al plano de medición. II- Espectro de la lámpara de polarización para diferentes tensiones de alimentación.

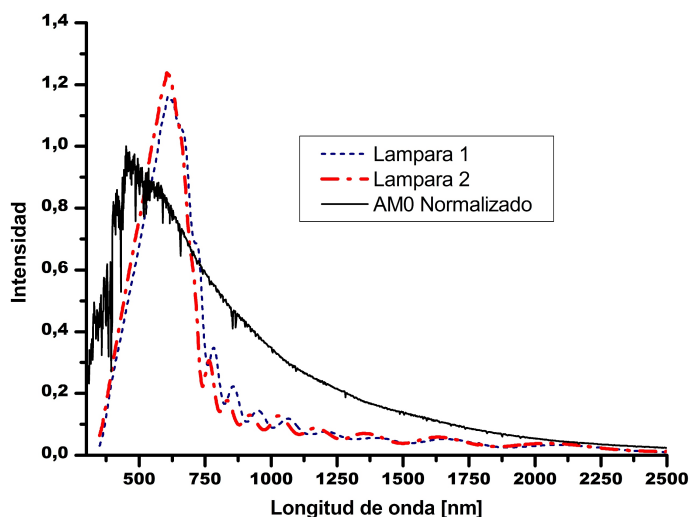


Figura 4.2: Comparación de los espectros de las dos lámparas a utilizar y el espectro AM0.

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 germanio que generalmente compone las celdas de triple-juntura. También se observa (Figura 4.2) 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.

4.1.2. Cálculo de los Espectros “Seleccionadores”

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 (4.1):

$$J_{sc}^i = \int RE^i(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (4.1)$$

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 pasabanda, de modo tal que si $T(\lambda)$ es la transmitancia espectral de dicho filtro, el espectro modificado será $E_m(\lambda) = E(\lambda)T(\lambda)$ como puede verse en la Figura 4.3. Se dispone de un juego de filtros pasabanda (pasaaltos y pasabajos) cuadrados de 2" con frecuencias de corte entre 400 nm y 750 nm. La transmitancia de los filtros pasabanda fue medida utilizando un espectrofotómetro *Shimadzu UV-Vis-IR*. Además se disponen 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 700 nm, aunque con una pendiente más suave que en el caso de los filtros pasa banda.

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 [29].

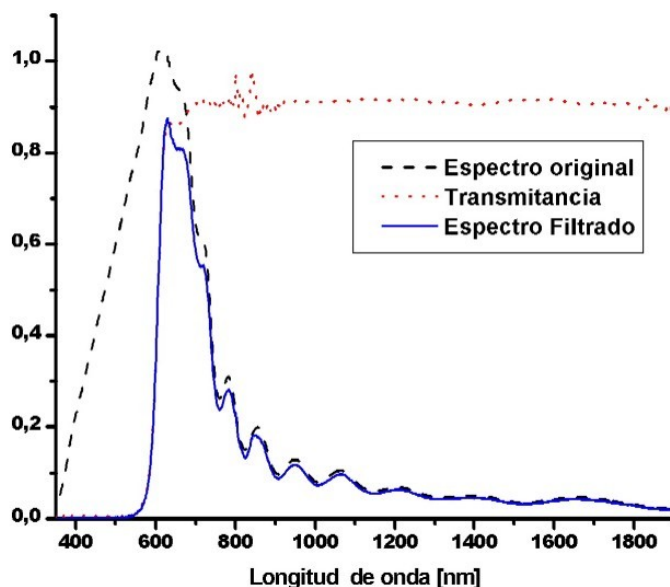


Figura 4.3: Espectro de la lámpara de 250 W modificado según la transmitancia del filtro pasa altos de longitud de onda de corte de 600 nm.

Para facilitar el cálculo de espectros seleccionadores se generó una planilla en *Excel*© que tiene cargada 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* el usuario modifica la intensidad de las y los espectros de cada lámpara con diferentes filtros pasa banda, y luego automáticamente el software calcula la corriente fotogenerada por cada subcelda mediante el cálculo numérico de la Ecuación (4.1) e informa al usuario el espectro resultante.

4.1.3. Espectros “Seleccionadores” para una Celda Triple-juntura GaInP/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 GaInP/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 AM0. Si bien esto es posible, resulta engorroso por el tamaño y costo de un simulador solar que se ajuste estrechamente al espectro AM0, además del hecho de que solo podríamos medir una única subcelda si nos quedamos solo con este espectro. Por este motivo nuestro criterio de condiciones normales de funcionamiento será lograr el espectro mas parecido a AM0 con nuestras dos lámparas y filtros disponibles, y modificar este lo menos posible de manera que limiten las dos subceldas restantes.

Para ello utilizamos la *RE* correspondiente a una celda de triple-juntura GaInP/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 [39]. Esto se debe a que la subcelda de GaAs es más susceptible al daño por radiación [39, 40], definiéndose entonces un espesor menor para la celda de InGaP para que al final de la vida útil determinada por el daño por radiación ambas subceldas generen la misma fotocorriente.

Los ítems a tener en cuenta 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.

Teniendo esto en cuenta se simularon dos espectros, que denominamos “Sim AM0 1” y “Sim AM0 2”. Estos se muestran en la Figura 4.4 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 350 nm. La subcelda que limita con estos espectros, según la *RE* utilizada en los cálculos, es la subcelda de GaAs, también denominada *middle*.

Para hallar los espectros que seleccionen las otras 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 alguna 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 4.5 donde también se muestra el espectro “Sim AM0 2”.

Véase (Figura 4.5) que el espectro identificado como Middle es el Espectro “Sim AM0 2”, mientras que para que limite la celda de Ge o *bottom* (espectro identificado como Bottom) fue necesario bajar la componente espectral 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

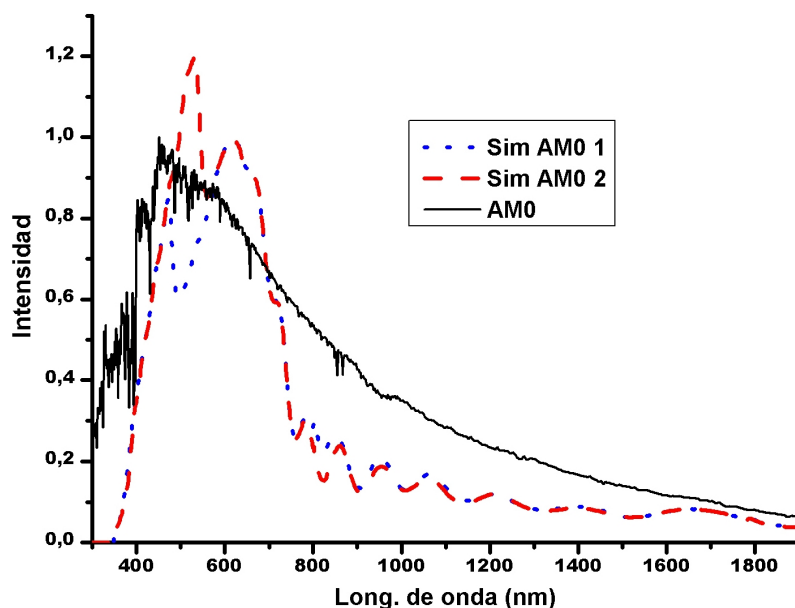


Figura 4.4: Espectros Simuladores de AM0 calculados a partir de dos lámparas dicroicas y filtros pasa bandas.

Top) se redujo fuertemente la componente espectral entre 400 y 600 nm.

Estos espectros fueron probados luego en celdas reales comprobando 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. Una forma de generar nuevos espectros puede ser considerar diferencias mayores entre las corrientes de las subceldas para que limite la subcelda deseada.

4.1.4. Estudio de las Condiciones de Funcionamiento de las Celdas Bajo los Espectros “Seleccionadores” Hallados

Una vez obtenidos estos espectros “seleccionadores” (Sección 4.1.3) se verificó, con la ayuda de un solarímetro marca *Kipp & Zonen*, modelo *CM5 N° 721406*, que el valor de la integral de la radiación espectral sea comparable a la intensidad AM0. En la Tabla 4.1 puede verse el valor de la intensidad de cada uno de los espectros seleccionadores 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 [29].

Espectro	Irradiancia (kW/m^2)	ΔIrr (%)
Top	1,514	10,9
Middle	1,683	23,4
Bottom	1,495	9,5

Tabla 4.1: Intensidad de los espectros “seleccionadores” y su comparación con la constante solar.

Además se realizó una comparación espectral entre los espectros “seleccionadores” y el espectro AM0 en intervalos de longitudes de onda de 100 nm. Este análisis es el requerido

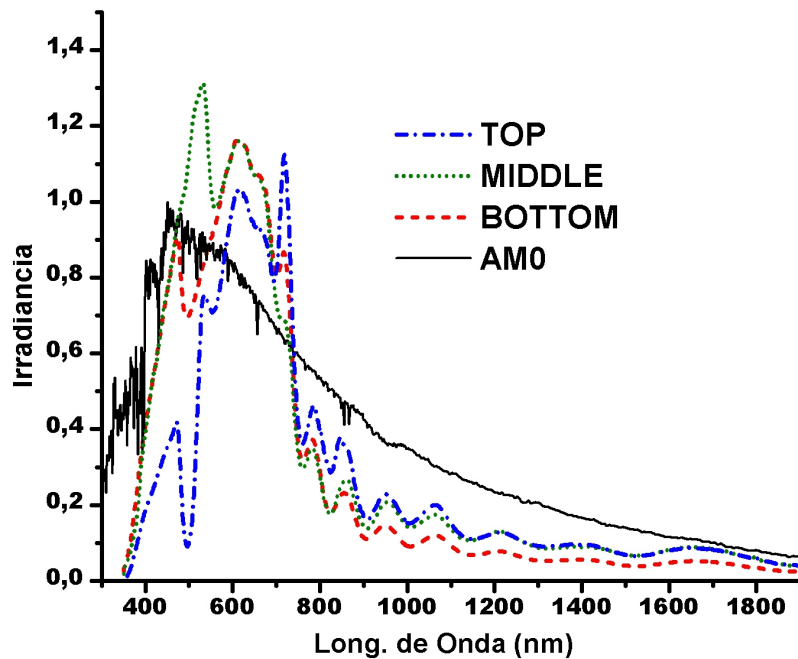


Figura 4.5: Espectros “seleccionadores” finales para las tres diferentes subceldas.

según la norma [41] de clasificación de simuladores solares terrestres según su contenido espectral, que si bien no es nuestro caso nos da una idea de que tan cerca o lejos estamos respecto del estándar AM0 desde el punto de vista espectral.

Este análisis se muestra en la Tabla 4.2, para cada una de los espectros “seleccionadores”. Primero se muestra el porcentaje de espectro que hay en un determinado intervalo de longitud de onda, y luego se muestra el cociente entre este porcentaje y el correspondiente al AM0 para el mismo intervalo.

Es importante remarcar respecto de este análisis que:

- Hay una mejor correlación de la esperada.
- Se observan mayores discrepancias en las regiones donde se redujo el espectro para seleccionar la subcelda que responde en esas longitudes de onda, comprobándose que el método para hallar estos espectros es válido.
- La mayor discrepancia está entre 300 y 400 nm, donde las lámparas prácticamente no emiten y además la capacidad de medición del espectroradiómetro está limitada a valores mayores que 350 nm.
- El promedio de diferencia en ningún caso es mayor al 30 %.

Finalmente para terminar con el análisis de los espectros seleccionadores se compararon los valores de V_{oc} e I_{sc} de una celda real, iluminada con cada una de los espectros, con los valores estándar proporcionados por el fabricante de la celda [42] (Tabla 4.3).

Se observa en la Tabla 4.3, 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

Intervalo de λ (nm)	Top (%/total)	Mid (%/total)	Bot (%/total)	AM0 (%/total)	Top/AM0	Mid/AM0	Bot/AM0
300-400	1	1,8	2,4	7,4	0,1	0,2	0,3
400-500	7,1	16,2	16,8	14,8	0,5	1,1	1,1
500-600	17	24,1	22	14,7	1,2	1,6	1,5
600-700	24	22,2	25,7	12,7	1,9	1,8	2
700-800	16,1	9,7	12,7	10,1	1,6	1	1,3
800-900	7,8	4,6	4,8	8,1	1	0,6	0,6
900-1000	5	3,7	3	6,4	0,8	0,6	0,5
1000-1100	4,5	3,3	2,6	5,3	0,8	0,6	0,5
1100-1200	3,1	2,5	1,8	4,4	0,7	0,6	0,4
1200-1300	2,9	2,4	1,6	3,7	0,8	0,6	0,4
1300-1400	2,4	1,9	1,3	3,1	0,8	0,6	0,4
1400-1500	2,2	1,7	1,2	2,6	0,8	0,7	0,5
1500-1600	1,8	1,5	1	2,2	0,8	0,7	0,5
1600-1700	2,2	1,9	1,2	1,9	1,2	1	0,7
1700-1800	1,8	1,5	1	1,5	1,2	1	0,7
1800-1900	1,2	1	0,7	1,2	1	0,8	0,6

Tabla 4.2: Comparación espectral de los espectros “seleccionadores” con AM0.

	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	ΔV_{oc} (%)	ΔJ_{sc} (%)
Fabricante	2,6	17,2	-	-
Top	2,58	17,5	-0,8	1,7
Middle	2,56	22,5	-1,5	30,8
Bottom	2,56	19,4	-1,5	12,7

Tabla 4.3: Comparación de condiciones de funcionamiento de una celda bajo los 3 espectros “seleccionadores” y su comparación con los valores nominales proporcionados por el fabricante.

mayor irradiancia que presenta este espectro. En el caso de la tensión de circuito abierto vemos que en los tres casos son 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 usamos 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 demasiado respecto de la RE usada para los cálculos.

4.2. Estudio Sobre la Polarización Eléctrica

Hallados los espectros “seleccionadores”, se procedió a buscar las condiciones de polarización eléctrica más adecuadas para la subcelda de germanio de las celdas de triple-juntura de estructura monolítica de GaInP/GaAs/Ge, ya que como se mencionó anteriormente (Sección 2.2), en este tipo de celdas la condición de cortocircuito de la subcelda bajo estudio no significa tensión cero en sus terminales (si la celda triple-juntura está polarizada a 0 V, cada subcelda queda polarizada en inversa a una tensión aproximadamente igual a la suma de las V_{oc} de las otras dos).

Para ello se siguió el procedimiento descrito en el artículo de Meusel et al. [20]. En este método, seleccionada la subcelda de Ge se minimiza la RE en 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 4.6 se muestran los resultados de variar la tensión de polarización en 500 nm y en 800 nm, donde la subcelda de germanio no debería tener respuesta. Si bien fue posible hallar un mínimo para 500 nm éste no se halló para 800 nm; en esta 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. Por consiguiente, 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 tensión para 800 nm; este valor se eligió en 1,3 volt. Aclaremos que no se fue más allá de 1,5 volt por no permitirlo el diseño del circuito de polarización eléctrica.

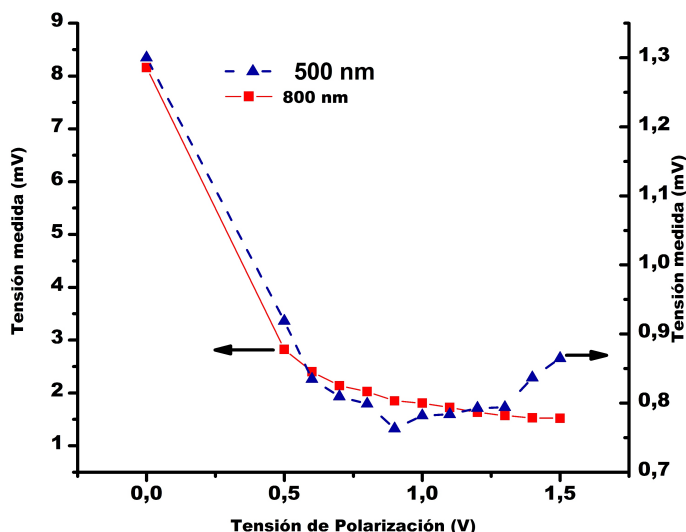


Figura 4.6: Variación de la tensión medida al variar la tensión de polarización.

En la Figura 4.7 se observa la RE de la celda de germanio 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 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, la disminución entre 700 nm y 850 nm es de cerca de un 300%, pudiéndose considerar que en esta zona no hay RE para 1,3 volt de tensión de polarización. En la zona de 500 nm a 700 nm la disminución ronda el 60%, aunque la RE en esta zona no llega a desaparecer por completo.

A partir de estos resultados se concluyó que una buena 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 tiene que haber RE .

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 4.8), y a la vez se verificó el comportamiento en 500 nm y 800 nm (Figura 4.9).

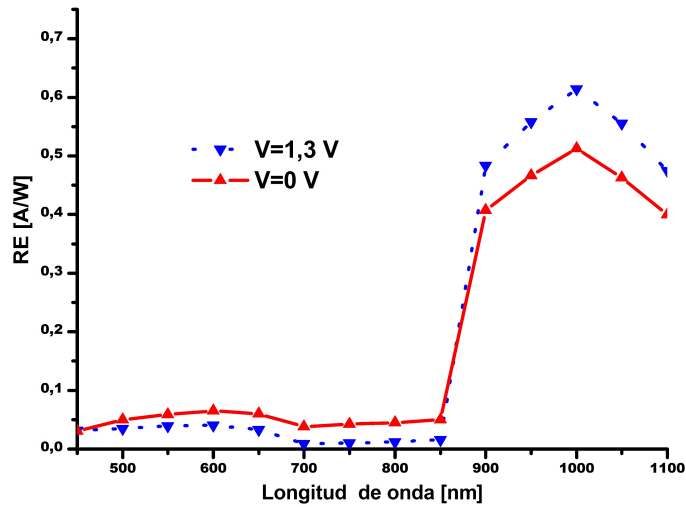


Figura 4.7: RE de la celda de germanio para diferentes tensiones de polarización.

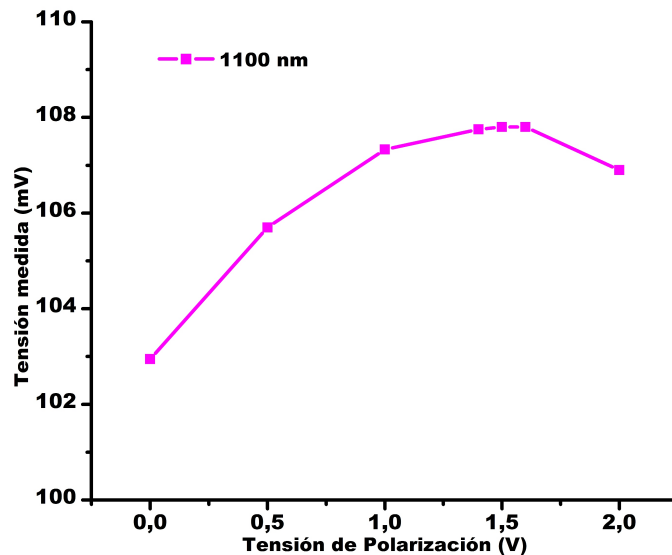


Figura 4.8: Variación de la tensión para 1100 nm medida al variar la tensión de polarización.

Puede observarse en la Figura 4.8 un máximo de respuesta en 1,7 volt de tensión de polarización, mientras que para 800 nm (Figura 4.9) hay un mínimo en 1,0 V y en el caso de 500 nm no se puede hallar un mínimo dado que el *lock-in* no converge debido a que la señal es intrínsecamente pequeña e implica errores relativos muy grandes en la medición. Dada la mejor relación señal/ruido correspondiente a 1100 nm, 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 4.10 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.

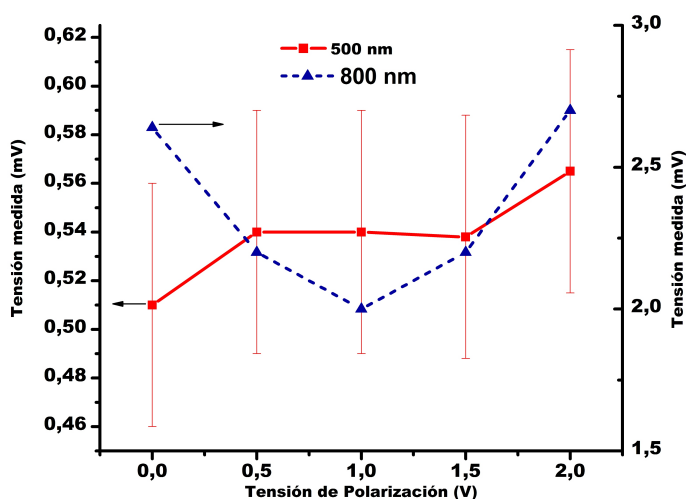


Figura 4.9: Variación de la tensión medida para 500 nm y 800 nm al variar la tensión de polarización.

Es necesario recordar (Sección 2.2) que las dos 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. Por ello la medición de RE en estas subceldas pueden ser realizadas con tensión cero en los terminales de la multi-juntura.

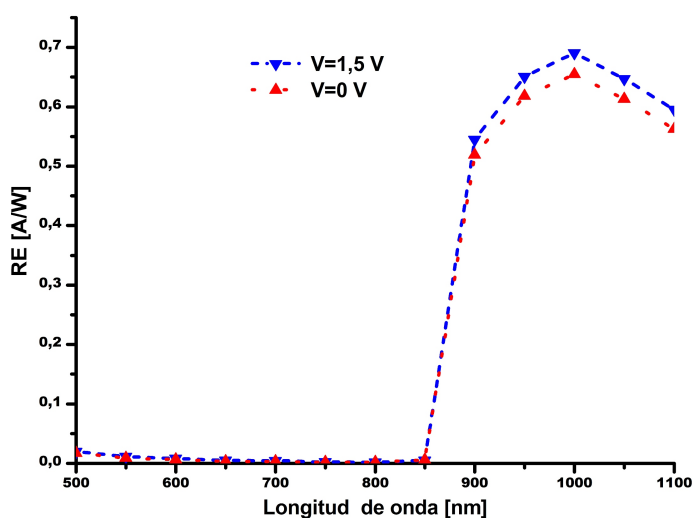


Figura 4.10: RE de la celda de germanio para diferentes tensiones de polarización. La tensión mas adecuada fue hallada utilizando el método de maximización respuesta.

El estudio de la polarización de la subcelda de germanio fue realizado antes de contar con una celda calibrada en respuesta espectral para longitudes de onda entre 1100 nm y 1900 nm. Esto explica porque en las Figuras 4.7 y 4.10, se observa la RE de la subcelda de germanio solo hasta 1100 nm. Sin embargo, este estudio es esencial para una correcta calibración del equipo en el intervalo 1100-1900 nm.

4.3. Transferencia de la Calibración

Como última etapa necesaria para la medición de RE de celdas triple-juntura, es necesaria la calibración de un patrón de RE que abarque las longitudes de ondas entre 300 nm y 1900 nm. Dicho patrón, o celda de referencia, se obtuvo a partir de una celda de triple-juntura ATJ (*Advanced Triple Junction*) InGaP/GaAs/Ge, ya calibrada, provista por *Emcore Corp.*, calibración que fue transferida a otras dos celdas ATJ especialmente acondicionadas para su uso como celdas de referencia en las mediciones con nuestro equipo.

4.3.1. Característica de las Celdas de Referencia

Como fue mencionado con anterioridad, tanto la celda calibrada en RE suministrada por *Emcore* como las dos celdas de referencia (patrones secundarios) están basadas en celdas ATJ de triple-juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica. Estas son celdas con polaridad $n-p$ constituidas sobre un sustrato de Ge de 140 μm [42]. Por esta razón, la celda resulta muy frágil para un uso frecuente en el equipo, de modo que se optó por transferir el patrón de RE a dos celdas CIC (*Covered Interconnected Cell*, celdas con interconectores soldados a los contactos y vidrio protector, ver Figura 4.11) pegadas en soportes de bronce especialmente diseñados para tal uso. Estos soportes, además de permitir la manipulación frecuente, también permiten la conexión sencilla con los contactos de la celda. En la Figura 4.11 se muestra una de estas referencias ya montada en el mencionado soporte. Para el proceso de transferencia la celda *Emcore* calibrada se colocó en el soporte propio del equipo de medición, que también puede verse en la Figura 4.11. Los dos patrones secundarios (celdas de referencia CNEA) están basados en uno en una celda de vuelo y el otro en una celda de descarte (“*Ref ATJ Vuelo*” y “*Ref ATJ Descarte*” respectivamente). Ambas celdas difieren en sus características eléctricas, siendo la de descarte una celda que no cumple con las características eléctricas adecuadas para integrarse en un panel solar.

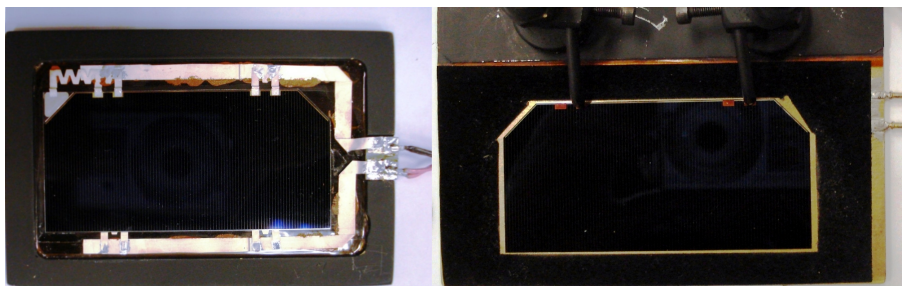


Figura 4.11: Izquierda, patrón secundario, celda ATJ CIC montada en un soporte de bronce pintado. Derecha, celda *Emcore* calibrada en la base del equipo de RE .

4.3.2. Polarización Lumínica para las Celdas a Calibrar

En la Sección 4.1.2 fueron calculados y analizados 3 espectros de polarización lumínica aptos para seleccionar cada subcelda componente de las celdas de triple-juntura InGaP/GaAs/Ge. Estos espectros fueron utilizados satisfactoriamente varias veces para seleccionar y medir subceldas en celdas ATJ *Emcore* de descarte, vuelo, celdas doble-juntura fabricadas por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid y en el momento de transferir el patrón de RE a la celda de referencia de descarte (“*Ref ATJ Descarte*”). Sin embargo, ya sea debido a las características únicas de cada celda como dispositivo semiconductor o por el hecho de ser una celda CIC, no resultaron apropiados al utilizarlos en la celda de referencia de vuelo (“*Ref ATJ Vuelo*”) a la cual se quería

transferir el patrón de *RE*. Más específicamente, a la hora de seleccionar las celdas *middle* (GaAs) y *bottom* (Ge) de manera que cada una de estas subceldas limite la corriente. Para lograr que estas subceldas limiten la corriente se debieron modificar los espectros originales, trabajándose de igual manera que para hallar los espectros “seleccionadores” originales. Puede observarse en la Figura 4.12 que los nuevos espectros son menos intensos que los originales y, en el caso del espectro para la subcelda *middle*, la zona donde responde esta subcelda es en la que más disminuyó la intensidad, pero en el caso de la subcelda *emphbottom* la mayor diferencia se da en regiones donde esta subcelda no responde. Estos nuevos espectros fueron probados con éxito en la celda “*Ref ATJ Vuelo*” [43].

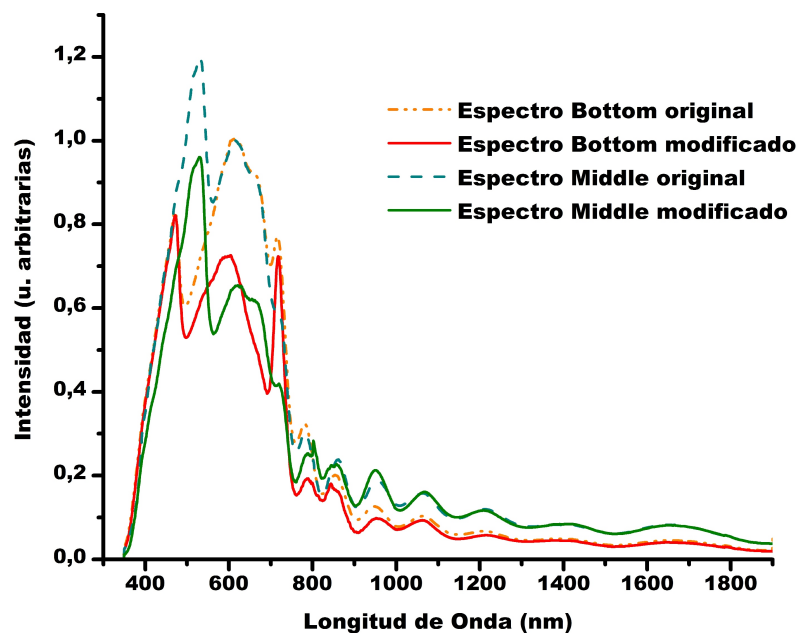


Figura 4.12: Espectros modificados para la selección de las subceldas *emphmiddle* y *emphbottom*.

Con estos dos espectros “seleccionadores” nuevos se efectuaron los mismos estudios realizados para los originales. Los resultados en cuanto a intensidad de los espectros modificados se muestran en la Tabla 4.4 y mientras que los resultados referidos a las condiciones de funcionamiento de la celda “*Ref ATJ Vuelo*” bajo estos espectros se exponen en la Tabla 4.5.

Espectro	Irradiancia (kW/m^2)	ΔIrr (%)
Middle	1,410	3,2
Bottom	1,438	5,3

Tabla 4.4: Intensidad de los espectros “seleccionadores” y su comparación con la constante solar.

	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	ΔV_{oc} (%)	ΔJ_{sc} (%)
Fabricante	2,60	17,2	-	-
Middle	2,55	17,8	-1,9	3,5
Bottom	2,56	17,5	-1,5	1,7

Tabla 4.5: Comparación de condiciones de funcionamiento de la celda “*Ref ATJ Vuelo*” bajo los espectros “seleccionadores” modificados y los valores nominales proporcionados por el fabricante.

Como puede observarse en las Tablas 4.4 y 4.5, los dos espectros modificados crean

mejores condiciones que los originales, ya que los parámetros eléctricos de la celda se ajustan mejor a los nominales proporcionados por el fabricante. En cuanto a la irradiancia de estos espectros se observa que son más cercanas a la estándar del espectro AM0 que la producida por los espectros originales.

4.3.3. Polarización Eléctrica de las Celdas a Calibrar

Otro punto importante para la calibración fue buscar las condiciones de polarización eléctrica más adecuadas para colocar en condiciones de cortocircuito a subcelda de germanio en nuestros nuevos patrones. Siguiendo el método descrito anteriormente (Sección 4.2) para hallar el valor correcto de tensión de polarización eléctrica al cual medir dicha subcelda, se obtuvo como resultado una tensión de 1,35 V para la subcelda de Ge de las celdas de referencia CNEA. Cabe aclarar que, si bien se optó por este valor de polarización eléctrica, no se observó variación apreciable en la respuesta de la celda en el intervalo de 1,15 V a 1,65 V, siendo esto consistente con el hecho de que el espectro de polarización lumínica fue optimizado para este tipo de celdas y que según los resultados obtenidos por Meusel et al. [20] la mayor desviación de la RE correcta se produce con polarizaciones lumínicas lejanas a la condición real de funcionamiento 4.2.

Para el caso de la celda “*Ref ATJ Descarte*” que se calibró con los espectros originales también se realizó el estudio de las condiciones de polarización eléctrica más adecuadas, dando como resultado una tensión de polarización eléctrica de 1,30 V.

4.3.4. Transferencia del Patrón de Respuesta Espectral

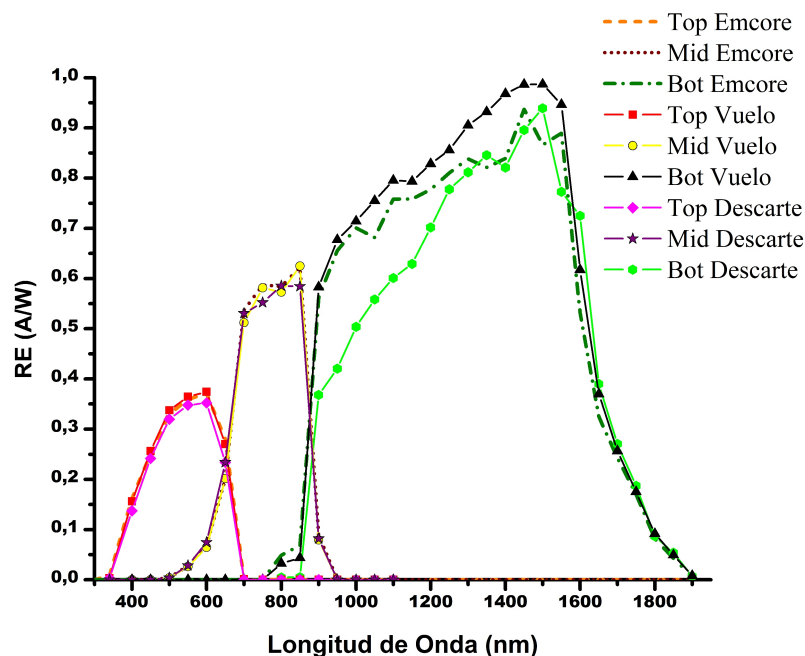


Figura 4.13: Transferencia de la referencia de RE.

Definidas las polarizaciones lumínica y eléctrica para cada subcelda de las celdas de referencia CIC se procedió a la medición de las mismas. Se realizaron varias mediciones de manera de evaluar la repetitividad de la medición, así como también para poder evaluar la confiabilidad del equipo y estimar el error asociado a los valores de calibración del nuevo

patrón.

La nueva *RE* patrón se calculó promediando punto a punto todas las mediciones de cada subcelda; el resultado final puede observarse en la figura 4.13, donde se muestra además la *RE* patrón suministrada por *Emcore*.

Las diferencias que se observan en la *RE* de las diferentes celdas son esperables, y explican por ejemplo porque la celda *Ref ATJ Descarte* es considerada una celda que no cumple con las características eléctricas adecuadas para integrarse en un panel solar. En el caso de la *Ref ATJ vuelo* el hecho de que la respuesta de la celda de germanio sea un poco más elevada puede ser explicado por el hecho de que es una celda CIC y que en las celdas *ATJ Emcore* bajo estudio las estructura antirreflectante optimizada incluye al vidrio de protección, que a su vez posee una capa antirreflectante.

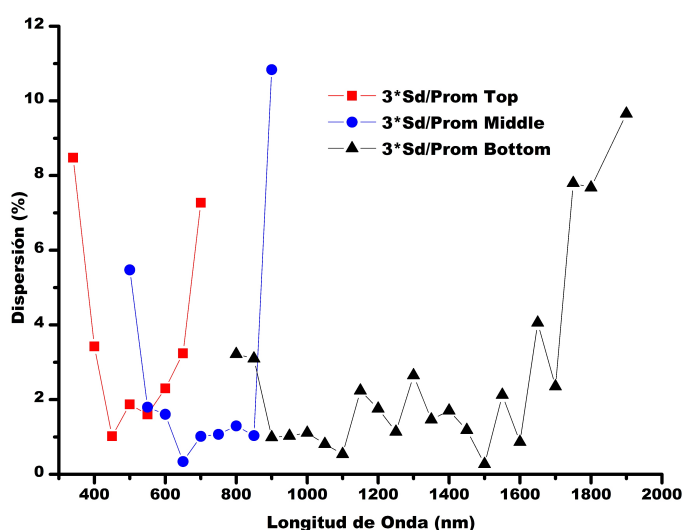


Figura 4.14: Asignación de error en la medición de RE en celdas ATJ.

Como forma de estimar el error asociado a este nuevo patrón se utilizó el triple de la desviación estandar (intervalo de confianza 99.7%) calculada a partir de varias mediciones realizadas para cada subcelda. Cabe señalar que el cálculo por propagación de error utilizando la Formula (2.3) no fue posible realizarlo debido a la falta de este dato en los valores de *RE* del patrón suministrado por *Emcore*. Los resultados obtenidos muestran que en las zonas centrales donde cada subcelda tiene respuesta el error varía entre el 1 y el 3%, y se incrementa hasta un 10% en las longitudes de onda extremas de cada subcelda, donde la señal involucrada es muy pequeña (ver Figura 4.14). Considerando la gran cantidad de posibles errores introducidos en la medición (Sección 2.4) este es un valor aceptable [16].

Con las calibraciones de los 2 patrones secundarios se cuenta con las referencias adecuadas para la medición de celdas multi-juntura entre los 300 y 1900 nm. Además, al realizar la transferencia a dichos patrones se demostró la confiabilidad del equipo y la utilidad de las modificaciones que permitieron la medición automática de la *Respuesta Espectral*.

Capítulo 5

Mediciones y Resultados

Como última parte del presente trabajo se exponen una serie de resultados obtenidos mediante el uso del equipo de medición de *Respuesta Espectral* luego de las modificaciones antes expuestas. Parte de estos resultados incluyen la medición de celdas *doble-juntura InGaP/GaAs Spectrolab* y *triple-juntura ATJ InGaP/GaAs/Ge Emcore*, celdas para uso con concentración provistas por *Instituto de Energía Solar (IES)* de la *Universidad Politécnica de Madrid (UPM)* de España y celdas utilizadas en ensayos de daño por radiación realizados en el DES en el marco del proyecto Paneles Solares de la misión SAC-D de la CONAE.

5.1. Medición de Celdas Multi-juntura Comerciales y su Eficiencia Cuántica Externa

En la Figura 5.1 y 5.2 se muestra la medición de la *respuesta espectral* en una de celdas *doble-juntura Spectrolab* y *triple-juntura ATJ Emcore*, respectivamente. Además se muestra la *Eficiencia Cuántica Externa* calculada a partir de la *RE* medida y la aplicación de la Ecuación (2.5).

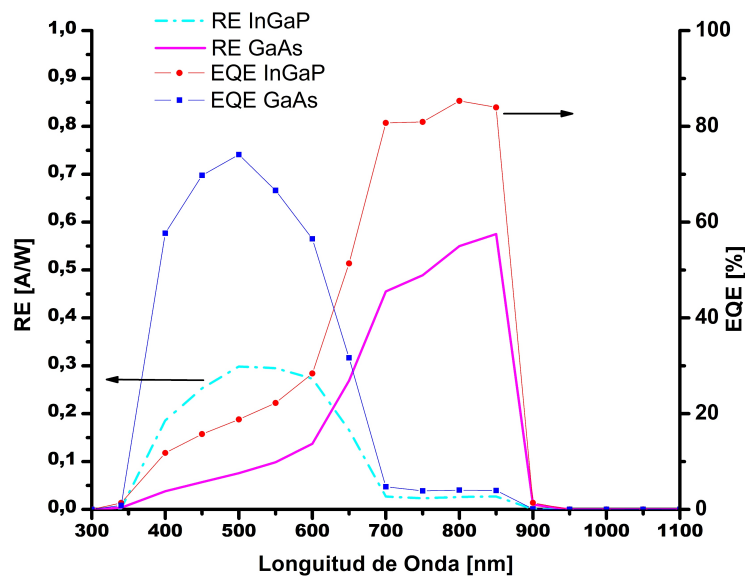


Figura 5.1: Respuesta Espectral y Eficiencia Cuántica Externa calculada a partir de esta de una celda *doble-juntura Spectrolab*.

Analizar la *Eficiencia Cuántica Externa* permite tener una idea de que tan buena es la celda en lo referido al proceso de absorción de fotones y generación de pares que aporten a la corriente fotogenerada, donde el ideal sería 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.

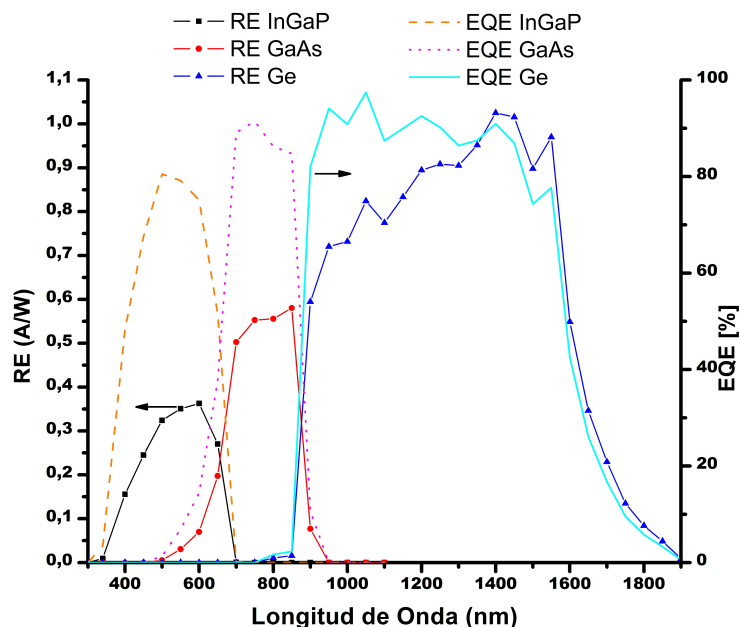


Figura 5.2: Respuesta Espectral y Eficiencia Cuántica Externa calculada a partir de esta de una celda triple-juntura Emcore.

5.2. Medición de Celdas Simple y Multi-juntura para uso con Concentración

Algunas de las modificaciones realizadas al equipo para mejorar sus prestaciones fueron pensadas para permitir la medición de celdas de muy pequeñas dimensiones, como las celdas multi-juntura para aplicaciones terrestres fabricadas por el IES de la UPM, y cedidas en el marco del proyecto de colaboración “Caracterización Comparada de Células Multiunión Basadas en Semiconductores III-V”, Proyecto Semilla en el marco del programa Ayuda para la Realización de Actividades con Latinoamérica, financiado por la UPM. Estas celdas fueron diseñadas para su uso terrestre con concentración y su superficie es de aproximadamente 1 mm². Una de estas celdas puede visualizarse en la Figura 5.3, donde también se visualiza el soporte en el que está montada.

La medición de *Respuesta Espectral* en estas celdas se realizó utilizando el sistema de posicionamiento láser, ya que debido a su pequeña área es muy difícil colocar la referencia y la celda a medir exactamente en la misma posición en el plano de medición. Además se utilizó el sistema de concentración de la luz monocromática para poder tener un nivel de señal aceptable, limitando con este sistema el área utilizable en el plano de medición. Por ello estas celdas fueron medidas usando como referencia una celda de silicio cristalino calibrada en el DES, puesto que no se cuenta con celdas multi-juntura calibradas de área comparable con las celdas del IES.

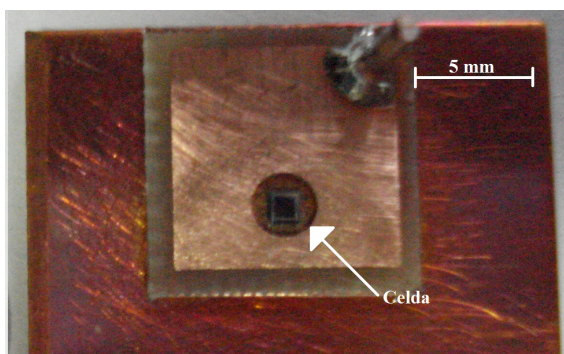


Figura 5.3: Celda multi-juntura para aplicaciones terrestres fabricadas por IES.

En la Figura 5.4 se exponen los resultados de la medición de tres de estas celdas, dos mono-juntura de InGaP [36] con y sin capa antirreflectante, y una doble-juntura InGaP/GaAs. En la Figura 5.4.I se visualiza la utilidad de la medición de RE ya que, por ejemplo, permite evaluar la mejora introducida por el tratamiento antirreflectante en la superficie de la celda.

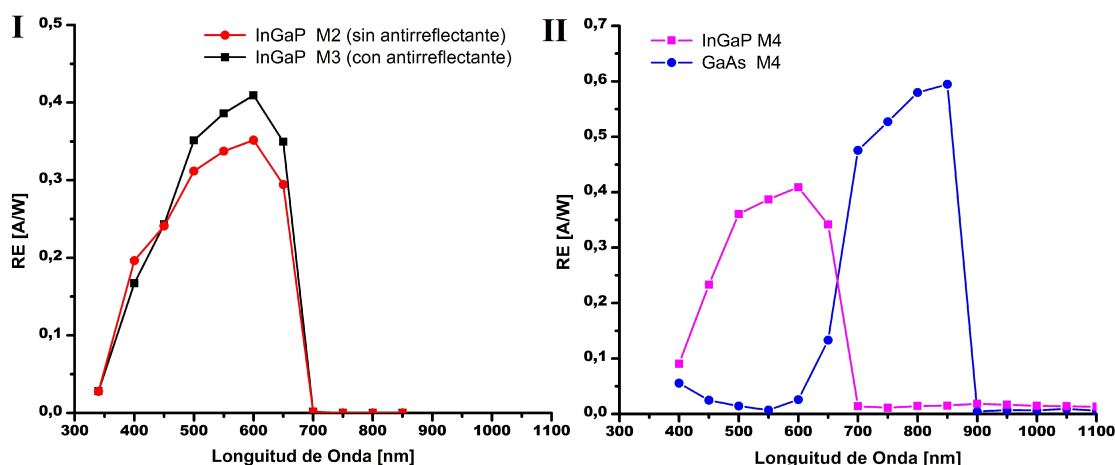


Figura 5.4: Respuesta Espectral de celdas para aplicaciones terrestres fabricadas por IES. I- RE de dos celdas mono-juntura de InGaP con y sin capa antirreflectante. II- RE de una celda doble-juntura InGaP/GaAs.

5.3. 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 [26,30,32,33]. Uno de estos estudios es la evaluación del daño por radiación en celdas de triple-juntura ATJ *Emcore*. Es por ello que se realizó la medición de RE de una celda ATJ a ser irradiada con protones de 10 MeV en el acelerador de iones pesados TANDAR de la CNEA, así como la medición luego de la irradiación.

Los resultados de la medición antes y después de la irradiación, con una fluencia total de $3,08 \cdot 10^{10}$ p/cm², pueden verse en la Figura 5.5. 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*), no coincide antes y después de la irradiación. Considerando lo expresado anteriormente en cuanto al error estimado con que se mide la *RE* puede concluirse que para la dosis utilizada se produjo degradación en la *RE* de la subcelda de Ge debido al daño provocado por la radiación (ver Figura 5.5) ya que las diferencias de *RE* en esta subcelda antes y después de irradiar rondan el 6% en la zona central de dicha subcelda [43]. Esto es compatible con el hecho de que la subcelda de germanio es mas susceptible al daño por radiación, para protones de 10 MeV, que las subceldas restantes [40].

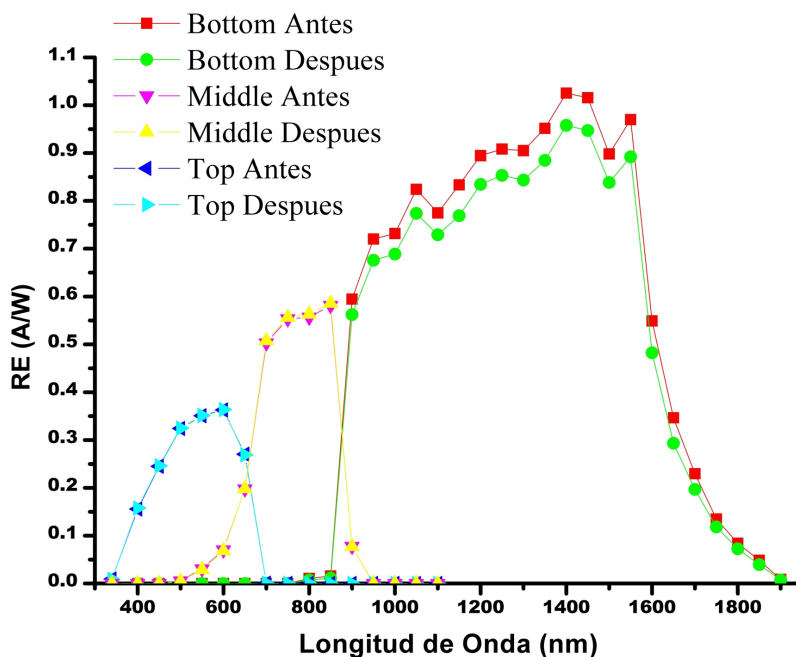


Figura 5.5: RE de una celda ATJ antes y después de su irradiación con protones.

Una posible forma de evaluar el daño provocado por radiación es calcular la corriente de corto circuito de cada subcelda mediante la fórmula (4.1) y el espectro estándar AM0. Los pasos a seguir para ello son similares a los usados para calcular los espectros “seleccionadores” para cada subcelda (sección 4.1.2). 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 5.6, donde también se exponen los resultados de la integración numérica para cada subcelda. Para las subceldas *top* y *middle* no se observan diferencias 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% entre antes y después de la irradiación. Si bien esta reducción en la corriente no debería afectar 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, es posible que el daño degrade otro parámetro de la celda como ser el factor de forma o la tensión de circuito abierto [40] y de esta forma se vean reducidas las prestaciones generales de la celda.

Que este cambio en la J_{sc} de la subcelda *bottom*, debido al daño por radiación, no afecte la corriente de salida de la celda es precisamente lo buscado en el diseño de esta [39]. De esta forma las subceldas de Ge y GaAs, que son más susceptibles al daño por radiación [39], disminuirán su J_{sc} a lo largo de su vida útil sin afectar la corriente de salida de la celda.

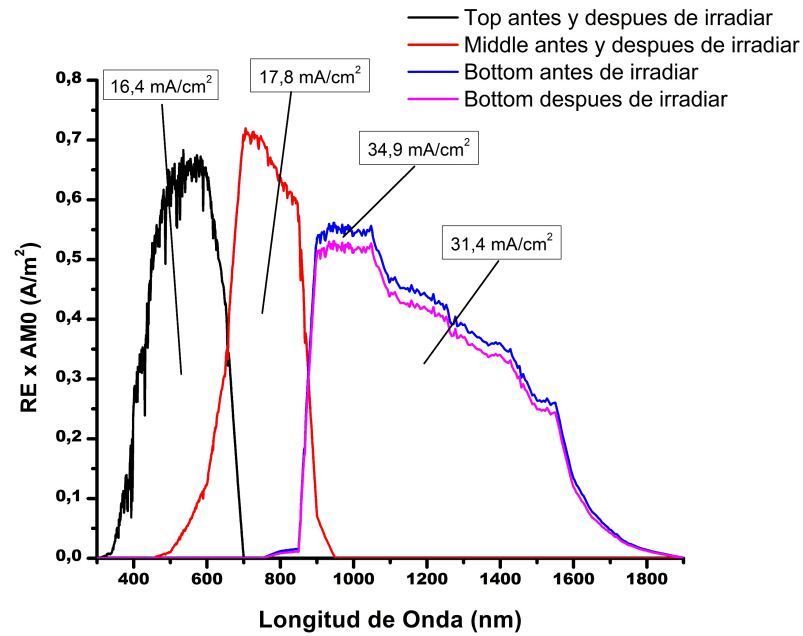


Figura 5.6: Densidad de corriente de cortocircuito en función de la longitud de onda para las tres subceldas componentes de una celda ATJ. En los casos de la subcelda top y middle no se observan diferencias antes y después de la irradiación, en el caso de la subcelda bottom se observa una degradación en densidad de corriente de cortocircuito antes y después de la irradiación.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue extender la capacidad de medición del equipo de respuesta espectral preexistente, así como lograr la automatización de la misma y calibrar dicho equipo en el nuevo rango de medición. Para ello se modificó el arreglo experimental preexistente diseñado para la medición de *Respuesta Espectral* en celdas mono-juntura a fin poder medir con el mismo arreglo celdas multi-juntura para usos terrestre y espacial. Esto se logró mediante la ampliación del rango de longitudes de onda en que puede medir dicho arreglo (300 nm a 1900 nm), la adaptación de la luz de polarización para llevarlas a condiciones espectrales y de irradiancia similares a las del espectro solar estándar AM0, y la posibilidad de cambiar la distribución espectral de dicha luz de polarización. Además se automatizó con éxito la medición de respuesta espectral mediante la incorporación de motores paso a paso, la fabricación del hardware necesario para su funcionamiento y el desarrollo del software para su utilización. Durante el desarrollo de estas modificaciones del equipo preexistente se adquirieron valiosos conocimientos de electrónica y programación, así como habilidad en el diseño y fabricación de piezas y componentes mecánicos. Como parte de la automatización de la medición se desarrolló el software que controla el equipo de medición y que a su vez mide y calcula, automáticamente, la *Respuesta Espectral* de celdas tanto mono como multi-juntura.

Se adquirieron conocimientos teóricos y experimentales referidos a la conversión fotovoltaica, conocimientos que fueron aplicados, en particular, para la transferencia del patrón de respuesta espectral necesario para la medición en el equipo una vez realizadas la modificaciones en el equipo para la medición de celdas multi-juntura.

Se logró transferir el patrón de *Respuesta Espectral* para la medición de esta propiedad en celdas de triple-juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica (aunque este patrón puede ser utilizado para medir otros tipos de celdas), concluyendo con esto el desarrollo del equipo para medición de celdas multi-juntura. Para ello fue necesario estudiar el espectro de las lámparas de polarización de 250 W, habiéndose comprobado que modificar la distancia de esta al plano de medición o variar su tensión de alimentación no lo modifica en forma apreciable, aunque si modifica la intensidad de luz que llega a dicho plano. Con estos espectros se hallaron las mejores condiciones de iluminación para cada subcelda mediante la simulación por computadora de la superposición de los espectros de dos lámparas dicróicas de 250 W filtrados por diferentes filtros pasa altos, bajos, neutros y especiales (*KG4*). A estos espectros se los comparó con el espectro AM0 tanto en su intensidad global como desde el punto de vista espectral, encontrándose que se puede considerar que cada subcelda está en condiciones similares a las normales de funcionamiento. Para una correcta transferencia también se estudió la dependencia de la *RE* con las condiciones de

polarización eléctrica, encontrándose variaciones para la subcelda de germanio asociadas al hecho de que la condición de cortocircuito para dicha subcelda no se encuentra en caída de tensión igual a cero en los terminales de la celda de triple-juntura, sino en una tensión superior que depende de la celda a medir. Dado este resultado se desarrolló un método para hallar esta condición de corto circuito en las celdas a medir. Particularmente se halló que la dependencia de la medición de la *Respuesta Espectral* respecto a la tensión de polarización para la subcelda de germanio es despreciable en un rango de aproximadamente 0,5 V una vez maximizada la tensión de respuesta de la celda. Aunque es necesario realizar ulteriores verificaciones, esto puede atribuirse a la bondad del espectro de polarización construido para que limite esta subcelda.

Durante la transferencia de la referencia se adquirió experiencia en el cálculo y elección de espectros de polarización lumínica y del valor de tensión óptimos para polarizar la celda multi-juntura, conocimientos que resultan valiosos para las futuras mediciones de celdas de diferentes características.

Se estimó el error asociado a la medición de la respuesta espectral en nuestro equipo, resultando en una dispersión menor al 3% para las longitudes de onda donde responde la celda. 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 alguna modificación sobre la celda, son significativas o no.

Se calculó, mediante 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 este tipo de daño. El cálculo de la corriente de cortocircuito puede ser aplicado a diferentes espectros de iluminación y de esta forma evaluar las prestaciones de la celda bajo ese espectro particular.

Para finalizar, cabe señalar que las mejoras introducidas para mejorar las prestaciones generales del equipo, permitieron medir celdas de 1 mm² de área para uso terrestre, extendiendo aún más las prestaciones del equipo y demostrando la confiabilidad de este en la medición de celdas de varios formatos, tamaños y tecnologías. Estas mediciones son de suma importancia para las investigaciones llevadas a cabo por el Departamento Energía Solar, y le otorgan al grupo una capacidad única en el país en cuanto al estudio de celdas solares para uso espacial.

Bibliografía

- [1] M. A. Green et al. Solar cell efficiency tables (version 37). *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 19:84–92, (2011).
- [2] M. A. Green. *Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. University of New South Wales, Australia, (1992).
- [3] ASTM N^o E 490-00. Standard extraterrestrial spectrum reference (<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>), (2000).
- [4] C . Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, inc., 7th edition, (1996).
- [5] J. I. Pankove. *Optical Processes in Semiconductors*. Dover Publications, (1975).
- [6] S. J. Fonash. *Solar Cells Device Physics*. Academic Press, (1981).
- [7] A. S. Grove. *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, (1967).
- [8] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin. *Solid State Physics*. Holt-Saunders, (1976).
- [9] S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, (1981).
- [10] J. M. Olson, D. J. Friedman, and Sarah Kurtz. Chapter 9: High-efficiency iii-v multijunction solar cells. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineerings*, pages 359–411. John Wiley & Sons, Ltd, (2000).
- [11] L. C. Hirst and N. J. Ekins-Daukes. Fundamental losses in solar cells. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, pages n/a–n/a, (2010).
- [12] R. Lagos et al. Contamination and gettering evaluation by lifetime measurements during single crystal cell processing. In *Proceedings of the 1st. WCPEC, 1629*, (1994).
- [13] R. M. Swanson. Point-contact solar cells: modeling and experiment. *Solar Cells*, 17:85, (1986).
- [14] C. H. Henry. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *J. Appl. Phys.*, 51:4494, (1980).
- [15] A. Luque and S. Hegedus, editors. *Handbook of Photovoltaics*. John Wiley & Sons, (2003).
- [16] K. Emery et al. Photovoltaic spectral responsivity measurements. In *Proceedings of the 2nd WCPEC, 2298*, (1998).

- [17] E. J. Haverkamp et al. Multi junction spectral response measurement setup based on high power leds for subcell selection. In *Proceedings of the 22nd EuPSEC, 276*, (2007).
- [18] ASTM N^o E 1021-84. Standard methods for measuring the spectral response of photovoltaic cells, (1984).
- [19] Norma IRAM 210013-12. Métodos normalizados para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas, (2000).
- [20] M. Meusel et al. Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 11:499–514, (2003).
- [21] D. L. King et al. New methods for measuring performance of monolithic multi-junction solar cells. In *Proceedings of the 28th IEEE PVSC, 1197*, (2000).
- [22] ASTM N^o E 2236-05. Measurement of electrical performance and spectral response of nonconcentrator multijunction photovoltaic cells and modules., (2005).
- [23] S. R. Wenham, M. A. Green, and M. E. Watt. *Applied Photovoltaics*. University of New South Wales, Australia, (1995).
- [24] D. Aiken et al. Temperature dependent spectral response measurements for ill-v multijunction solar cells. In *Proceedings of the 29th IEEE PVSC, 828*, (2002).
- [25] M. Alurralde et al. Últimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8:4.01–4.06, (2004).
- [26] M. Alurralde et al. Development of photovoltaic modules for space applications in argentina. In *Proceedings of the 20th EuPSEC, 538*, (2005).
- [27] C. G. Bolzi et al. Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5:4.07–4.12, (2001).
- [28] C. G. Bolzi et al. Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales prgentinas - primer módulo para ensayos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7:04.07–04.12, (2003).
- [29] M. Barrera et al. Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in argentina. In *Proceedings of the 23rd EuPSEC, 781*, (2008).
- [30] M. J. L. Tamasi et al. Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10 mev en celdas solares de Silicio cristalino. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11:19–24, (2002).
- [31] S. Fortin, M. G. Martínez Bogado, and J. Plá. Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9:04.01–04.06, (2005).
- [32] M. Alurralde et al. Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82:531–542, (2004).

- [33] M. Alurralde et al. Advances in the development of photovoltaics for space applications in argentina. In *Proceedings of the 22nd EuPSEC*, 687, (2007).
- [34] S. Fortin. Respuesta espectral de celdas solares multijunturas para aplicaciones espaciales. *informe final – Laboratorios 6 y 7, Departamento de Física – FCEyN-UBA*, (2005).
- [35] J. Garcia. Medicion de la respuesta espectral de celdas solares multijuntura de estructura monolitica. *informe final – Laboratorios 6 y 7, Departamento de Física – FCEyN-UBA*, (2007).
- [36] H. Socolovsky, J. Garcia, and J. Plá. Setup development for spectral response measurement on multijunction solar cells. In *Proceedings of the 25th EuPSEC*, 854, (2010).
- [37] http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso.
- [38] J. Plá et al. Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales iii-v. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11:04.85–04.92, (2007).
- [39] M. Stan et al. The development of > 28% efficient triple-junction space solar cells at emcore photovoltaics. In *Proceedings of the 3rd. WCPEC*, 662, (2003).
- [40] R. J. Walters et al. Radiation response mechanisms in multijunction III-V space solar cells. In *Proceedings of the 31st IEEE PVSC*, 542, (2005).
- [41] ASTM N^o E 927-91. Standard specification for solar simulation for terrestrial photovoltaic testing, (1991).
- [42] Advanced Triple-Junction (ATJ) high efficiency solar cells for space applications, Emcore Photovoltaics Product Brief, (2004).
- [43] J. Garcia, H. Socolovsky, and J. Plá. Desarrollo de un equipo de medición de respuesta espectral en celdas solares multijuntura: Última etapa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14:04.01–04.07, (2010).