

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN



Tesis doctoral

MODELIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS  
SOLARES III-V MULTIUNIÓN Y DE MÓDULOS DE  
CONCENTRACIÓN

Eduardo Fernández Fernández  
Santiago de Compostela, marzo de 2012



**Dr. Antonio Jesús García Loureiro**, Profesor titular del Área de Electrónica de la Universidad de Santiago de Compostela,

**Dr. Pedro Jesús Pérez Higuera**s, Profesor titular del Área de Tecnología Electrónica de la Universidad de Ján.

**HACEN CONSTAR:**

Que la memoria titulada **Modelización y Caracterización de Células Solares III-V Multiunión y de Módulos de Concentración** ha sido realizada por D. Eduardo Fernández Fernández bajo nuestra dirección en el Departamento de Electrónica y Computación de la Universidad de Santiago de Compostela, y constituye la Tesis que presenta para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Santiago de Compostela, marzo de 2012



Fdo: **Dr. Antonio García Loureiro**  
Codirector de la Tesis



Fdo: **Dr. Pedro Jesús Pérez Higuera**  
Codirector de la Tesis



Fdo: **Eduardo Fernández Fernández**  
Autor de la Tesis



A mi abuela Albina Fernández Cenera

*No pretendamos que las cosas cambien, si siempre hacemos lo mismo. La crisis es la mejor bendición que puede sucederle a las personas y países, porque la crisis trae progresos, la creatividad nace de la angustia como el día de la noche oscura. Es de la crisis que nacen la inventiva, los descubrimientos y las grandes estrategias. Quien supera la crisis se supera a sí mismo sin quedar superado. Quien atribuye la crisis a sus fracasos y penurias, violenta su propio talento y respeta más los problemas que las soluciones, la verdadera crisis es la crisis de la incompetencia. El inconveniente de las personas y los países es la pereza para encontrar las salidas y soluciones. Sin la crisis no hay desafíos, sin desafíos la vida es una rutina, una lenta agonía. Sin crisis no hay méritos. Es en la crisis donde aflora lo mejor de cada uno, porque sin crisis todo viento es caricia. Hablar de crisis es promoverla, y callar en la crisis es exaltar el conformismo. En vez de esto, trabajemos nuestro talento y nuestras habilidades para encontrar soluciones, acabemos de una sola vez con la única crisis amenazadora, que es la tragedia de no querer luchar por superarla.*

Albert Einstein



## AGRADECIMIENTOS

Como desde la mayor proeza realizada por un ser humano, hasta la más humilde de las tareas, nunca hubieran sido posibles sin la ayuda y colaboración de un número determinado de personas. Este trabajo de tesis no es una excepción a esta regla. Intentaré de todo corazón no olvidarme de las personas que me han ayudado y han sido claves en su desarrollo. Utilizaré un orden cronológico de la gente con la que me ido encontrado en este viaje que me servirá de ejercicio de memoria para no olvidarme de nadie. Al mismo tiempo, de forma sentida, recordaré cada uno de los pasos que me han llevado hasta el punto y seguido que es el manuscrito que ahora mismo tenéis en vuestras manos:

- ✓ Quiero agradecer de todo corazón a la persona que me ha animado desde el principio a emprender este trabajo y que ha formado parte de la “casa caracol” que durante tanto tiempo fue nuestro hogar, las cosas no fueron fáciles. Ella me aportó equilibrio, paciencia y mucho cariño, sin ella esta tesis no hubiera sido posible. A Nerea Gallardo.
- ✓ A mis amigos, Efrén, Telmo, Brais, Juan, Hector, Lucas...por ser una fuente inagotable de buenos sentimientos.
- ✓ A Mónica Quijada, Aitor Villaverde y Martín Ojanguren por permitirme dar los primeros pasos en la concentración fotovoltaica y a enseñarme lo que es ser ingeniero.
- ✓ A Antonio García Loureiro, por confiar en mí desde el inicio y dirigir mi tesis. Sus consejos y experiencia han sido claves a lo largo de todo este trabajo de investigación.
- ✓ Thanks to Dr. Gerald Siefer, Tobias Gandy, Michael Schachtner and Dr. Andreas Bett, for eight exciting months at Fraunhofer ISE. They have taught me all that I know about multijunction solar cells.
- ✓ A Jorge Aguilera, por abrirme las puertas del grupo IDEA, algo que ha influido tanto en mi tesis que ha llegado al punto de cambiar sus objetivos iniciales.
- ✓ A Pedro Gómez, por permitirme sumarme al proyecto Sigmasoles, el cual ha sido clave en la forma final que ha tomado mi tesis.

- ✓ A Pedro Pérez, por sumarse como co-director de esta tesis. Él me ha enseñado como ser mucho más eficaz en la realización de las metas marcadas, además de muchas lecciones de lo que significa ser investigador.
- ✓ A Gabino Almonacid, por confiar en mí como investigador y acogerme como miembro del Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente, algo que tiene un gran significado personal para mí.
- ✓ A Juan Ignacio, por “pelearse” diariamente conmigo con los instrumentos necesarios para llevar a cabo esta tesis, que no siempre han hecho lo que uno desearía. Él me ha enseñado lo que es ser un gran técnico y un todoterreno en cualquier dificultad que se nos presentó. Y a Ignacio Vargas, por llevar con esfuerzo y tenacidad las tareas que un investigador teme realizar.
- ✓ A Florencia Almonacid, *Flori*. Ella ha sido el quinto *Beatle* de esta tesis. Su paciencia, ayuda a levantarme cuando lo creía impensable, su equilibrio, su cariño, su fortaleza, su ayuda en la elaboración de la tesis y generosidad, se me hacen realmente increíbles en un ser humano. Sin ella dudo de haber llegado hasta la meta que me propuse, de todo corazón, gracias.
- ✓ Por último y por lo tanto más importante, y rompiendo el orden cronológico. A mi abuela Albina Fernández Cenera, una mujer de carácter, que aunque ya no se encuentre entre nosotros, la sigo sintiendo muy cerca. El hecho de que ella haya sido capaz a superar las grandes dificultades que le planteó la vida, me ha dado fuerzas al considerar las mías nimias al lado de las suyas. A mi hermano Ismael, por hacerme sentir entendido cuando nadie más era capaz a hacerlo. A mis padres. A mi padre, por transmitirme su amor por la ciencia y el conocimiento. Y por supuesto, a mi madre. Mi madre, el eje sobre el que todo gira, sin ella no hubiera podido realizar ni ésta ni ninguna otra tarea que me haya planteado en la vida.

## RESUMEN

Este proyecto de tesis se centra en la modelización y caracterización de células solares del tipo III-V multiunión y de módulos de concentración. Para ello se usan diversas aproximaciones analíticas y numéricas que permitan estudiar los diferentes procesos que ocurren dentro del dispositivo y en el módulo, con el fin último de optimizar el diseño de los mismos. En la actualidad, para reducir el coste de los sistemas fotovoltaicos (FV) se utilizan sistemas que concentran la luz del Sol en un área de célula de menor tamaño. Esta disminución, proporcional a la concentración de luz producida por las lentes, permite utilizar células de última generación con eficiencias muy elevadas que de otra forma debido a su elevado precio no sería posible emplear, como es el caso de los módulos objeto de estudio en este proyecto de tesis. Los recientes desarrollos de células, confirmados con datos experimentales, indican que las que mejor se adaptan a las necesidades de los denominados sistemas de concentración solar son las células denominadas III-V, y en concreto las formadas por una triple unión. Cada una de las tres subcélulas que componen el dispositivo se caracteriza porque aprovecha una parte diferente del espectro solar con lo que se gana en eficiencia respecto a las células convencionales de silicio que se vienen utilizando en los últimos años. Estas células son las que presentan la mayor eficiencia. La elaboración de modelos matemáticos en los cuales se pueda evaluar la capacidad de generación de una célula solar o un módulo de concentración bajo distintas condiciones ambientales es de gran utilidad. El primer objetivo de este proyecto de tesis es el de elaborar un modelo de una célula solar III-V multiunión que sea capaz de predecir los datos experimentales característicos de la célula cuando dichas condiciones ambientales cambian. Entre otros parámetros fundamentales que se estudiarán están la  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF, etc, para los cuales se analizará su dependencia con las condiciones ambientales y con el espectro incidente. Estos modelos servirán para optimizar los diseños de estas complejas células solares con el fin de reducir los elevados costes de desarrollo. El segundo objetivo, relacionado directamente con el primero, se centra en el estudio del funcionamiento bajo condiciones reales de operación de distintos módulos de concentración (CPV). Para ello diferentes módulos serán medidos a lo largo de un año, para ser posteriormente modelados y caracterizados.



## ABSTRACT

This thesis project focuses on the modelling and characterization of III-V multijunction solar cells and concentration modules. This is done by using various analytical and numerical approaches for the study of the different processes that occur within the device and the module, with the ultimate goal of optimizing their design. Currently, in order to reduce the cost of photovoltaic systems (PV), which concentrate the sunlight on the small cell area. This device cost, that is proportional to the concentration of light produced by the lens, allows the use of the latest generation of high efficiency cells that would not be possible to be used otherwise because of its high price, as it is the case of the modules analyzed in this thesis project. The recent development of cells, confirmed by experimental data, indicates that the cells that are best suited to the needs of the so-called solar concentrator systems are the III-V cells, specifically those formed by triple junctions. Each of the three subcells that make up the device is characterized because it absorbs a different part of the solar spectrum, what produces a gain in efficiency compared to the conventional silicon cells that have been used in recent years. So, III-V multijunction cells produce the highest efficiencies. The development of mathematical models to evaluate the ability of generating energy of a solar cell or a concentration module under different environmental conditions is very useful. The first objective of this thesis project is to develop a III-V multijunction solar cell model that was able to predict the cell experimental data when environmental conditions change. Among other parameters,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF, etc., were studied, which were analyzed for its dependence on environmental conditions and incident spectrum. These models help to optimize the design of these complex solar cells in order to reduce their high development costs. The second objective, directly related to the first, focuses on the study of performance under real operating conditions of different concentration modules (CPV). These modules will be measured over a year, to be subsequently modelled and characterized.



---

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1:</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
	1.1. Tecnología de concentración fotovoltaica	2
	1.1.1. Célula solar multiunión	4
	1.1.2. Módulo fotovoltaico de concentración	9
	1.2. Consideraciones sobre la CPV	12
	1.3. Objetivos	17
	1.4. Estructura	18
<b>Capítulo 2:</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>21</b>
	2.1. Fundamentos de células solares	21
	2.1.1. La célula FV de una unión	22
	2.1.2. La célula multiunión de tipo III-V de concentración	25
	2.2. Modelos de células multiunión	29
	2.2.1. Modelo C. Baur y A. W. Bett	30
	2.2.2. Modelo S. Kinsey et al.	32
	2.2.3. Modelo C. Dominguez et al.	34
	2.3. Modelos de módulos de concentración	36
	2.3.1. Modelo Sandia	37
	2.3.2. Modelo G. Peharz et al.	41
	2.3.3. Condicionantes para el uso de estos modelos	44

<b>Capítulo 3:</b>	<b>Modelización y caracterización de células III-V multiunión</b>	<b>47</b>
	<b>3.1. Dispositivo experimental</b>	<b>47</b>
	<b>3.2. Resultados experimentales</b>	<b>52</b>
	<b>3.2.1. Medidas de EQE</b>	<b>52</b>
	<b>3.2.2. Medidas a un sol</b>	<b>57</b>
	<b>3.2.3. Medidas a distintas concentraciones</b>	<b>71</b>
	<b>3.3. Modelo matemático propuesto</b>	<b>81</b>
	<b>3.3.1. Introducción del modelo</b>	<b>83</b>
	<b>3.3.2. Resultados del modelo</b>	<b>88</b>
<b>Capítulo 4:</b>	<b>Modelización y caracterización de módulos de concentración</b>	<b>95</b>
	<b>4.1. Dispositivo experimental</b>	<b>96</b>
	<b>4.1.1. Módulos CPV, instrumentos y sistema de medida</b>	<b>97</b>
	<b>4.1.2. Validación y valoración de las medidas</b>	<b>110</b>
	<b>4.2. Resultados experimentales</b>	<b>115</b>
	<b>4.2.1. Influencia del viento</b>	<b>116</b>
	<b>4.2.2. Influencia de la DNI</b>	<b>118</b>
	<b>4.2.3. Influencia de la temperatura del aire</b>	<b>124</b>
	<b>4.2.4. Influencia del espectro</b>	<b>126</b>
	<b>4.2.5. Estudio conjunto de los parámetros atmosféricos</b>	<b>130</b>

---

4.3. Modelo matemático propuesto	140
4.3.1. Introducción del modelo	142
4.3.2. Resultados del modelo	145
Capítulo 5: Conclusiones y líneas de futuro	153
5.1. Conclusiones	153
5.1.1. Principales conclusiones obtenidas de la caracterización y modelado de células III-V de triple unión de concentración	154
5.1.2. Principales conclusiones obtenidas de la caracterización y modelado de módulos de alta concentración	155
5.2. Líneas de Futuro	156
5.2.1. Futuros trabajos en la caracterización y modelado de células III-V de triple unión de concentración	157
5.2.2. Futuros trabajos en la caracterización y modelado de módulos CPV de alta concentración	158
Bibliografía	161
Anexo I: Traslación de las características eléctricas de un módulo CPV a las mismas condiciones atmosféricas	169
Anexo II: Cálculo de la temperatura de célula en un módulo CPV	183
Publicaciones generadas en el marco de la Tesis	197



## ÍNDICE DE SIMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>
$\alpha_s$	Azimut solar	°
$\gamma_s$	Elevación solar	°
$\delta$	Coefficiente de temperatura del punto de máxima potencia de un módulo CPV	%/°C
$\theta_v$	Dirección del viento	°
$\lambda$	Longitud de onda incidente	nm
$\eta$	Eficiencia de un dispositivo fotovoltaico	%
A	Área de un dispositivo fotovoltaico	m <sup>2</sup>
AM	Air mass o masa del aire	
c	Velocidad de la luz en el vacío	$3 \times 10^8$ m/s <sup>2</sup>
DNI	Irradiancia normal incidente	W/m <sup>2</sup>
DNI*	Irradiancia normal incidente en condiciones estandar	W/m <sup>2</sup>
E( $\lambda$ )	Espectro incidente	W/m <sup>2</sup> nm
E <sub>gap</sub>	Energía de la banda prohibida	eV
EQE	Eficiencia cuántica externa	%
ER	Error relativo	%
ER	Error relativo absoluto	%
E <sub>ref</sub> ( $\lambda$ )	Espectro de referencia	W/m <sup>2</sup> nm
E <sub>sim</sub> ( $\lambda$ )	Espectro emitido por el simulador solar	W/m <sup>2</sup> nm
FF	Factor de forma	
FF <sub>0</sub>	Factor de forma de una célula ideal	
h	Constante de Planck	$6,6260 \times 10^{-34}$ Js
I	Corriente de un dispositivo fotovoltaico	A
I <sub>0</sub>	Corriente de saturación de un diodo	A
I <sub>L</sub>	Corriente fotogenerada por un dispositivo fotovoltaico	A
I <sub>mpp</sub>	Corriente del punto de máxima potencia de un dispositivo fotovoltaico	A

$I_{sc}$	Corriente de cortocircuito de un dispositivo fotovoltaico	A
$J_L$	Densidad de corriente fotogenerada	A/m <sup>2</sup>
$k$	Constante de Boltzman	$1,3806 \times 10^{-23}$ J/K
$K_i$	Ratio entre la corriente generada bajo un espectro $E(\lambda)$ y la corriente generada bajo el espectro de referencia $E_{ref}(\lambda)$ para la subcélula $i$	
$m$	Factor de idealidad del diodo	
$P$	Potencia de un dispositivo fotovoltaico	W
$P_{mpp}$	Punto de máxima potencia de un dispositivo fotovoltaico	W
$P_{mpp}^*$	Punto de máxima potencia de un dispositivo fotovoltaico en condiciones estándar	W
$p_{mpp}$	Potencia normalizada a 1	
$q$	Carga del electrón	$1,6021 \times 10^{-19}$ C
QE	Eficiencia cuántica	%
$R^2$	Coefficiente de correlación	
$R_p$	Resistencia en paralelo de un dispositivo fotovoltaico	$\Omega$
$R_s$	Resistencia serie de un dispositivo fotovoltaico	$\Omega$
SR	Respuesta espectral	A/W por longitud de onda
T	Temperatura	°C
$T_{aire}$	Temperatura del aire	°C
$T_c$	Coefficiente de temperatura para el parámetro eléctrico estudiado	%/K
$T_{célula}$	Temperatura de célula	°C
V	Voltaje de un dispositivo fotovoltaico	V
$V_{gap}$	Voltaje del <i>gap</i>	V
$V_{mpp}$	Voltaje en el punto de máxima potencia de un dispositivo fotovoltaico	V

$V_{oc}$	Voltaje de circuito abierto de un dispositivo fotovoltaico	V
VV	Velocidad del viento	m/s
X	Factor de concentración	soles



---

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

a-Si	Silicio amorfo
ASIF	Asociación de Instaladores Fotovoltaicos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CdTe	Teluro de Cadmio
CalLab	Calibration Laboratory
CEAEMA	Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CIGS	Cobre, Indio, Galio y Selenio
CPV	Concentrator PhotoVoltaics
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
FV	FotoVoltaico
GPIB	General Purpose Interface Bus
HCPV	High Concentrator PhotoVoltaics
HIPSS	High Intensity Pulsed Solar Simulator
IEC	International European Commission
IES	Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid
ISFOC	Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración
LCPV	Low Concentrator PhotoVoltaics
LED	Light Emitting Diode
LM	Lattice-Matched
MCPV	Medium Concentrator PhotoVoltaics
MJ	MultiJunction
MM	Metamorphic-Mismatch
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SAD	Sistema de Adquisición de Datos
Si	Silicio
$\mu$ -Si	Silicio microamorfo



# Capítulo 1: Introducción

Los sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV) utilizan, para reducir el coste de los sistemas fotovoltaicos (FV), sistemas que concentran la luz del Sol en un área de célula de menor tamaño. Esta disminución del área de célula va a permitir utilizar células de última generación con las más altas eficiencias logradas en la actualidad con coste razonable. Las células que mejor se adaptan a los sistemas de concentración fotovoltaica son las células denominadas III-V, y en concreto las formadas por una triple unión. Este proyecto de tesis se centra en el estudio de células solares del tipo III-V multiunión y de módulos de concentración que utilizan este tipo de células.

En este capítulo, en primer lugar, se va a realizar una descripción de la tecnología de concentración fotovoltaica, centrándose en las células y módulos de concentración. En la segunda sección se presenta una panorámica de la situación actual de esta tecnología y se lleva a cabo una comparación con otras tecnologías de generación eléctrica basadas en la energía solar. Por último los objetivos marcados y la estructura seguida en esta tesis se plantean en las dos últimas secciones.

## 1.1. Tecnología de concentración fotovoltaica

La Concentración Fotovoltaica, comúnmente denominada CPV (del inglés: *Concentrator PhotoVoltaics*), se basa en el uso de sistemas ópticos para aumentar la luz que reciben las células fotovoltaicas. La idea es emplear dispositivos ópticos de tecnología accesible y barata (lentes y espejos) para concentrar la luz sobre pequeñas células solares muy eficientes. El objetivo final de los sistemas CPV es reducir el coste de la electricidad generada mediante la sustitución del tamaño de célula por dispositivos ópticos menos costosos y de tecnología más accesible<sup>1</sup>.

Por tanto, para que se produzca la generación eléctrica en los sistemas fotovoltaicos de concentración es necesario un sistema que aglutine tres elementos:

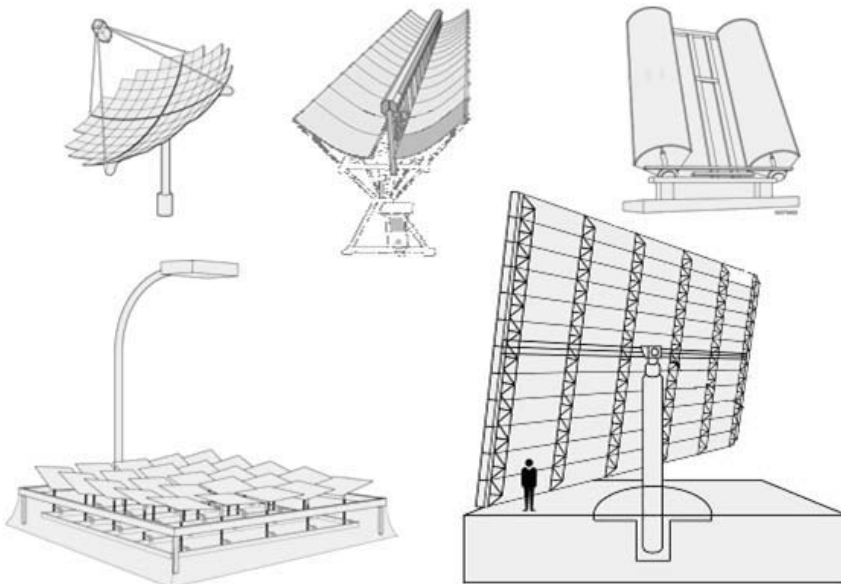
1. Un dispositivo, específicamente tratado, que sea capaz de convertir la luz solar en energía eléctrica. En el caso de la CPV, el dispositivo encargado es la célula solar fotovoltaica.
2. Un dispositivo óptico que concentra la luz solar sobre la célula fotovoltaica, de tal manera que la radiación solar incidente se multiplica en una zona determinada.
3. Un dispositivo que esté configurado para que en todo momento se optimice la captación energética del Sol. Los seguidores solares, o *trackers*, están permanentemente siguiendo el movimiento del Sol, logrando de este modo que la radiación solar incidente en el dispositivo de conversión se maximice a lo largo de la trayectoria solar diaria.

Los sistemas CPV se suelen clasificar en función del factor de concentración del sistema óptico. Este factor indica el número de veces que la luz solar es concentrada y se suele expresar en “soles”, donde un sol son  $1000 \text{ W/m}^2$ . Según este factor los sistemas CPV se clasifican en tres categorías<sup>2</sup>:

- Baja concentración (LCPV): Concentran la luz de 1 a 40 soles.
- Media concentración (MCPV): Concentran la luz de 40 a 300 soles.
- Alta concentración (HCPV): Concentran la luz de 300 a 2000 soles.

Existe una gran variedad de sistemas<sup>3</sup> que combinan estos tres elementos (célula, óptica y seguidor) de diferentes maneras. Algunas de las configuraciones más habituales están recogidas en norma IEC 62108<sup>4</sup> y se muestran en la figura 1.1. La mayoría de los sistemas de baja concentración emplean células de silicio de alta eficiencia, mientras que los sistemas de media y alta concentración utilizan células multiunión del tipo III-V. En cuanto a los dispositivos ópticos, generalmente se emplean elementos de reflexión en los componentes de baja concentración (espejos planos, parabólicos o espejos V), sin embargo, para los sistemas de media y alta concentración, los elementos que más se aplican son los dispositivos ópticos de refracción basados en lentes tipo Fresnel. En cuanto a los sistemas de seguimiento, algunas instalaciones de baja concentración usan estructuras estáticas o seguidores de un eje, aunque en general el más utilizado en baja, media y alta concentración es el seguimiento en dos ejes. En los sistemas de alta concentración el tipo de seguidor a dos ejes predominante en el mercado es el tipo pedestal<sup>1</sup>.

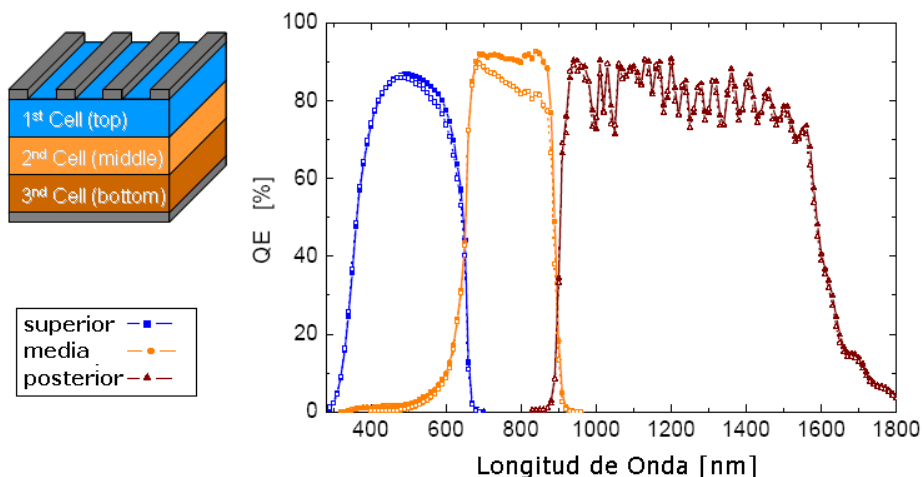
A continuación, se describirá brevemente cada uno de los elementos constitutivos de este tipo de sistemas.



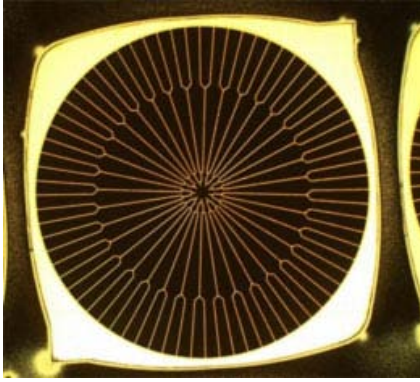
**Figura 1.1:** Diferentes configuraciones CPV recogidas en la norma IEC 62108.

### 1.1.1. Célula solar multiunión

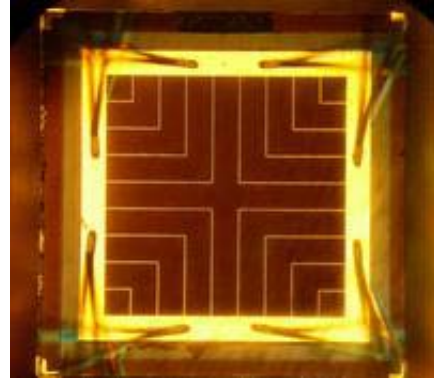
Actualmente los sistemas CPV emplean células multiunión (MJ). Este tipo de células, a pesar de generar electricidad mediante un fenómeno de conversión eléctrica similar a las células convencionales de silicio (Si), presentan mayor eficiencia, lo que supone un salto cualitativo en la potencialidad de conversión eléctrica. El principal motivo de estos valores de eficiencia se debe al aprovechamiento que hacen de la energía lumínica del Sol. Para conseguir captar la mayor parte del espectro solar incidente, las células están implementadas en varias capas de materiales diferentes, donde cada una de ellas es sensible a un rango muy específico del espectro solar. Esto produce que la célula en su globalidad sea sensible a prácticamente la totalidad del rango de la luz solar, y no a un rango específico y limitado de longitudes de onda, tal y como sucede en las células de silicio. Además, los semiconductores usados en estas células multiunión pueden obtenerse con una calidad casi perfecta mediante los sistemas actuales de fabricación<sup>1</sup>.



**Figura 1.2:** Estructura básica de una célula MJ de triple unión. La célula está construida de tal forma que la subcélula superior (*top*) absorba la parte azul y verde del espectro, la subcélula media (*middle*) la parte roja y naranja y la subcélula posterior (*bottom*) la parte infrarroja del espectro.



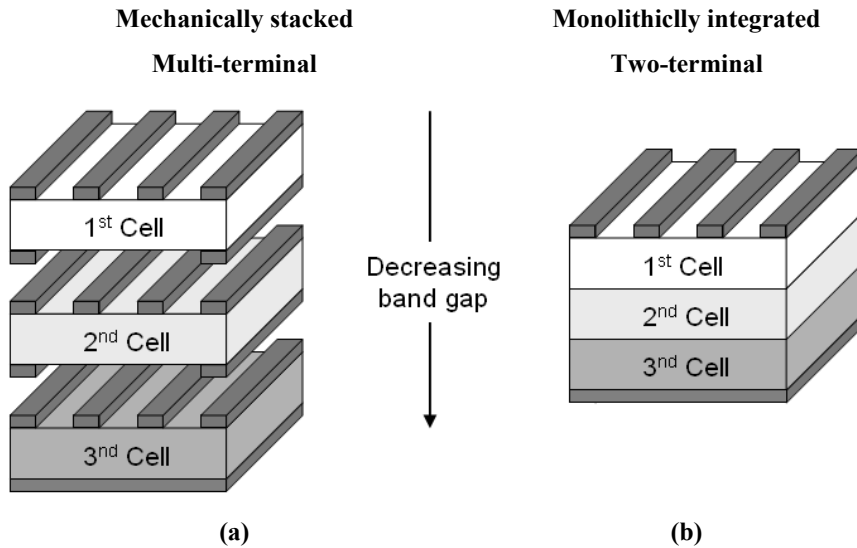
**Figura 1.3:** Célula solar desarrollada en el Instituto de Energía Solar Aleman, Fraunhofer ISE de Friburgo.



**Figura 1.4:** Célula solar desarrollada en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid.

Atendiendo al modo de fabricación de las células MJ se pueden distinguir dos tipos: *mechanical stacked* y *monolithic cells*. Durante los primeros años las subcélulas que componían la célula MJ se unían de forma mecánica, *mechanical stacked*. Es decir, cada subcélula era fabricada individualmente y se unían entre ellas por medio de contactos metálicos de manera mecánica. En el caso de las células monolíticas (*monolithic cells*), los distintos materiales que componen la célula se crecen sobre un único sustrato y son unidos gracias a diodos túnel de forma que como resultado se tiene una célula con dos contactos, uno positivo y otro negativo, de forma análoga a las células convencionales de silicio. Se tiene en este caso, una estructura formada por varias subcélulas conectadas en serie<sup>1,5</sup>.

En las células monolíticas se puede distinguir entre: células *lattice-matched* (LM), cuando los materiales que componen la célula tienen la misma constante de red, y células *lattice-mismatched*, *metamorphic-mismatch* (MM) o simplemente metamórficas, si los materiales que la componen no tienen la misma constante de red. La célula más industrializada<sup>6</sup> hasta la fecha es la célula LM  $\text{Ga}_{0,50}\text{In}_{0,50}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}/\text{Ge}$ , formada por tres subcélulas o uniones. Cada unión está formada principalmente por una ventana, un emisor, una base y una capa posterior. Además, entre las uniones se colocan diodos túnel para realizar las interconexiones, de forma que la célula, al igual que una célula convencional de una unión, tiene un contacto posterior y otro superior.



**Figura 1.5:** Dos tipos de células multiunión. (a) Tipo *mechanically stacked*: Cada material semiconductor se crece individualmente y luego se unen de forma mecánica de forma que cada subcélula tiene dos terminales (*Multi-terminal*) que deben ser unidos al módulo. (b) Tipo *monolithic*: Los semiconductores con distintos bandas de *gap* se crecen de forma conjunta. La conexión interna de cada una de las subcélulas se realiza por medio de diodos túnel de forma que se tiene una única célula con dos terminales (*Two-terminal*).

La eficiencia eléctrica global de una célula CPV ( $\eta_{\text{célula}}$ ) puede ser definida como el cociente entre la potencia eléctrica suministrada por la célula ( $P_{\text{célula}}$ ) y la irradiancia ( $G_x$ ) que incide sobre la superficie de la célula ( $A_{\text{célula}}$ ):

$$\eta_{\text{célula}} = \frac{P_{\text{célula}} [\text{W}]}{G_x [\text{W}/\text{m}^2] A_{\text{célula}} [\text{m}^2]} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

La eficiencia de las células MJ<sup>7</sup> presenta un crecimiento continuo a lo largo de los últimos años, figura 1.6, pasando desde un 28% en el año 1991 hasta el record de eficiencia<sup>8</sup> de 43,5 % alcanzado recientemente por una célula de triple unión y un factor de concentración de 418 soles, fabricada por la compañía *Solar Junction*. Esto implica un crecimiento de la eficiencia de aproximadamente un 0,75 % anualmente.

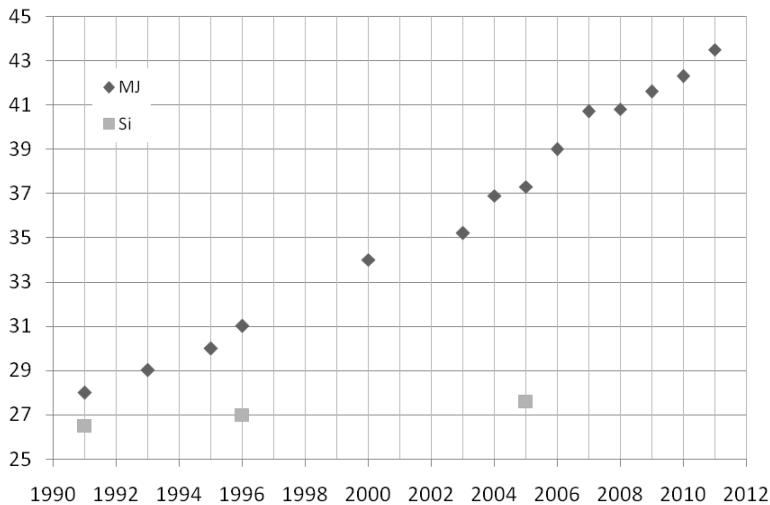
Sin embargo, las células de silicio cristalino o células convencionales sólo han alcanzado una eficiencia record de 25% sin usar concentración<sup>9</sup> y hasta el 27,6% usando concentración<sup>10</sup>. La primera célula fue desarrollada por la *Universidad de Nueva Gales*

del Sur en 1999 y la segunda célula fue desarrollada por la empresa *Amonix* en 2005 usando una concentración de 92 soles.

Del análisis de los datos de las eficiencias de las células de Si y MJ se pueden inferir dos conclusiones:

1. La eficiencia actualmente alcanzada por las células MJ es un 58% superior a las eficiencias alcanzadas por las células Si.
2. En los últimos años la eficiencia de las células Si no ha variado frente al crecimiento constante de la eficiencia de las células MJ.

### Eficiencia de las células MJ y Si (%)



**Figura 1.6:** Evolución de la eficiencia de las células multiunión y de silicio.

Es importante diferenciar entre las eficiencias de las células MJ alcanzadas en laboratorios y las comerciales, aquellas que se pueden fabricar de forma masiva. En las primeras, las condiciones de fabricación están perfectamente controladas por lo que sus eficiencias alcanzan los valores más altos, mientras que las segundas tienen una menor eficiencia ya que el proceso de fabricación no es tan selectivo, para conseguir reducir costes. Las tablas 1.1 y 1.2 muestran, a modo de ejemplo, la diferencia entre las eficiencias alcanzadas por las células prototipo desarrolladas en los laboratorios y las

células fabricadas industrialmente. En las primeras se observa como la eficiencia supera el 43 %, mientras que en las segundas están en torno al 39 %.

Actualmente, las células multiunión no han alcanzado el mismo grado de comercialización e industrialización que las células de silicio, sin embargo, hay muchas instituciones de investigación que están realizando un gran esfuerzo en el desarrollo de estos tipos de células como el Fraunhofer-Institut für Solare Energyssystem [DE], The Ioffe Physical-Technical Institute [RU], The National Renewable Energy Laboratory [US] o el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid [ES], entre otros.

	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Soles</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
1	43,5	418	Solar Junction	2011	GaInP/GaAs/GaInNAs	Lattice-matched <sup>8</sup>
2	42,3	406	Spire	2010	InGaP/GaAs/InGaAs	Lattice-mismatched <sup>11</sup>
3	41,6	364	Spectrolab	2009	GaInP/GaInAs/Ge	Lattice-matched <sup>12</sup>
4	41,1	454	Fraunhofer	2009	GaInP/GaInAs/Ge	Lattice-mismatched <sup>13</sup>
5	40,8	326	NREL	2008	GaInP/GaInAs/GaInAs	Inverted monolithic <sup>14</sup>

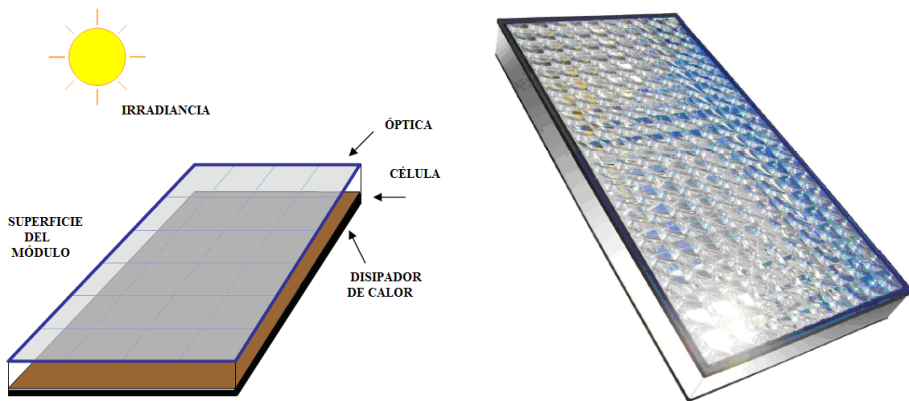
**Tabla 1.1:** Record de eficiencias alcanzadas en los laboratorios.

	<b>Eficiencia (%)</b>	<b>Soles</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Pais</b>	<b>Descripción</b>
1	39,8	500	Spectrolab	USA	<a href="http://www.spectrolab.com">www.spectrolab.com</a>
2	39	500	Emcore	USA	<a href="http://www.emcore.com">www.emcore.com</a>
3	39	500	Azur Space	Alemania	<a href="http://www.azurspace.com">www.azurspace.com</a>
4	39	500	Cyrium	USA	<a href="http://www.cyriumtechnologies.com">www.cyriumtechnologies.com</a>
5	38	500	JDSU	USA	<a href="http://www.jdsu.com">www.jdsu.com</a>

**Tabla 1.2:** Eficiencias alcanzadas en fase de comercialización.

### 1.1.2. Módulo fotovoltaico de concentración

Un módulo fotovoltaico de concentración<sup>15</sup> está formado por un conjunto de células fotovoltaicas interconectadas, los dispositivos ópticos, los elementos para permitir la conexión y protección de las células (disipadores de calor y diodos de paso) y los elementos para facilitar su instalación (marco, conectores, etc.). En la figura 1.7 se puede observar una representación esquemática y un ejemplo de un módulo CPV. En la actualidad y con motivo de la diversidad de diseños, la posibilidad de configuraciones de los módulos CPV es muy amplia.



**Figura 1.7:** Ejemplo de un módulo de concentración.

El objetivo de los elementos ópticos es poder concentrar la radiación incidente, de manera que se incremente el flujo lumínico en la superficie de la célula y obtener una mayor energía a la salida de la misma. Los mecanismos de concentración solar pueden realizarse mediante lentes o espejos, que refractan o reflejan la luz sobre el receptor que alberga las células. En función del tipo de mecanismo, así como de la zona de concentración, se disponen las configuraciones mostradas en la figura 1.8, que son las más empleadas por los fabricantes actuales de CPV.

Un concepto fundamental que define el elemento óptico es el factor de concentración. Indica la relación entre la irradiancia media incidente en la superficie de

la célula ( $G_x$ ) y la irradiancia en la superficie de entrada del dispositivo óptico de concentración ( $G_1$ ). Este factor se suele expresar en soles, donde un sol son  $1000 \text{ W/m}^2$ .

$$C = \frac{G_x (\text{W/m}^2)}{G_1 (\text{W/m}^2)} \text{ Ecuación 1.2}$$

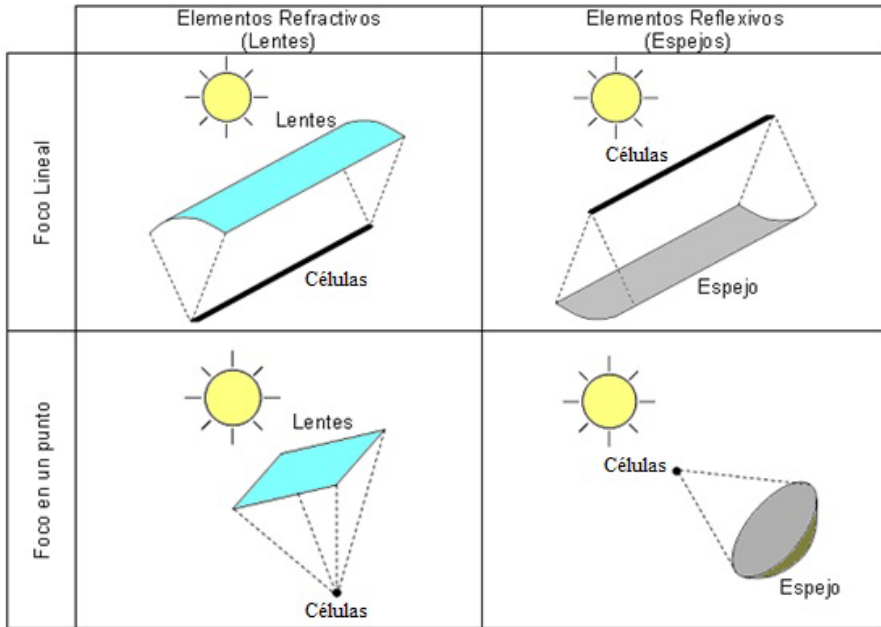


Figura 1.8: Tipologías de sistemas ópticos usados por los módulos CPV.

Aunando la eficiencia energética de las células multiunión y el factor de concentración, se consigue reducir el área de célula, respecto a las convencionales, necesaria para entregar una determinada potencia. Si se tiene en cuenta que, en la fabricación de un módulo FV, la parte más costosa es la correspondiente a las células fotovoltaicas, se está sustituyendo parte de la superficie de célula por elementos ópticos más económicos de fabricar, con la consiguiente reducción de costes en el sistema.

La eficiencia eléctrica global de un módulo CPV ( $\eta_{\text{módulo}}$ ) puede ser definida como el cociente entre la potencia eléctrica suministrada por el módulo ( $P_{\text{módulo}}$ ) y la irradiancia normal directa (DNI) que incide sobre la superficie del módulo ( $A_{\text{módulo}}$ ):

$$\eta_{\text{módulo}} = \frac{P_{\text{módulo}} (\text{W})}{\text{DNI}_{\text{módulo}} (\text{W}/\text{m}^2) A_{\text{módulo}} (\text{m}^2)} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

La eficiencia de un módulo CPV es menor que la correspondiente a las células que lleva incorporadas, debido fundamentalmente a:

- La asociación serie-paralelo de células en el módulo CPV produce que aparezcan fenómenos de dispersión, debido a que el comportamiento de las células no es el mismo, ocasionado por pequeñas diferencias constructivas. Esto hace que las células de peor rendimiento condicionen el funcionamiento del resto, y por tanto disminuya la eficiencia global.
- Los elementos ópticos también tienen una serie de pérdidas. Esto se debe a las características no ideales de transmisión, reflexión y absorción, intrínsecas al material y al procedimiento de concentración elegido. A pesar de ello, con la tecnología actual, se están consiguiendo rendimientos ópticos cercanos al 85%.

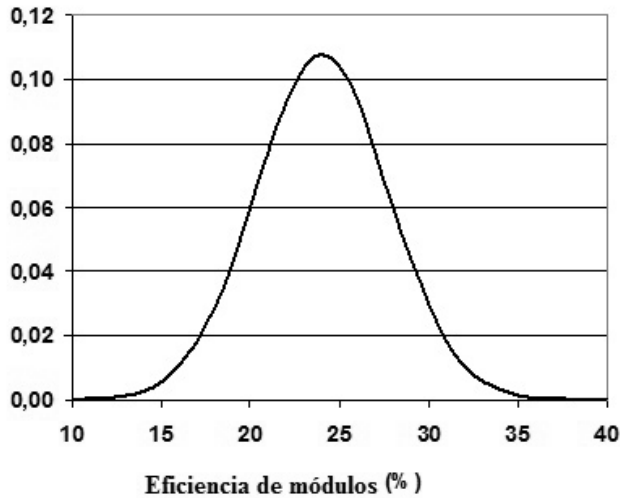
Así, la eficiencia del módulo será función de la eficiencia de las células, de la eficiencia de la óptica ( $\eta_{\text{óptica}}$ ) y de las pérdidas en cables y el resto de elementos (L):

$$\eta_{\text{módulo}} = \eta_{\text{célula}} \eta_{\text{óptica}} (1 - L) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Actualmente hay pocos datos<sup>16,17,18,19,20</sup> sobre la eficiencia de los módulos CPV, ya que son pocas las empresas que los fabrican y la mayoría de ellas, no ofrecen los módulos como producto, sino que entregan el sistema CPV completo. Además, muy pocas empresas ofrecen datos y la mayoría de los publicados son incompletos, ya que no indican algunas de estas características:

- Condiciones de medición.
- Laboratorio de medida.
- Si los valores obtenidos provienen de productos comerciales o prototipos.

Por tales razones, sólo se puede indicar que los valores actuales de eficiencia global se sitúan en torno al 20-30%, figura 1.9.



**Figura 1.9:** Función densidad de probabilidad de la eficiencia de los módulos. Distribución normal con media en el 24% y una desviación del 4%.

## 1.2. Consideraciones sobre la CPV

La célula es el elemento más caro en cualquier sistema FV, ya sea CPV o de panel plano. La superficie de célula en los sistemas CPV es sensiblemente menor que en los sistemas convencionales para la misma potencia, debido a su mayor aprovechamiento del espectro y al uso de óptica de concentración. Esta reducción de materiales necesarios para la célula y su mayor eficiencia global, implica que el sistema será más rentable tanto en términos energéticos como económicos.

Actualmente, la producción de células multiunión es cara debido al delicado proceso de fabricación que exigen. No obstante, a pesar de su complejidad constructiva, los procesos de fabricación de las células multiunión se asemejan en gran medida a los empleados en la fabricación de diodos LED's, cuya fabricación es hoy día muy barata. Esto permite prever un gran potencial de reducción de costes, ya que es factible adaptar ambos procesos de fabricación<sup>21</sup>.

Adicionalmente a la ventaja de la alta conversión energética de las células CPV, el recorrido evolutivo experimentado en la eficiencia de estos dispositivos ha sido muy notorio, especialmente en los últimos años, donde aproximadamente ha habido un incremento de un punto porcentual anual, con lo que si se mantiene la misma línea incremental, en poco años se podrán fabricar células cuya eficiencia rondará el 50%.

<b>Ventajas de las células CPV frente a las células FV convencionales</b>
La alta eficiencia de las células empleadas hace que las necesidades de superficie sean menores en los sistemas CPV, con el consiguiente ahorro económico.
La eficiencia de estas células multiunión se ha ido incrementando significativamente en los últimos años, al ritmo del 1% anual, alcanzando en la actualidad un record del 43,5%, con la posibilidad de alcanzar el 50% para el 2015.
El límite teórico de eficiencia alcanzable por las células multiunión se sitúa alrededor del 87%, que comparado con el límite del 31% de las células de silicio convencionales, hacen que las primeras tengan un potencial de crecimiento de eficiencia mucho mayor.

**Tabla 1.3:** Ventajas de las células usadas en sistemas CPV frente a las usadas en los sistemas FV convencionales<sup>22,23</sup>.

Otra de las características más importantes de la CPV son los altos valores de eficiencia que puede alcanzar y que no pueden obtenerse con otras tecnologías solares, ya que estos sistemas emplean alta concentración y alta eficiencia de células, lo que implica una reducción en el área de las instalaciones y, por lo tanto, una disminución considerable de la inversión y del coste de la electricidad generada. Finalmente, dentro de las ventajas comparativas de la CPV, hay que destacar su mayor potencial para reducir costes debido al mayor recorrido en su desarrollo tecnológico frente a otras tecnologías, pronosticando algunos autores<sup>24</sup> precios inferiores al dólar por Wp cuando se supere el GW instalado.

	Silicio Cristalino	Silicio Amorfo		CdTe	CIGS	CPV
		a-Si	a-Si/ $\mu$ -Si			
<b>Eficiencia módulos</b>	13-19%	5,5-6,5 %	9-11 %	10-11 %	8-11 %	20-30 %
<b>Cuota de mercado</b>	90%	3,9%		2,7%	0,2%	0,1%
<b>Principales ventajas</b>	Alta eficiencia	Alta experiencia		Eficiencia relativamente alta	Eficiencia relativamente alta	Muy alta eficiencia
	Tecnología madura	Similar a procesos probados de producción de dispositivos TFT y LCD		Bajos costes de producción		Similar a procesos de producción de LEDs
	Cadena de suministro establecida	Buen comportamiento frente a la temperatura		Buen comportamiento frente a la temperatura		
<b>Principales inconvenientes</b>	Alta dependencia de los precios de las materia primas	Baja eficiencia	Menores expectativas de mejora de eficiencia a largo plazo	Potencial toxicidad del Cd	Alto coeficiente de pérdidas por temperatura	Falta normativa estándar
			Experiencia limitada	Déficit potencial de Te	Déficit potencial y elevado coste del Indio	Experiencia limitada
				Experiencia limitada	Experiencia limitada	

**Tabla 1.4:** Tabla comparativa de diferentes tecnologías fotovoltaicas (Fuentes: Garrigues Medio Ambiente / ASIF / U. Jaén).

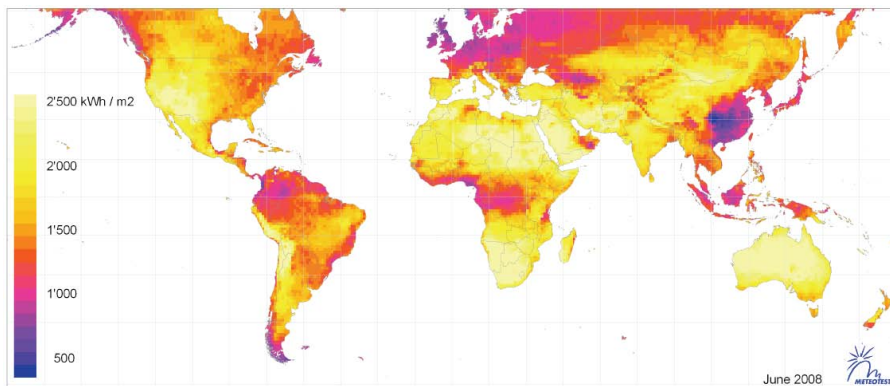
Otra de las ventajas comparativas de la CPV frente al panel plano convencional es que la distribución de costes en un sistema CPV es más amplia, no teniendo un peso tan importante en ellos el coste de las células solares. El resultado es que gran parte del coste del sistema se desplaza desde las células hacia otras tecnologías más accesibles y variadas, dando cabida en sus proyectos e inversiones a sectores industriales muy diferentes que pueden adaptarse fácilmente a la fabricación de estos nuevos productos.

La energía que produce un sistema fotovoltaico depende principalmente de la radiación que recibe. Esta radiación está compuesta por una componente directa, otra difusa originada por fenómenos de dispersión en la atmósfera y por una componente que tiene su origen en la reflexión producida por elementos cercanos.

Los sistemas fotovoltaicos convencionales aprovechan todas las componentes de la radiación solar, sin embargo, un sistema CPV, debido a su efecto concentrador de la luz solar, es capaz de aprovechar, de toda la radiación global disponible en la superficie del módulo, solamente la componente normal directa (DNI, del inglés: *Direct Normal Irradiation*)<sup>1</sup>.

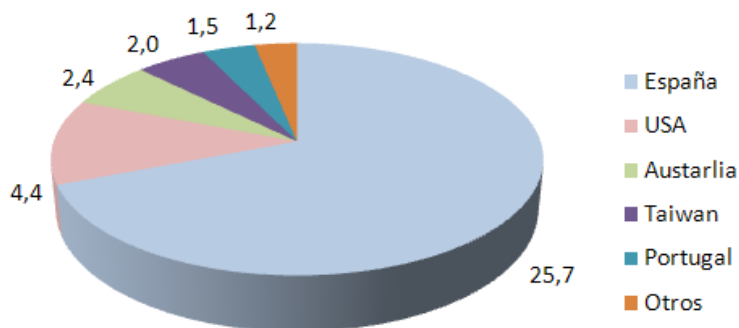
A esta limitación de aprovechamiento del recurso solar se le añade que, con el estado del arte de la tecnología actual, un módulo CPV solo es energéticamente eficiente en zonas donde la DNI supere un valor medio anual de  $1800 \text{ kWh/m}^2$ .

Aunque a priori este requisito de valores de DNI pueda restringir notablemente las zonas susceptibles de una implantación de sistemas CPV, la realidad es que en gran parte de la superficie terrestre se alcanzan valores de radiación normal directa igual o superiores a  $1800 \text{ kWh/m}^2$ , tal y como se observa en la figura 1.10. Las regiones adecuadas para la implantación de los sistemas CPV son el sur de Europa, el sur de Norteamérica, la parte central de Sudamérica, el norte y el sur de África, el sur de Asia y Australia.



**Figura 1.10:** Valores anuales de la irradiación directa normal. Fuente: Meteotest 2008.

La CPV es una tecnología joven, pero los progresos realizados en los últimos años han sido espectaculares. En este corto tiempo, el número de empresas que desarrollan sistemas CPV ha crecido y los despliegues comerciales han pasado de algunos kW situados en laboratorios, a proyectos comerciales de varios MW. El mercado mundial<sup>25</sup> de CPV, en términos de sistemas instalados, se estima en 37 MW hasta 2011. En la actualidad, España tiene la mayor cuota de mercado con el 69% de toda las instalaciones HCPV, seguido por los EE.UU. y Australia con el 12% y 6% respectivamente, figura 1.11.



**Figura 1.11:** Distribución de los sistemas HCPV instalados por países (en MW).

El mercado mundial de CPV implica sólo el 0,05% del mercado total fotovoltaico. Esta proporción cambiará en el futuro dependiendo de la evolución de los precios del Si y de la CPV. Según distintas fuentes, para el 2012 se estima<sup>26</sup> en torno a unos 300 MW (las estimaciones realizadas tienen en cuenta los proyectos que actualmente están en distintas fases de desarrollo) y se puede alcanzar una cuota de mercado FV del 3,5 % en 2015<sup>27</sup>.

A continuación se presenta una tabla que muestra una serie de empresas que tiene tecnología para el desarrollo de células multiunión<sup>28</sup> y sistemas HCPV. Aunque, actualmente, solo algunas empresas tienen capacidad de producir células a nivel comercial (Azur, Emcore, Spectrolab y JDSU) y solo algunas están desarrollando actualmente o en corto plazo proyecto industriales (Amonix, Soitec, SolFocus y Solar System).

Células Multiunión	Sistemas HCPV
Arima, Azur, CESI, Compound Solar Technology, Cyrium, Emcore, IQE, JDSU, Microlink, RFMD, Sharp, Solar Junction, Spectrolab, Spire, VPEC	Abengoa, Amonix, Arima, Concentrix-Soitec, Daido Steel, Delta Electronics, Emcore, Energy Innovations, Green and Gold Energy, GreenVolts, HC Fotón Systems, INER, Isofoton, Morgan Solar, Opel, Pyron Solar, Sol3G, Solar Systems, SolFocus, Telicom

**Tabla 1.5:** Empresas con capacidad de desarrollar células multiunión y sistemas HCPV.

### 1.3. Objetivos

Como se ha visto a lo largo de este capítulo la tecnología CPV es una tecnología reciente que se encuentra en fase de desarrollo. En esta tesis se va a llevar cabo el estudio de diferentes aspectos de las células III-V multiunión de concentración y los módulos CPV. Los principales objetivos que se pretenden alcanzar con este estudio son:

- Caracterizar el funcionamiento de ambos dispositivos ante la variación de los parámetros que influyen en su comportamiento.
- Proponer un modelo matemático para cada uno de ellos que permita predecir la potencia generada ante la variación de los parámetros que influyen en su funcionamiento.

Como se observa, los objetivos son los mismos para los dos dispositivos, aunque los procedimientos para llevarlos a cabo difieran.

Por un lado, se pretende analizar y caracterizar células tipo LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  y tipo MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  de concentración a partir de las medidas realizadas en los laboratorios del Instituto de Energía Solar Alemán, Fraunhofer ISE, donde las condiciones a las que fueron sometidos los dispositivos estuvieron totalmente controladas. Una vez analizado el comportamiento de los parámetros I-V de las células bajo estudio, ante distintas condiciones de funcionamiento, se propone un modelo matemático capaz de reproducir la potencia máxima generada por una célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ . Este tipo de célula, como se comentó anteriormente, es la más industrializada y la que utilizan la mayoría de los actuales sistemas CPV.

Por otro lado, para llevar a cabo el estudio de los módulos CPV se han utilizado tres módulos HCPV, con concentraciones entre 500 y 625 soles, refrigeración pasiva, sistema óptico formado por lentes Fresnel y óptica secundaria, y equipados con células LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ . Las medidas para el estudio de las características de los módulos fueron realizadas en las instalaciones del Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente, CEAEMA, de la Universidad de Jaén. Al contrario que las

medidas realizadas de células, los módulos fueron medidos a sol real, por lo que no se encuentran en condiciones controladas de funcionamiento. A pesar de esto, el objetivo es el mismo que en el caso anterior, es decir, analizar y caracterizar los módulos CPV ante las condiciones atmosféricas y determinar cuáles influyen de forma más importante en su funcionamiento. De igual forma que para las células, una vez analizado el comportamiento de los módulos, se propondrá un modelo capaz de reproducir la potencia generada por un módulo HCPV en condiciones reales de funcionamiento.

#### **1.4. Estructura**

Para alcanzar los objetivos comentados anteriormente, este proyecto de tesis se ha estructurado en cinco capítulos que a continuación se describen brevemente:

Este primer capítulo trata sobre la tecnología CPV y su situación actual en el mercado fotovoltaico. Además de esto, se han planteado los objetivos marcados en este proyecto de tesis.

En el capítulo dos se recogen los fundamentos teóricos de una célula fotovoltaica multiunión, a partir de los fundamentos teóricos de una célula de una unión, y se realiza una revisión de los métodos existentes para el modelado de células multiunión y módulos CPV.

En el capítulo tres se describe, de forma resumida, el procedimiento de medición seguido para la caracterización y estudio de células III-V multiunión. El análisis de los resultados experimentales permitirá plantear un modelo matemático que sea capaz de predecir la potencia de salida de una célula para unas condiciones de funcionamiento determinadas. Este modelo se detalla en la última parte del capítulo, donde también se lleva a cabo un estudio del ajuste del modelo frente a los datos experimentales obtenidos durante el proceso de medida.

En el cuarto capítulo se describe el montaje experimental y el procedimiento seguido para realizar las medidas de la característica I-V de los módulos estudiados. Se presenta, gracias al estudio y análisis de los módulos, un método para estimar el punto

de máxima potencia de los módulos de concentración estudiados basado en parámetros meteorológicos. También se analizan los errores obtenidos por el modelo frente a las medidas realizadas.

En el quinto capítulo se plantean las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de este trabajo y las posibles líneas futuras de investigación.

Además se han incorporado dos anexos que muestran información complementaria. En el anexo I se comentan los métodos para trasladar las características eléctricas de un módulo CPV de unas condiciones de funcionamiento a otras, y el procedimiento de traslación utilizado en esta tesis. En el anexo II se realiza una revisión de métodos para el cálculo de la temperatura de un módulo CPV y se presenta un modelo que permite estimar la temperatura a la que está trabajando una célula MJ en un módulo CPV en condiciones reales de funcionamiento.

---

<sup>1</sup> Luque A. L., Andreev V. M. (2007), “Concentrator Photovoltaics”, Springer-Verlag 2, New York.

<sup>2</sup> Daniels A., Marquez C., (2010), “The CPV Challenge (Part 2): CPV Industry Growth Forecast & Strategic landscape”, CPV Today First Conferences Ltd, UK.

<sup>3</sup> Aguilera J., Almonacid G., Hontoria L., Muñoz E., Pérez P. J., Terrados J., Vidal P.G., (2009), “The CPV Challenge (Part I): Achieving Grid Parity”, CPV Today First Conferences Ltd, UK.

<sup>4</sup> IEC 62108, (2007), “Concentrator Photovoltaic (CPV) Modules and Assemblies – Design Qualification and Type Approval”, Edition 1.0, Geneve.

<sup>5</sup> Markvart T. and Castañer L., (2005), “Solar Cells”, Elsevier Limited, first edition, Amsterdam.

<sup>6</sup> Fraas L. and Partain L., (2010), “Solar Cells and their Applications”, Wiley-Interscience, second edition, New Jersey.

<sup>7</sup> Perez-Higueras P, et al., (2011), “High Concentrator PhotoVoltaics Efficiencies: Present Status and Forecast”. Renewable Sustainable Energy Reviews 15 1810-1815.

<sup>8</sup> Green M. A. et al., (2011), “Solar cell efficiency tables (Version 38)”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 19:565–572.

<sup>9</sup> Schultz O., Glunz S. W., Willeke G. P., (2004), “Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 12: 553–558.

<sup>10</sup> Slade A., Garboushian V., (2005), “ 27.6% Efficient Silicon Concentrator Cell for Mass Production”, Technical Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Shanghai, October, 701.

- <sup>11</sup> Green M. A. et al., (2011), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 37)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:84-92.
- <sup>12</sup> Green M. A. et al., (2010), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 35)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18:144-150.
- <sup>13</sup> Green M. A. et al., (2009), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 34)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:320-326.
- <sup>14</sup> Green M. A. et al., (2009), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 33)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:85-94.
- <sup>15</sup> Sala G., Pachón D., Antón I., (1999), “C-Rating Project. Book1. Classification of PV Concentrators”, Contract: NNE-1999-00588.
- <sup>16</sup> Apicella F., et al., (2008), “Fixed and Two-Axis Tracking PV System: Potential Solar Electricity from Conventional and CPV Modules Technology”, 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September.
- <sup>17</sup> Lasich J. B., Verlinden P. J., (2007), “Opportunities for Widespread Implementation of Concentrator Photovoltaic (CPV) Systems”, 4<sup>th</sup> International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo del Escorial, Spain, 12-16 March, p. 65–70.
- <sup>18</sup> Lecouffle D., Kuhn F., (2009), “A Place for PV, Tracked-PV and CPV”, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants, Darmstadt, Germany, 9-10 March.
- <sup>19</sup> Martínez M, et al., (2008), “Concentrator Photovoltaics Connected to the Grid and System Rating”, 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, p. 146–50.
- <sup>20</sup> Nishikawa W., Horne S., (2008), “Key Advantages of Concentrating Photovoltaics (CPV) for Lowering Levelized Cost of Electricity (LCOE)”, 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, p. 3765–7.
- <sup>21</sup> Pérez Higuera P. et al., (2010), “Propuesta para un Marco Regulatorio para la Concentración Fotovoltaica en España (2010-2020)”, ISBN: 978-84-692-9987-6.
- <sup>22</sup> Kurtz S et al., (2008), “A Comparison of Theoretical Efficiencies of Multi-Junction Concentrator Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: research and applications* 16:537–546.
- <sup>23</sup> Yamaguchi M. and Luque A., (1999), “High Efficiency and High Concentration in Photovoltaics”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, No. 10, October.
- <sup>24</sup> Luque A. and Martí A., (1997), “Entropy Production in Photovoltaic Conversion”, *Physical Review*, vol.55, p.6994.
- <sup>25</sup> “PV Insider CPV World Map 2011”, (2011), 3<sup>rd</sup> Annual Concentrated Photovoltaic Summit, USA, November.
- <sup>26</sup> Prior B, Seshan C. *Concentrating Photovoltaics 2011: Technology, Costs and Markets*. GTM Research. 2011
- <sup>27</sup> “CPV Market Forecast 2011”, (2010), CPV Consortium Report.
- <sup>28</sup> Kurtz S., (2011) “Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry”, Technical Report NREL/TP-5200-43208, June.

## Capítulo 2: Estado del Arte

En este capítulo se va a realizar una revisión de los distintos métodos que existen actualmente para la caracterización y modelado de células y módulos CPV.

En la primera sección se recogen los fundamentos teóricos de una célula fotovoltaica de una unión, que sirven de partida para describir de forma breve el funcionamiento y las principales características de una célula multiunión. En la segunda sección se realiza una revisión de los métodos existentes para el modelado de células multiunión que se han considerado más relevantes. Por último, la tercera sección se centra en los métodos considerados de interés que existen para el modelado de módulos CPV.

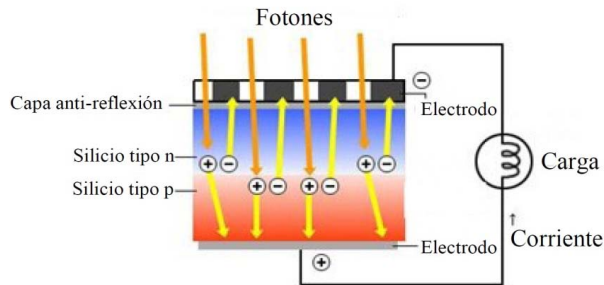
### **2.1. Fundamentos de células solares**

La célula multiunión se considera el dispositivo más importante y que más influye en el funcionamiento de un sistema CPV. Por este motivo, antes de abordar una revisión de los métodos de modelado de este tipo de células, se va a explicar de forma breve su funcionamiento y principales características. Para realizar este estudio se parte

del funcionamiento de una célula de una unión, que va a ayudar a comprender de mejor forma el funcionamiento de una célula multiunión.

### 2.1.1. La célula FV de una unión

La célula solar o fotovoltaica (FV) es un dispositivo capaz de transformar la energía solar en energía eléctrica directamente. De forma general consiste en una unión p-n en la cual existe un campo eléctrico dando lugar a un polo positivo y otro negativo, de forma que cuando un fotón incide en su superficie, este campo es capaz de separar las cargas que se producen debido al efecto fotoeléctrico<sup>1</sup>. La figura 2.1 muestra la estructura básica de una célula de una unión de silicio, donde también se representa el circuito estándar al que está conectado y el proceso de generación.



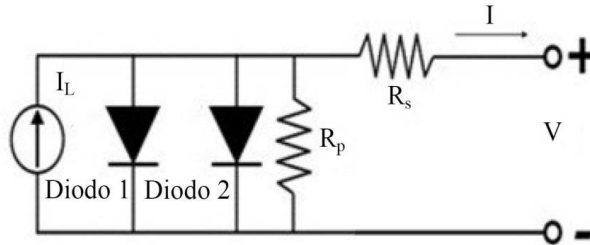
**Figura 2.1:** Estructura y funcionamiento de una célula convencional de una unión de silicio.

El funcionamiento de una célula solar bajo iluminación viene descrito principalmente por el modelo de dos diodos de la ecuación 2.1 representado en la figura 2.2:

$$I = I_{01} \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{m_1 K T}} - 1 \right) + I_{02} \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{m_2 K T}} - 1 \right) - I_L + \frac{V-IR_s}{R_p} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $I_L$  representa la corriente fotogenerada que se considera igual a la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) cuando  $V = 0$ ,  $I_{01}$ , atribuida a recombinaciones en la zona de deplexión, y  $I_{02}$ , atribuida a recombinaciones en la superficie, representan las corrientes de saturación de los diodos<sup>2,3</sup>,  $V$  es el voltaje aplicado en la unión,  $q$  es la

carga del electrón,  $k$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta,  $m$  el factor de idealidad del diodo,  $R_s$  la resistencia en serie de dispositivo, que se debe principalmente a la resistencia del material y a las interconexiones entre los contactos metálicos y el semiconductor, y  $R_p$  es la resistencia en paralelo, que se debe a la no idealidad de la unión p-n<sup>4</sup>.

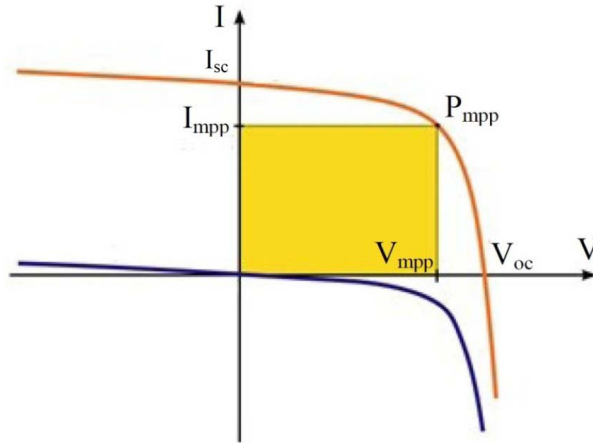


**Figura 2.2:** Circuito equivalente de una célula solar.

La ecuación 2.1 representa la relación entre la intensidad y la tensión para una célula de una unión. Esta relación se muestra de forma gráfica en la figura 2.3, donde aparece la curva I-V de una célula fotovoltaica. En esta gráfica se pueden observar los parámetros que definen el funcionamiento de una célula FV: la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), que representa la máxima corriente generada ( $V = 0$ ) por la célula fotovoltaica, el punto de máxima potencia ( $P_{mpp}$ ), que representa el punto donde el producto  $IV$  es máximo, la corriente del punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), la tensión del punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ), y el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), que representa la máxima tensión alcanzada ( $I = 0$ ) por la célula.

Además de estos parámetros es importante definir el factor de forma (FF) de una célula solar. Este parámetro es una medida de la calidad de la unión y de la resistencia en serie de la célula y viene determinado por la ecuación 2.2<sup>4</sup>. Se define como el cociente entre la potencia máxima y el producto de corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto.

$$FF = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$



**Figura 2.3:** Curva I-V de una célula FV. La curva azul representa la curva en condición de oscuridad y la naranja bajo iluminación.

Es interesante definir, además, otros factores presentes en el funcionamiento de una célula solar como son: la eficiencia cuántica (QE), la respuesta espectral (SR) y la densidad de la corriente fotogenerada ( $J_L$ ).

Las células solares responden a los fotones que inciden sobre su superficie para producir pares electrón-hueco. El ratio de portadores producidos en la célula frente a los fotones incidentes se define como eficiencia cuántica, distinguiéndose entre la eficiencia cuántica interna (IQE) y la externa (EQE). Mientras que la IQE sólo tiene en cuenta los fotones que no han sido reflejados, la EQE tiene en cuenta todos los fotones incidentes en la superficie.

Partiendo de la eficiencia cuántica se define la respuesta espectral de una célula solar como:

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} QE(\lambda) \text{ Ecuación 2.3}$$

Donde  $\lambda$  representa la longitud de onda de la luz incidente,  $h$  la constante de Planck y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Al igual que la eficiencia cuántica, SR puede ser interna (ISR) o externa (ESR) en función de la QE considerada<sup>4,5</sup>.

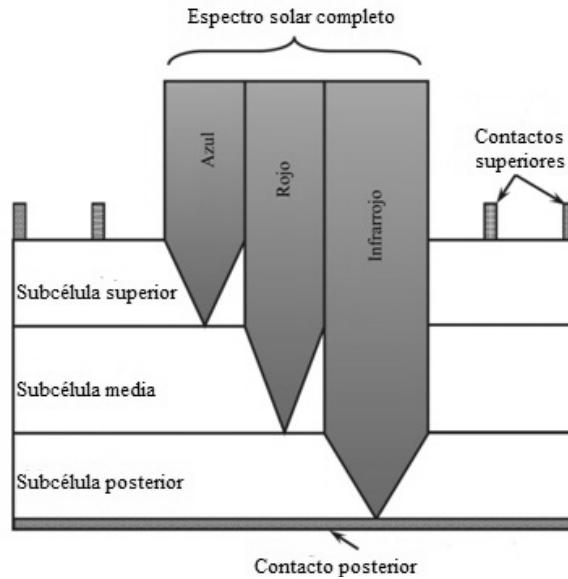
A partir de la respuesta espectral se puede conocer la densidad de corriente fotogenerada ( $J_L$ ), que es la corriente generada por área de célula bajo un espectro de referencia ( $E_{ref}$ ) gracias a la ecuación 2.4<sup>6</sup>:

$$J_L = \int SR(\lambda)E_{ref}(\lambda)d\lambda \text{ Ecuación 2.4}$$

### 2.1.2. La célula multiunión de tipo III-V de concentración

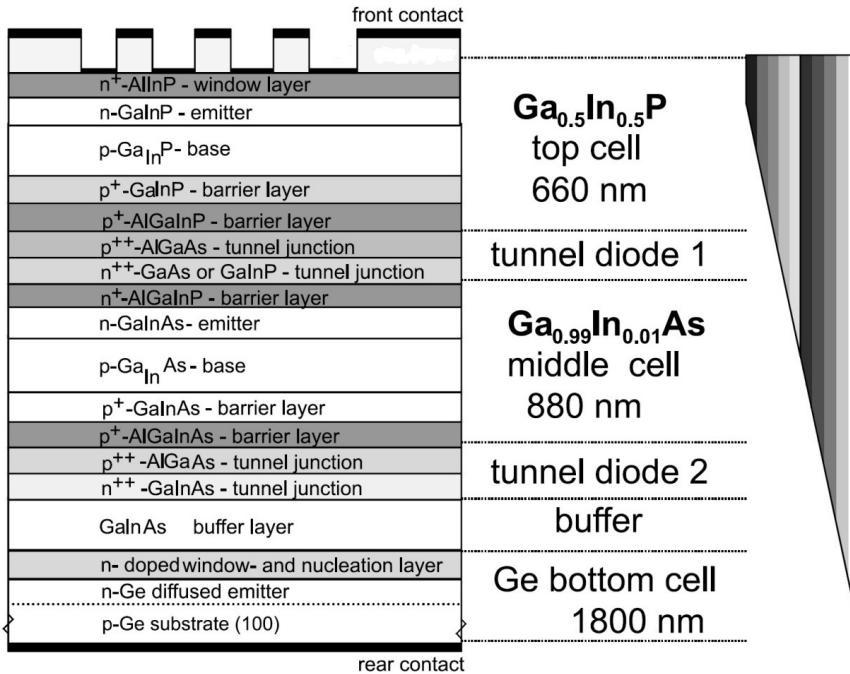
Como se comentó en el capítulo 1 las células multiunión (MJ) se basan en el uso de distintos materiales semiconductores con distintas bandas de energía prohibida o *gap*<sup>1</sup> ( $E_{gap}$ ), interconectados en serie de forma que se aproveche de una forma más eficiente la energía del espectro solar incidente. La figura 2.4 muestra de forma simple el esquema de una célula MJ de tres uniones y la forma en que el espectro se distribuye para cada una de estas uniones<sup>7</sup>. Además, las células MJ de concentración se encuentran optimizadas para el espectro incidente AM1.5d ASTM G173<sup>8</sup> de forma que tratan de obtener la máxima eficiencia bajo dicho espectro.

Como también se había comentado en el capítulo 1, atendiendo al modo de fabricación de las células MJ, se pueden distinguir dos tipos: *mechanical stacked* y monolíticas, *monolithic cells*. Los costes de las células monolíticas son más reducidos que en las mecánicamente unidas, sin embargo, el crecimiento de los materiales, que deben de ser escogidos cuidadosamente, y la caracterización de la célula, ya que no se pueden medir individualmente cada una de las uniones, son mucho más complejos. Además, como también se había comentado, se puede distinguir entre: células *lattice-matched*, (los materiales que componen la célula tienen la misma constante de red), y células metamórficas, *lattice-mismatched* o *metamorphic-mismatch* (MM) (los materiales que la componen no tienen la misma constante de red).



**Figura 2.4:** Estructura básica de una célula MJ. La célula está construida de tal forma que la subcélula superior absorba la parte azul y verde del espectro, la subcélula media la parte roja y naranja y la subcélula posterior la parte infrarroja del espectro.

La célula más industrializada hasta la fecha y que ha alcanzado los valores de eficiencia más próximos a su nivel teórico, es la célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  con eficiencias entre el 37% y 39%, como se indicó en el capítulo anterior. La figura 2.5 muestra la arquitectura de esta célula. Como se puede ver, su estructura se compone por tres subcélulas: subcélula superior (*top cell*), subcélula media (*middle cell*) y subcélula posterior (*bottom cell*). Cada unión está formada principalmente por una ventana (*window*), un emisor (*emitter*), una base (*base*) y una capa posterior (*back-surface field layer*). Además, entre las uniones se colocan diodos túnel (*tunnel diodes*) para realizar las interconexiones, de forma que la célula, al igual que una célula convencional de una unión, tiene un contacto posterior (*rear contact*) y otro superior (*front contact*)<sup>6,7</sup>.

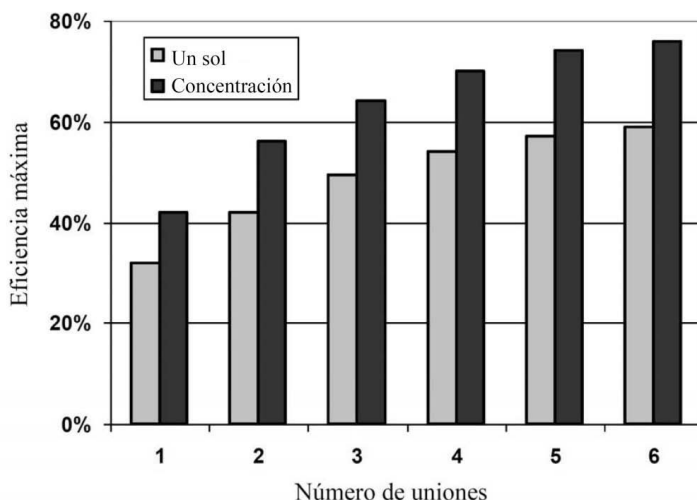


**Figura 2.5:** Estructura de la célula solar monolítica de triple unión LM  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$ . Cada subcélula se compone de una ventana, una base, un emisor y una capa posterior. Además entre las uniones se colocan diodos túnel de forma que las subcélulas se encuentran interconectadas en serie.

En este tipo de células, la subcélula posterior genera un 30% más de corriente, bajo el espectro de referencia comentado anteriormente, que las subcélulas media y superior, las cuales generan la misma corriente. Esto quiere decir, que ese 30% de corriente extra se está perdiendo y hace que, en teoría, las células de triple unión puedan alcanzar mayores eficiencias usando otros materiales con distintas configuraciones. Es el caso de las células metamórficas, donde se trata de aumentar la eficiencia final del dispositivo usando distintas configuraciones, de forma que cada unión aproveche la energía del espectro de forma más eficiente. Se minimiza de esta forma, la energía que se pueda perder en cualquiera de las uniones. Sin embargo, la estructura de las células metamórficas es más compleja y se necesita una arquitectura más sofisticada entre los materiales, ya que estos difieren en su constante de red<sup>9</sup>.

De esta forma, la energía del *gap* ( $E_{\text{gap}}$ ) de las aleaciones usadas en cada unión puede modificarse variando la composición de los distintos elementos que la forman. Pero, al mismo tiempo que se modifica la  $E_{\text{gap}}$ , también se varía la constante de red por

lo que la posibilidad de elegir las bandas del *gap* ideales tiene limitaciones. El objetivo de las células multiunión es aprovechar el mayor rango posible del espectro incidente de la forma más eficiente. Actualmente numerosos esfuerzos en el desarrollo de las células MJ van en esta dirección: estudiar las distintas configuraciones que permitan encontrar la configuración más eficiente ante el espectro de referencia<sup>10,11,12</sup>. Al mismo tiempo se buscan los materiales óptimos que permitan mejorar la eficiencia de las células MJ. Este valor va a depender también del número de uniones, sin embargo, dada la complejidad a la hora de fabricar este tipo de células, no se espera que el límite de uniones que una célula MJ pueda llegar a tener sea mayor de 5 ó 6<sup>13</sup>. La figura 2.6 muestra la eficiencia teórica que tendría una célula MJ en función del número de uniones, a un sol (1000 W/m<sup>2</sup>) y para la concentración óptima en cada caso. Estas eficiencias han sido calculadas mediante programas teóricos de simulación<sup>14,15</sup>.



**Figura 2.6:** Eficiencia teórica en función del número de uniones para una célula MJ a un sol y bajo la concentración más óptima en cada caso bajo el espectro de referencia AM1.5d ASTM G173 a una temperatura de célula de 25 °C.

De forma matemática, análoga a las células de una unión descritas por la ecuación 2.1, las células MJ se representan de forma que cada una de las  $i$  uniones que componen la célula tiene su propia expresión<sup>16</sup>, ecuación 2.5. El resto de parámetros definidos para las células de una unión tienen el mismo sentido y validez que para las células MJ:

$$I^i(V^i) = I_{01}^i \left( e^{\frac{q(V^i - I^i R_s^i)}{m_1^i kT}} - 1 \right) + I_{02}^i \left( e^{\frac{q(V^i - I^i R_s^i)}{m_2^i kT}} - 1 \right) - I_L^i + \frac{V^i - I^i R_s^i}{R_p^i} \text{ Ecuación 2.5}$$

Sin embargo, pese a su alta eficiencia, el principal problema para que las células MJ se abran al mercado es su excesivo coste, que impide que se puedan usar de forma análoga a las células FV. Para reducir costes se introduce el concepto de energía solar de concentración que tiene como objetivo reducir el tamaño de célula usando lentes o espejos que concentran la luz, como se comentó en el capítulo 1. De esta forma, se reduce el área de la célula sustituyéndola por dispositivos ópticos más baratos<sup>6</sup>. La concentración ( $X$ ) viene normalmente descrita como el cociente de la corriente generada en concentración,  $I_{sc}(X)$ , respecto a la que el sistema genera a un sol ( $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $I_{sc}(1)$ , descrito por la siguiente ecuación<sup>4</sup>:

$$X = \frac{I_{sc}(X)}{I_{sc}(1)} \text{ Ecuación 2.6}$$

## 2.2. Modelos de células multiunión

Una vez explicado brevemente los fundamentos teóricos de las células multiunión, en esta sección se va a llevar a cabo una revisión de los métodos existentes destinados a modelar el comportamiento de una célula MJ. Estos métodos son útiles a la hora de predecir los parámetros I-V en condiciones reales de funcionamiento.

Cabe destacar que, debido a que la energía CPV está en fase de aprendizaje, no hay muchos métodos destinados a modelar células multiunión. De los métodos

encontrados, se va a realizar un breve resumen de aquellos que se han considerado más relevantes.

### 2.2.1. Modelo C. Baur y A. W. Bett<sup>17</sup>

Este modelo o procedimiento para la obtención de los parámetros necesarios a la hora de describir el funcionamiento de una célula MJ fue presentado por C. Baur y A.W. Bett del Fraunhofer ISE y está basado en los métodos de caracterización espectrométrica llevados a cabo en el CalLab, Fraunhofer ISE<sup>18,19</sup>. Gracias a estos métodos y siguiendo procedimientos matemáticos, el método obtiene los parámetros indicados en la ecuación 2.5, que describe el funcionamiento de una célula MJ de tres uniones.

Usando AM0 como espectro de referencia ( $E_{ref}(\lambda)$ ), el espectro incidente sobre la célula ( $E(\lambda)$ ) se va variando sistemáticamente al mismo tiempo que se graban las curvas I-V. De esta forma se obtienen las curvas I-V del dispositivo para distintos espectros, lo que permite, mediante métodos matemáticos, calcular los parámetros ya comentados. Para la obtención de dichos parámetros, durante el experimento se realizaron dos tipos de medidas.

En el primer conjunto de medidas la densidad de corriente fotogenerada por la subcélula posterior ( $J_{Lbot}$ ) se mantiene constante a medida que se cambia el espectro incidente en relación con el espectro de referencia:

$$J_{Lbot}(E(\lambda)) = J_{Lbot}(E_{ref}(\lambda)) = \text{constante} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

La relación entre las densidades de corriente fotogeneradas por la subcélula superior ( $J_{Ltop}$ ) y la media ( $J_{Lmid}$ ) sigue la ecuación:

$$\frac{J_{Ltop}(E(\lambda))}{J_{Ltop}(E_{ref}(\lambda))} + \frac{J_{Lmid}(E(\lambda))}{J_{Lmid}(E_{ref}(\lambda))} = 2 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

De esta forma, se cuenta con espectros y curvas I-V en las que la subcélula posterior tenía una fotocorriente constante mientras que las densidades de corriente fotogeneradas por las subcélulas superior y media se variaban de forma sistemática.

En la segunda parte del experimento, por el contrario, se mantuvieron constantes las densidades de corriente fotogeneradas por las subcélulas superior y media, bajo el espectro de referencia, mientras que la densidad de corriente en la subcélula posterior fue reducida linealmente:

$$J_{Ltop}(E(\lambda)) = J_{Ltop}(E_{ref}(\lambda)) = \text{constante} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$J_{Lmid}(E(\lambda)) = J_{Lmid}(E_{ref}(\lambda)) = \text{constante} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

De esta forma se cuenta con espectros y curvas I-V en las que la corriente de la subcélula posterior se varió de forma sistemática mientras que las corrientes en las subcélulas superior y media se mantuvieron constantes.

A partir de las medidas realizadas se resolvió el sistema formado por tres ecuaciones, del tipo ecuación 2.5, usando procedimientos matemáticos. No obstante, para poder resolver dicho sistema se han de tener en cuenta algunas consideraciones iniciales:

- La resistencia en paralelo no se puede determinar a no ser que el sistema se vea afectado por un valor de ésta muy bajo. Solamente en el caso de que el sistema tenga una muy baja resistencia en paralelo ésta puede ser calculada con mucha precisión.
- No es posible calcular la resistencia en serie de cada una de las subcélulas de la unión, por lo que se define una única  $R_s$  para todo el sistema.
- La más importante contribución a la resistencia en serie se espera venga de la subcélula superior, por lo que el valor obtenido para  $R_s$  se le asocia a esta subcélula.

Con lo expuesto anteriormente se resuelve el sistema de ecuaciones, gracias a las medidas realizadas, y se obtienen los parámetros necesarios para poder calcular las

curvas I-V de una célula MJ. En concreto se obtienen las densidades de corriente de saturación de los dos diodos,  $J_{01}$  y  $J_{02}$ , para cada una de las uniones y la resistencia en serie de la subcélula superior. Con estos valores, y conociendo la radiación incidente, el método permite calcular los parámetros I-V propios de una célula, es decir,  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $J_{mpp}$  y  $V_{mpp}$ . Los valores obtenidos para estos parámetros se comparan con los medidos durante el procedimiento descrito, obteniéndose resultados precisos en todos los casos.

Sin embargo, por medio de diversos procedimientos, se llega a la conclusión de que la solución del sistema de ecuaciones no es única, es decir, existen diversas soluciones a los parámetros característicos de la ecuación 2.5 para cada unión, de forma, que se obtengan las mismas curvas I-V al mismo tiempo que los resultados son igual de óptimos. Esto implica que el método se puede aplicar para predecir resultados experimentales a distintos espectros, teniendo un conjunto de medidas a distintos espectros suficientemente amplias, pero en ningún caso, para obtener los parámetros reales de las subcélulas que componen el sistema.

#### 2.2.2. Modelo S. Kinsey et al. <sup>20,21</sup>

Este método fue publicado por Geoffrey S. Kinsey y Kenneth M. Edmondson de Amonix y Spectrolab et al. En dichos artículos se hace hincapié en la gran influencia que tienen las particulares características de una célula III-V MJ en la predicción de la energía de un módulo o sistema CPV y tratan de dar solución a este problema. Se introduce un método basado en medidas de la respuesta espectral de células de triple unión a distintas temperaturas, para poder predecir la salida de una célula MJ funcionando en concentración.

- *Medida y modelo de los parámetros de la célula a distintas concentraciones y temperaturas.*

El primer punto del modelo propuesto consiste en estudiar cómo se comportan los parámetros FF y  $V_{oc}$  con la temperatura y concentración incidente. Para llevar a cabo este estudio se contó con un dispositivo experimental que permitía variar la temperatura y la concentración bajo el espectro de referencia AM1.5d. Las medidas se llevaron a cabo gracias al simulador solar HIPSS<sup>22</sup> de la compañía Spectrolab.

Una vez realizadas las medidas a distintas temperaturas y concentraciones, el modelo trata estos parámetros de la siguiente forma: ambos se consideran constantes con el espectro incidente de forma que no se introduce corrección espectral para la  $V_{oc}$  y el FF. Para el FF, una vez conocida la concentración a la que va a trabajar la célula (suponiendo que ésta se encuentra en un módulo CPV que tiene una concentración determinada), ésta se mantiene constante ante variaciones en la radiación, mientras que la  $V_{oc}$  se corrige con la radiación y la concentración siguiendo la ecuación 2.11.

$$V_{oc} = \frac{mkT}{q \log(e)} \log(X) + V_{oc}(X = 1) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Además, ambos parámetros se van a corregir en temperatura, gracias a las medidas realizadas anteriormente que permiten conocer sus coeficientes de temperatura.

- *Medida de SR a distintas temperaturas y cálculo de la densidad de corriente fotogenerada.*

El segundo punto del modelo se basa en medir la ESR o EQE de cada una de las subcélulas que componen la célula a modelar a distintas temperaturas. De esta forma, gracias a la generalización de la ecuación 2.5 para las  $i$  uniones de la célula a modelar, se puede saber la densidad de corriente fotogenerada por cada unión conociendo el espectro incidente, ecuación 2.12:

$$J_{Li} = \int ESR_i(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad \text{Ecuación 2.12}$$

La ecuación 2.12 permite saber cuál será la densidad de corriente generada por cada una de las  $i$  uniones. Al estar en serie las uniones, se puede saber cuál será la unión que limita la corriente y por tanto la que define la corriente de la célula MJ. Además, gracias a la ecuación 2.6 y conociendo la radiación y la concentración a la que estará sometida la célula, se corrige  $J_{Li}$  de forma que se conocerá la densidad de corriente de cortocircuito de la célula a la temperatura, espectro y radiación de trabajo.

- *Estudio de la distribución espectral.*

En el tercer y último punto se explica el método seguido para poder calcular el espectro que incide sobre la célula y de esta forma estimar la corriente generada en una localización determinada. Aunque no forma parte del modelo de la célula, es interesante explicar cuál fue el procedimiento seguido por los autores. Para el estudio de la distribución espectral y de la radiación directa incidente en el lugar de interés se usó el programa desarrollado por el NREL (*National Renewable Energy Laboratory*): SMART<sup>23,24</sup>. Este programa permite modelar la distribución espectral y obtener una estimación de la radiación directa de la zona geográfica deseada, partiendo de parámetros puramente atmosféricos.

Como se ha visto, este método está centrado en la predicción de la energía producida por una célula MJ. Sin embargo, el método se puede aplicar para predecir la energía producida por plantas CPV con buenos resultados. Para esto, además de los factores comentados durante la descripción del modelo, se han de tener en cuenta las pérdidas por transmisión de las lentes, las pérdidas por suciedad y las pérdidas por las interconexiones de los módulos y células<sup>25</sup>.

### 2.2.3. *Modelo C. Domínguez et al.*<sup>26</sup>

Este método está descrito principalmente en un artículo publicado por César Domínguez, Ignacio Antón y Gabriel Sala del IES (Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid). Este método parte del modelo de un diodo para células de una unión y se propone una extensión de dicho modelo para células multiunión.

La configuración que se plantea es la de tres subcélulas unidas en serie, de forma que la corriente total del sistema viene limitada por la subcélula de menor corriente, al mismo tiempo, el voltaje vendrá determinado por la suma de los voltajes de cada una de las uniones. Esto se puede expresar como:

$$I_L = \min (I_{L,top}, I_{L,mid}, I_{L,bot}) \text{ Ecuación 2.13}$$

$$V = V_{top} + V_{mid} + V_{bot} - IR_s \text{ Ecuación 2.14}$$

Donde  $I_{Ltop}$ ,  $I_{Lmid}$ ,  $I_{Lbot}$  y  $V_{top}$ ,  $V_{mid}$ ,  $V_{bot}$  representan las tensiones y corrientes fotogeneradas por la subcélulas superior, media y posterior respectivamente.

Para poder desplazar la curva I-V a las condiciones deseadas es necesario conocer distintos parámetros de la célula, propios de sus características internas, y otros que son obtenidos de forma experimental. Para la determinación de los parámetros de forma experimental se usó un simulador solar, desarrollado por el IES, que permite variar el espectro incidente, monitorizado gracias al uso de *isotype cells* (células que tienen la misma respuesta espectral que cada una de las uniones de la célula MJ, de forma que se puede conocer la corriente que genera cada una de las subcélulas que componen la célula MJ a un espectro determinado), la irradiación desde 1 a más de 1000 soles y la temperatura del dispositivo desde menos de 0 °C a más de 100 °C<sup>27,28,29,30</sup>.

Tras una serie de cálculos, el modelo plantea el siguiente conjunto de ecuaciones que permiten trasladar la corriente y la tensión entre dos puntos de trabajo diferentes:

$$I_{out}(T_{out}) = X(T_{out}, T_{in})I_{in}(T_{in}) \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$\begin{aligned} \Delta V(X_{top}X_{mid}X_{bot}) = V_{out} - V_{in} = & \\ \frac{kT}{q} [(m_{top} + m_{mid} + m_{bot})\text{Ln}(X)] + & \\ \frac{kT}{q} \left[ \ln \left( \left( \frac{F_{top}I_{Ltop,in} - I_{in}}{I_{Ltop,in} - I_{in}} \right)^{m_{top}} + \left( \frac{F_{mid}I_{Lmid,in} - I_{in}}{I_{Lmid,in} - I_{in}} \right)^{m_{mid}} \right. \right. & \\ \left. \left. + \left( \frac{F_{bot}I_{Lbot,in} - I_{in}}{I_{Lbot,in} - I_{in}} \right)^{m_{bot}} \right) \right] & \end{aligned}$$

$$\text{Ecuación 2.16}$$

$$\begin{aligned} \Delta V = V(T_{out}) - V(T_{in}) = & \\ \left( \frac{m_{top}E_{gap\ top} + m_{mid}E_{gap\ mid} + m_{bot}E_{gap\ bot}}{q} - (V(T_{in}) + I_{in}R_s) \right) + \left( 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \right) - & \\ \left( \gamma_{top}m_{top} + \gamma_{mid}m_{mid} + \gamma_{bot}m_{bot} \right) \frac{kT_{out}}{q} \quad \text{Ecuación 2.17} & \end{aligned}$$

La ecuación 2.15 permite trasladar la corriente en función de la temperatura e irradiación, mientras que las ecuaciones 2.16 y 2.17 permiten trasladar la tensión en función de la irradiación, el espectro y la temperatura respectivamente. Para trasladar la

curva I-V, las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 requieren tres grupos de parámetros: parámetros inherentes del dispositivo, las condiciones de medida iniciales y las finales.

La tabla 2.1 resume todos los datos necesarios para poder aplicar el modelo. En primer lugar se recogen los datos de la célula a estudiar que son necesarios conocer o parámetros inherentes del dispositivo. Éstos son:  $R_s$ ,  $n_i$ ,  $\gamma_i$  y  $E_{gi}$ .  $R_s$  y  $n_i$  (que se considera iguales para todas las uniones para simplificar los cálculos). Estos parámetros se consideran parámetros de ajuste del modelo por lo que pueden no tener significado real. El ajuste de los mismos se realiza mediante programas de simulación en los que se va variando su valor hasta lograr que el error entre los datos y el modelo sea el mínimo posible. El parámetro  $\gamma_i$  toma el valor 3 para todas las uniones y las energías del *gap* tienen los valores 1,85, 1,42 y 0,67 eV para las subcélulas superior, media y posterior respectivamente. En segundo lugar, la tabla muestra las variables que se necesita tener como datos de entrada, condiciones de medida iniciales o *input*: la corriente fotogenerada por cada una de las uniones, la curva I-V de la célula y la temperatura a la que ha sido medida. En último lugar aparecen los datos necesarios para poder trasladar las curvas I-V, condiciones de medida finales o *output*: la concentración a la que estará trabajando cada una de las uniones y la temperatura a la que se quiere trasladar la curva I-V. Una vez realizados los tres puntos anteriores se tiene como resultado la curva I-V a las condiciones de radiación, temperatura y espectro deseadas.

### 2.3. Modelos de módulos de concentración

En esta sección se realiza una descripción de los distintos métodos destinados a modelar el comportamiento de un módulo CPV en situaciones reales de funcionamiento. De igual forma que para las células multiunión, debido a que la tecnología CPV está aún en fase de aprendizaje, no se han encontrado muchos métodos destinados a modelar módulos. Entre los métodos encontrados se han considerado sólo dos de ellos, ya que describen de forma precisa el método a seguir para calcular la salida de un módulo CPV.

Parámetros inherentes del dispositivo			
$E_{gap_i}$	Energía del <i>gap</i> de cada subcélula <i>i</i> a 300K		
$m_i$	Factor de idealidad de cada subcélula <i>i</i>		
$\gamma_i$	Dependencia de tercer orden del cuadrado de la concentración intrínseca de portadores de la temperatura de la subcélula <i>i</i>		
$R_s$	Resistencia en serie total		
Condiciones de medida iniciales ( <i>input</i> )			
$I_{Li, in}$	Corriente fotogenerada a las condiciones iniciales de la subcélula <i>i</i>		
$T_{in}$	Temperatura a las condiciones iniciales		
$(V_{in}, I_{in})$	Curva I-V medida		
Condiciones de medida finales ( <i>output</i> )			
$I_{Li, out}$	Corriente fotogenerada a las condiciones finales de la subcélula <i>i</i>	Parámetros derivados	
		$X = \frac{I_{L,out}(T_{out})}{I_{L,in}(T_{in})}$	Factor de concentración de la célula
		$X_i = \frac{I_{L,i,out}(T_{out})}{I_{L,i,in}(T_{in})}$	Factor de concentración de la subcélula <i>i</i>
		$F_i = \frac{X_i}{X}$	Desplazamiento del factor de concentración para la subcélula <i>i</i>
$T_{out}$	Temperatura a las condiciones finales		
Resultados			
$(V_{out}, I_{out})$	Curva I-V trasladada		

**Tabla 2.1:** Relación de parámetros usados en el método de traslación.

### 2.3.1. Modelo Sandia<sup>31</sup>

Este modelo fue desarrollado por los laboratorios Sandia de los Estados Unidos durante la década de los noventa. Su utilidad ha sido demostrada para células, módulos y generadores fotovoltaicos de distintas tecnologías, incluyendo la concentración fotovoltaica. El modelo tiene en cuenta los efectos eléctricos, térmicos, espectrales y ópticos. Las ecuaciones del modelo dependen de una serie de coeficientes específicos para la tecnología del dispositivo objeto de estudio. Dichos coeficientes pueden obtenerse mediante un análisis de regresión a partir de datos medidos a sol real.

El modelo permite calcular la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente del punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ), la tensión del punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ) y el punto de máxima potencia ( $P_{mpp}$ ) que definen el funcionamiento del dispositivo para unas condiciones de operación dadas. Las

ecuaciones del modelo se formulan en función de la denominada “irradiancia efectiva” y de la temperatura de operación de las células. El concepto de “irradiancia efectiva” se define como la irradiancia solar en el plano del dispositivo una vez tenidas en cuenta las influencias espectrales, ópticas, relacionadas con el ángulo de incidencia de la luz, y las derivadas del grado de suciedad de la cubierta. Para sistemas CPV, que sólo responden a la irradiancia normal directa, la irradiancia efectiva se expresa como:

$$B_{ef} = (B \cos \theta_s / B^*) f_1(AM) f_2(\theta_s) SF \text{ Ecuación 2.18}$$

Donde  $B_{ef}$  es la irradiancia efectiva,  $B$  es la irradiancia normal directal, medida por un pirheliómetro,  $B^*$  es la irradiancia normal directa en condiciones estándar,  $\theta_s$  es el ángulo de incidencia de la luz solar que indica el error de seguimiento del sistema,  $f_1(AM)$  es el factor de corrección espectral, que en este modelo se calcula exclusivamente a partir de la masa de aire  $AM$  ( $f_1(AM)=1$  para el espectro estándar  $AM$  1.5d),  $f_2(\theta_s)$  es el factor de corrección óptico, que computa los efectos derivados de una incidencia de la luz no perpendicular al plano del dispositivo ( $f_2(\theta_s)=1$  para incidencia normal) y  $SF$  es el factor de suciedad de la cubierta, que es 1 si la cubierta está limpia.

A continuación se presentan las ecuaciones del modelo, despreciando los errores de seguimiento y considerando que no existen pérdidas ópticas por suciedad, para el caso de una célula de alta concentración. A partir de estas ecuaciones se calcularán los parámetros característicos de un módulo CPV.

$$B_{ef} = \frac{B}{B^*} f_1(AM) \text{ Ecuación 2.19}$$

$$I_{sc} = B_{ef} [I_{sc}^* + \alpha_{I_{sc}} (T_{célula} - T_{célula}^*)] \text{ Ecuación 2.20}$$

$$V_{oc} = V_{oc}^* + \delta \ln(B_{ef}) + \beta_{V_{oc}} (T_{célula} - T_{célula}^*) \text{ Ecuación 2.21}$$

$$I_{mpp} = (C_0 B_{ef} + C_1 B_{ef}^2) [I_{mpp}^* + \alpha_{I_{mpp}} (T_{célula} - T_{célula}^*)] \text{ Ecuación 2.22}$$

$$V_{mpp} = V_{mpp}^* + C_2 \delta \ln(B_{ef}) + C_3 [\delta \ln(B_{ef})]^2 + \beta_{V_{mpp}} (T_{célula} - T_{célula}^*)$$

**Ecuación 2.23**

$$P_{mpp} = I_{mpp} V_{mpp} \text{ Ecuación 2.24}$$

$$\delta = \frac{mk(T_{célula} + 273,15)}{q} \text{ Ecuación 2.25}$$

Donde  $T_{\text{célula}}$  es la temperatura de célula,  $\delta$  es la tensión térmica,  $k$  la constante de Boltzmann,  $q$  la carga del electrón y  $m$  el factor de idealidad del diodo. Además,  $T_{\text{célula}}^*$ ,  $I_{\text{sc}}^*$ ,  $V_{\text{oc}}^*$ ,  $I_{\text{mpp}}^*$  y  $V_{\text{mpp}}^*$  son los parámetros de la célula en condiciones estándar,  $\alpha_{I_{\text{sc}}}$ ,  $\beta_{V_{\text{oc}}}$ ,  $\alpha_{I_{\text{mpp}}}$ ,  $\beta_{V_{\text{mpp}}}$  son los coeficientes de variación con respecto a la temperatura de célula de  $I_{\text{sc}}$ ,  $V_{\text{oc}}$ ,  $I_{\text{mpp}}$  y  $V_{\text{mpp}}$  respectivamente,  $C_0$  y  $C_1$  son coeficientes para el cálculo de  $I_{\text{mpp}}$ , de forma que  $C_0+C_1=1$ , y  $C_2$  y  $C_3$  son coeficientes para el cálculo de  $V_{\text{mpp}}$ .

El cálculo de los coeficientes de temperatura viene igualmente descrito en el método presentado por los laboratorios Sandia. Para llevarlo a cabo, el módulo CPV del que se quieren conocer los coeficientes de temperatura debe de estar cubierto y desalineado del sol desde primera hora de la mañana para que las células y el módulo se encuentren a baja temperatura. Una vez se alcanza la radiación óptima (la radiación se considera óptima en el momento del día en el que ésta no varía de forma importante durante el proceso de medida para evitar errores derivados de su variación), en un momento particular del día, éste se destapa y se coloca en posición de seguimiento solar. Una vez el módulo está alineado con el sol, se comienzan a tomar medidas de curvas I-V y de temperatura de célula en intervalos de 20 segundos, a medida que la célula y el módulo aumentan de temperatura como consecuencia de la radiación incidente. Una vez que la temperatura de la célula se estabiliza, se detiene el experimento. Tras esto, se representan de forma gráfica los parámetros  $I_{\text{sc}}$ ,  $V_{\text{oc}}$ ,  $I_{\text{mpp}}$  y  $V_{\text{mpp}}$ , para los que se quieren conocer los coeficientes de temperatura, frente a la temperatura de célula medida. De las pendientes de las regresiones lineales obtenidas de la representación gráfica de cada uno de los parámetros se obtienen los coeficientes de temperatura.

Las ecuaciones anteriores son válidas para una célula y se deben modificar ligeramente para su aplicación a módulos CPV. Para el caso de un módulo compuesto por  $N_p$  ramas de células en paralelo, estando cada rama compuesta por  $N_s$  células en serie, las modificaciones serían las siguientes:

- a) Se sustituyen los coeficientes de temperatura de célula por los correspondientes coeficientes de temperatura de módulo. Los coeficientes de módulo se relacionan con los de célula mediante:

$$\alpha_{I_{sc},módulo} = N_p \alpha_{I_{sc}} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

$$\beta_{V_{oc},módulo} = N_s \beta_{V_{oc}} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$\alpha_{I_{mpp},módulo} = N_p \alpha_{I_{mpp}} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

$$\beta_{V_{mpp},módulo} = N_s \beta_{V_{mpp}} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

- b) Se introduce el factor  $N_s$  en los términos que incluyen la tensión térmica, es decir, se modifican las ecuaciones 2.21 y 2.23:

$$V_{oc,módulo} = V_{oc,módulo}^* + N_s \delta \ln(B_{ef}) + \beta_{V_{oc},módulo} (T_{célula} - T_{célula}^*)$$

**Ecuación 2.30**

$$V_{mpp,módulo} = V_{mpp,módulo}^* + C_2 N_s \delta \ln(B_{ef}) + C_3 N_s [\delta \ln(B_{ef})]^2 +$$

$$\beta_{V_{mpp},módulo} (T_{célula} - T_{célula}^*) \quad \text{Ecuación 2.31}$$

- c) Las ecuaciones para el cálculo del resto de los parámetros eléctricos para el módulo vienen dadas por:

$$I_{sc,módulo} = B_{ef} [I_{sc,módulo}^* + \alpha_{I_{sc},módulo} (T_{célula} - T_{célula}^*)] \quad \text{Ecuación 2.32}$$

$$I_{mpp,módulo} = (C_0 B_{ef} + C_1 B_{ef}^2) [I_{mpp,módulo}^* + \alpha_{I_{mpp},módulo} (T_{célula} - T_{célula}^*)]$$

**Ecuación 2.33**

$$P_{mpp,módulo} = I_{mpp,módulo} V_{mpp,módulo} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Como se ha comentado, el modelo tiene en cuenta los efectos espectrales mediante el factor de corrección espectral  $f_1(AM)$ . Dicho factor se corresponde aproximadamente con el parámetro de desacople espectral,  $M$ , definido en la norma ASTM E 973<sup>32</sup>, un parámetro que compensa la sensibilidad espectral de los dispositivos fotovoltaicos. El factor  $f_1(AM)$  se calcula mediante:

$$f_1(AM) = \frac{I_{sc@T_{célula}^*}}{B} \cdot \frac{B^*}{I_{sc}^*} \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Donde  $I_{sc}@T_{célula}^*$  es la corriente de cortocircuito corregida a la temperatura de referencia  $T_{célula}^*$  en las condiciones espectrales AM de la medida. Si se representa el factor de corrección espectral, así calculado, frente a la masa de aire, se obtiene una función que es bastante independiente del día considerado, de la estación del año e incluso del emplazamiento del dispositivo. Experimentalmente se comprueba que dicha función puede aproximarse por un polinomio de grado 4, función exclusiva de la masa de aire:

$$f_1(AM) = a_0 + a_1AM + a_2AM^2 + a_3AM^3 + a_4AM^4 \quad \text{Ecuación 2.36}$$

Donde  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  son los parámetros de ajuste del polinomio de grado cuatro.

### 2.3.2. Modelo G. Peharz et al.<sup>33</sup>

Este método fue propuesto por Gerhard Peharz et al. del Fraunhofer ISE. El método estima el punto de máxima potencia de módulos CPV. El procedimiento propuesto se basa en la dependencia de la potencia del módulo con la irradiancia, el espectro y la temperatura. Para llevar a cabo este estudio se utilizaron diversos módulos CPV con las características mostradas en la tabla 2.2.

Nombre	Área (cm <sup>2</sup> )	Número de células y lentes	Óptica secundaria	Espectro al que han sido optimizados
Módulo 1	2400	150	Reflexiva	AM1.5d ASTM G173-03
Módulo 2	2400	150	no	AM1.5d ASTM G173-03
Módulo 3	2400	150	no	AM1.5d ASTM G173-03
Módulo 4	768	48	no	AM1.5d ASTM G173-03

**Tabla 2.2:** Módulos estudiados en el Fraunhofer ISE. Todos los módulos usan células  $Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  y están protegidas por diodos bypass.

El método plantea una ecuación lineal de regresión múltiple, dependiente de la irradiancia normal directa (DNI), del espectro (Z) y la temperatura de célula ( $T_{célula}$ ), definida como la temperatura media de las células que componen el módulo, para el cálculo del punto de máxima potencia de los módulos bajo estudio:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = c_{\text{DNI}}\text{DNI} + c_Z Z + c_T T_{\text{célula}} + \text{Offset} \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Esta ecuación es válida para los módulos 1, 2 y 3 mientras que para el módulo 4 se debe realizar una pequeña modificación que luego se comentará.

Para realizar la caracterización al aire libre, y de esta forma poder extraer los coeficientes de regresión lineal  $c_{\text{DNI}}$ ,  $c_Z$  y  $c_T$ , las curvas I-V de los módulos fueron medidas automáticamente junto con las condiciones ambientales.

La DNI fue medida con un pirheliómetro y el impacto del espectro es cuantificado por el parámetro  $Z$  que representa el *mismatch* en la corriente de cortocircuito entre las subcélulas superior y media respecto el espectro de referencia AM1.5d ASTM G173-03. Para calcular este parámetro se usaron dos células de igual respuesta espectral que las subcélulas superior y media. De esta forma es posible conocer la corriente de cada una de estas uniones de forma individual durante las medidas de las curvas I-V del módulo. Debido a que la célula de germanio siempre genera más corriente que el resto, no fue monitorizada ya que nunca va a limitar la corriente. De esta forma,  $Z = 0$  corresponde al espectro donde las subcélulas superior y media generan la misma corriente que bajo el espectro de referencia AM 1.5d ASTM G173-03 para el que han sido optimizadas,  $Z > 0$  corresponde a espectros azules donde la subcélula media está limitando la corriente y  $Z < 0$  corresponde a espectros rojos donde es la subcélula superior la que está limitando la corriente<sup>34</sup>.

Lo módulos 1, 2 y 3 encuentran su corriente máxima en  $Z = 0$ , espectro al que ha sido optimizados, tal y como se representa en la tabla 2.5, sin embargo, el módulo 4, encuentra su máximo de corriente en  $Z = -0,015$ . Debido a esto, para este módulo la ecuación 2.37 introduce un término cuadrático para ajustarse de mejor forma a su comportamiento. Así, la ecuación utilizada como función de ajuste para los datos medidos del módulo 4 se expresa como:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = c_{\text{DNI}}\text{DNI} + c_{Z_2} Z^2 + c_Z Z + c_T T_{\text{célula}} + \text{Offset} \quad \text{Ecuación 2.38}$$

Para llevar a cabo el cálculo de la temperatura de la célula del módulo se miden las curvas I-V del módulo CPV para diferentes temperaturas. Además debe variarse la intensidad de la radiación para cada temperatura. Esto se realiza con un simulador desarrollado en el Fraunhofer ISE donde se puede controlar la temperatura y la intensidad de la radiación.

De cada curva I-V medida se obtienen la  $I_{sc}$  del módulo ( $I_{sc,módulo}$ ) y la  $V_{oc}$  del módulo ( $V_{oc,módulo}$ ). La  $V_{oc,módulo}$  depende logarítmicamente de la  $I_{sc,módulo}$  para una  $T_{célula}$  fija. Para una  $I_{sc,módulo}$  fija, la  $V_{oc,módulo}$  depende linealmente de la  $T_{célula}$ . La dependencia de  $V_{oc,módulo}$  con la  $I_{sc,módulo}$  y la  $T_{célula}$  puede ser descrita mediante la siguiente función logarítmica:

$$V_{oc,módulo}(I_{sc,módulo}, T_{célula}) = P_1(T_{módulo}) \ln(I_{sc,módulo}) + P_2(T_{célula})$$

**Ecuación 2.39**

Donde  $P_1$  y  $P_2$  pueden obtenerse mediante ajuste logarítmico de los pares ( $V_{oc,módulo}$ ,  $I_{sc,módulo}$ ) medidos para una determinada  $T_{célula}$ . Ambos parámetros tienen las mismas unidades de  $V_{oc,módulo}$ , voltios. Se asume que  $P_1$  y  $P_2$  dependen linealmente de la  $T_{célula}$ , por lo que pueden escribirse de la siguiente manera:

$$P_1(T_{célula}) = P_1^0 + k_{P1} T_{célula} \quad \text{Ecuación 2.40}$$

$$P_2(T_{célula}) = P_2^0 + k_{P2} T_{célula} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

Donde  $P_1^0$ ,  $P_2^0$ ,  $k_{P1}$  y  $k_{P2}$  son los parámetros de ajuste que se obtienen de la regresión lineal. Sustituyendo estas ecuaciones en la ecuación 2.39 se obtiene la  $V_{oc}$  en función de  $I_{sc,módulo}$  y  $T_{célula}$ :

$$V_{oc,módulo}(I_{sc,módulo}, T_{célula}) = (P_1^0 \ln(I_{sc,módulo}) + P_2^0) + (k_{P1} \ln(I_{sc,módulo}) + k_{P2}) T_{célula} \quad \text{Ecuación 2.42}$$

Por tratarse de una ecuación explícita, la ecuación 2.42, puede transformarse para obtener la  $T_{célula}$  en función de la  $V_{oc,módulo}$  y la  $I_{sc,módulo}$ :

$$T_{\text{célula}} = \frac{V_{oc,\text{módulo}} - P_1^0 \ln(I_{sc,\text{módulo}}) - P_2^0}{k_{P1} \ln(I_{sc,\text{módulo}}) + k_{P2}} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

La ecuación 2.43 permite calcular la  $T_{\text{célula}}$  a partir de la curva I-V de un módulo CPV. El módulo actúa como sensor de temperatura. De esta forma, cuando el módulo trabaja al aire libre la temperatura media de las células que lo forman puede obtenerse sin necesidad de medirlas directamente. Sin embargo, para obtener los parámetros  $P_1^0$ ,  $P_2^0$ ,  $k_{P1}$  y  $k_{P2}$  el módulo necesita ser caracterizado mediante un simulador solar que permita variar sistemáticamente la intensidad y la temperatura.

Las funciones obtenidas mediante la regresión lineal múltiple permiten el cálculo de la potencia máxima de los módulos a partir de la DNI, del espectro ( $Z$ ) y la temperatura media de células solares ( $T_{\text{célula}}$ ). Con este fin, las condiciones a las cuáles se desea obtener la potencia máxima se insertan en las ecuaciones 2.37 ó 2.38, según convenga en cada caso, utilizando los coeficientes obtenidos de la regresión lineal múltiple.

### 2.3.3. *Condicionantes para el uso de estos modelos*

El uso de estos modelos permite obtener el punto de máxima potencia de módulos CPV para unas condiciones de operación dadas (DNI,  $T_{\text{célula}}$ , AM,  $Z$ , etc.) Sin embargo, para aplicar estos modelos se necesitan una serie de medidas experimentales que deben realizarse usando simuladores solares o en condiciones de funcionamiento al aire libre para obtener los parámetros necesarios de las ecuaciones de los modelos, los cuales no son proporcionados por los actuales fabricantes de módulos CPV en las hojas de características.

Por lo tanto, entre los distintos procedimientos que existen para obtener la potencia máxima, y así la energía que genera un sistema HCPV en un periodo de tiempo determinado y en un emplazamiento concreto estarían:

- 1) Realizar las medidas experimentales necesarias para calcular los coeficientes de los modelos. Esto es un proceso laborioso y al alcance de pocos debido a las instalaciones necesarias.

- 2) Que el fabricante de los módulos ofrezca estos parámetros en las hojas de características de los módulos, algo que en la actualidad no realizan.
- 3) Realizar un modelo que permita el cálculo del punto de máxima potencia con un error aceptable, basándose en parámetros disponibles en bases de datos de acceso público y por tanto fáciles de obtener.

<sup>1</sup>Pierret R. F., (1994), “Fundamentos de Semiconductores”, Addison-Wesley Iberoamericana, S.A, segunda edición.

<sup>2</sup> Hovel H.J., (1975), “Semiconductor and Semimetals. Vol II: Solar Cells ”, Academic Press, New York.

<sup>3</sup> Henry C.H., Logan R.A., and Merritt F.R., (1978), “The Effect of Surface Recombination on Current in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Heterojunctions”, Journal of Applied Physics 49, p3530

<sup>4</sup> Abella M. A., (2005), “Sistemas Fotovoltaicos”, S.A.P.T. Publicaciones Técnicas, S.L. segunda edición.

<sup>5</sup> Markvart T. and Castañer L., (2005), “Solar Cells”, Elsevier Limited, first edition, Amsterdam.

<sup>6</sup> Luque A. L., Andreev V. M. (2007), “Concentrator Photovoltaics”, Springer-Verlag 2, New York.

<sup>7</sup> Fraas L. and Partain L., (2010), “Solar Cells and their Applications”, Wiley-Interscience, second edition, New Jersey.

<sup>8</sup> ASTM G173-Edition 1, (2003), "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface", American Society for Testing and Materials.

<sup>9</sup> King R. R. et al., (2004), “Metamorphic III-V Materials, Sublattice Disorder, and Multijunction Solar Cell Approaches with Over 37% Efficiency”, 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7-11 June.

<sup>10</sup> Dimroth F., (2006), “High-efficiency Solar Cells from III-V Compound Semiconductors”, Physica Status Solidi (c) 3, No. 3, 373-379.

<sup>11</sup> Law D. C. et al., (2010), “Future Technology Pathways of Terrestrial III-V Multijunctions Solar Cells for Concentrator Photovoltaics Systems”, Solar Energy Materials and Solar Cells 94 1314-1318.

<sup>12</sup> Philipps S. P., (2010), “Energy Harvesting Efficiency of III-V Triple-Junction Concentrator Solar Cells under Realistic Spectral Conditions”, Solar Energy Materials and Solar Cells 94 869-877.

<sup>13</sup> Pérez-Higueras P., Muñoz E., G. Almonacid, Vidal P. G., (2011), “High Concentrator Photovoltaics Efficiencies: Present Status and Forecast”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 1810-1815.

<sup>14</sup> Kurtz S., et al., (2008), “A Comparison of Theoretical Efficiencies of Multi-Junction Concentrator Solar Cells”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 16:537-46.

<sup>15</sup> Yamaguchi M., Luque A., (1999), “High Efficiency and High Concentration in Photovoltaics”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No. 10, October.

<sup>16</sup> Luque A., Hegedus S., (2003), “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley and Sons Ltd, Chichester.

- <sup>17</sup> Baur C. and Bett A. W., (2005), “Modelling of III-V Multi-Junction Cells Based on Spectrometric Characterization”, 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 6-10 June.
- <sup>18</sup> Meusel M., Baur C., Létay G., Bett A. W. et al., (2003), “Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurement Artifacts and their Explanation”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11:449-514.
- <sup>19</sup> Meusel M., Adelhelm R., Dimroth F., Bett A. W. et al., (2002), “Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 10:243-255.
- <sup>20</sup> Kinsey G. S. et al., (2008), “Concentrator Multijunction Solar Cell Characteristics Under Variable Intensity and Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:503-508.
- <sup>21</sup> Kinsey G. S. et al., (2009), “Spectral Response and Energy Output of Concentrator Multijunction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:279-288.
- <sup>22</sup> <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/T-HIPSS%20RevF.pdf>
- <sup>23</sup> Gueymard C., (2001), “Parameterized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance”, *Solar Energy* 71(5); 325-346.
- <sup>24</sup> Gueymard C., (2005), “SMARTS, “A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment”, Profesional Paper FSEC-PF-270-95.
- <sup>25</sup> Kinsey G. S., Stone K., Brown J. and Garboushian V., (2011), “Energy Prediction of Amonix CPV Solar Power Plants”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:794-796.
- <sup>26</sup> Domínguez C., Antón I. and Sala G., (2010), “Multijunction Solar Cell Model for Translating I-V Characteristics as a Function of Irradiance, Spectrum, and Cell Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18:272-284.
- <sup>27</sup> Domínguez C., Antón I., Sala G., (2008), "Solar Simulator for Concentrator Photovoltaic Systems," *Optics Express*, 16, pp. 14894-14901.
- <sup>28</sup> Askins S., Taylor S., Domínguez C., Antón I., (2007), “Realization of a Solar Simulator for Production Testing of HCPV Modules”, 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano, Italy.
- <sup>29</sup> Domínguez C., Askins S., Antón I., and Sala G., (2009), “Indoor Characterization of CPV Modules using the Helios 3198 Solar Simulator”, 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 1-25 September.
- <sup>30</sup> Leloux J., Pachón D. and Sala G., (2010), “Spectral Solar Radiation Measurements and Models for CPV Module Production Estimation”, 6<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaics Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.
- <sup>31</sup> King D. L., Boyson W.E., Kratochvil J.A., (2004), “Photovoltaic Array Performance Model, Sandia National Laboratories”, SAND 2004-3535.
- <sup>32</sup> ASTM E973, “Determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell”.
- <sup>33</sup> Peharz G., Ferrer Rodríguez J. P., Siefert G., Bett A. W., (2011), “A Method for using CPV Modules as Temperature Sensors and its Application to Rating Procedures”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 2734–2744.
- <sup>34</sup> Peharz G., Siefert G., Bett A.W., (2009), “A Simple Method for Quantifying Spectral Impacts on Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Energy* 83 1588–1598.

## **Capítulo 3: Modelización y caracterización de células III-V multiunión**

En la primera parte de este capítulo se va a describir, de forma resumida, el procedimiento de medición seguido para la caracterización y estudio de células III-V multiunión. El análisis de los resultados experimentales permite tener un conocimiento más amplio del comportamiento de las células multiunión. Este análisis, descrito en la segunda sección, es fundamental para plantear un modelo matemático que sea capaz de predecir la potencia de salida de una célula para unas condiciones de funcionamiento determinadas. Este modelo matemático se detalla en la última parte del capítulo, donde también se lleva a cabo un estudio detallado del ajuste del modelo propuesto frente a los datos experimentales, obtenidos durante el proceso de medida.

### **3.1. Dispositivo experimental**

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de las células III-V multiunión (MJ), células de este tipo fueron medidas en el laboratorio de calibración CalLab, en el Fraunhofer ISE, siguiendo distintos procedimientos. Aunque se midió un amplio

número de células, en este trabajo sólo se presentan los resultados obtenidos para cuatro de ellas, las mostradas en la tabla 3.1:

Descripción	Composición	Número de identificación (id)	Área (cm <sup>2</sup> )
LM	Ga <sub>0,50</sub> In <sub>0,50</sub> P/Ga <sub>0,99</sub> In <sub>0,01</sub> As/Ge	2404-6-LMM	0,052
MM	Ga <sub>0,35</sub> In <sub>0,65</sub> P/Ga <sub>0,83</sub> In <sub>0,17</sub> As/Ge	2517-2-BMC	0,053
MM	Ga <sub>0,35</sub> In <sub>0,65</sub> P/Ga <sub>0,83</sub> In <sub>0,17</sub> As/Ge	2517-2-BXC	0,053
MM	Ga <sub>0,35</sub> In <sub>0,65</sub> P/Ga <sub>0,83</sub> In <sub>0,17</sub> As/Ge	2517-2-BHC	0,053

**Tabla 3.1:** Células medidas en el laboratorio de calibración CalLab en el Fraunhofer ISE.

No es el objetivo de este apartado describir de forma precisa cuales son los procedimientos de calibración seguidos en el CalLab, ya que éstos han sido descritos con gran detalle por el Fraunhofer ISE en distintas publicaciones<sup>1,2,3</sup>. Sin embargo, si se va a realizar un breve resumen de cada uno de los procedimientos, indicando en cada caso la publicación en la que el procedimiento seguido se encuentra descrito con detalle.

La calibración seguida en el Fraunhofer ISE para la caracterización de una célula multiunión está definida por los siguientes procedimientos:

- a) Medidas de la respuesta espectral (SR) o de la eficiencia cuántica externa (EQE) a distintas temperaturas.
- b) Medidas de las curvas I-V a un sol (1000 W/m<sup>2</sup>) a distintos espectros (caracterización espectrométrica) y a distintas temperaturas.
- c) Medidas de las curvas I-V a distintas concentraciones efectivas (X) y a distintas temperaturas.

La EQE viene definida por el número de electrones producidos por la célula en función de la radiación incidente, clasificada por la longitud de onda de los fotones incidentes sobre ella. La SR está directamente relacionada con EQE y viene dada por la ecuación 3.1:

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} EQE(\lambda) \text{ Ecuación 3.1}$$

En la ecuación 3.1,  $\lambda$  representa la longitud de onda de la luz incidente,  $h$  la constante de Planck y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Por otro lado, la concentración efectiva ( $X$ ), como se vio en el capítulo anterior, viene definida como la relación entre la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) a una concentración o radiación normal directa (DNI) determinada y la corriente de cortocircuito a un sol, ecuación 3.2<sup>4</sup>:

$$X = \frac{I_{sc}(X)}{I_{sc}(1)} \text{ Ecuación 3.2}$$

Tal como se comentó anteriormente la primera variable a medir, y que además es esencial para poder llevar a cabo el resto del proceso de calibración, es la medición de la EQE o SR. El objetivo es medir la eficiencia cuántica externa de cada una de las uniones, de cada célula bajo estudio, a distintas temperaturas para de esta forma poder estudiar la influencia de la temperatura sobre la EQE. Las medidas fueron realizadas gracias a un *grating monochromator* desarrollado en el Fraunhofer ISE<sup>1</sup>. Éste permite conocer, al mismo tiempo y por unidad de longitud de onda, la intensidad luminosa recibida y la corriente generada para cada una de las uniones o subcélulas. Debido a esto es posible calcular la EQE o SR de cada subcélula.

Una vez realizadas las medidas de SR o EQE se puede llevar a cabo el segundo punto del procedimiento anteriormente descrito, ya que conocer la EQE o SR de cada una de las uniones es esencial para poder continuar con el proceso de calibración. Como se ha comentado, el objetivo es obtener las curvas I-V a un sol, a distintos espectros y temperaturas. Para ello se contó con un simulador solar *multi-source* desarrollado también en el Fraunhofer ISE. El simulador solar permite cambiar la intensidad en cada una de las uniones de la célula de forma individual, lo que permite, en última instancia, modificar el espectro recibido por la célula bajo estudio<sup>2</sup>. El espectro incidente se varía usando como espectro de referencia AM1.5d ASTM G173-03 a un sol<sup>5</sup>. De igual forma que en el punto anterior, las medidas también se realizaron a distintas temperaturas con el objetivo de estudiar la influencia de ésta ante distintos espectros.

Una vez completados los dos primeros puntos, el siguiente y último paso para establecer la caracterización de la célula es medir las curvas I-V a distintas concentraciones. Estas medidas se realizaron gracias a un simulador solar dotado de una lámpara que emite un pulso de gran radiación. Este simulador ha sido desarrollado

nuevamente en el Fraunhofer ISE. La concentración en el simulador solar se cambia variando la distancia entre la célula y la lámpara del flash. Además, igual que los anteriores puntos, las medidas se realizaron a distintas temperaturas con el objetivo de evaluar su influencia a distintas concentraciones<sup>3</sup>.

Gracias a las medidas realizadas a un sol en el apartado anterior y a las medidas a distintas concentraciones realizadas en este punto, que permiten llegar a una concentración de 1000 soles, se recorre el rango completo esperado de funcionamiento de una célula MJ en un módulo de concentración solar (CPV). Es importante explicar cómo se ajusta el espectro solar usado por el simulador solar, ya que esto sirve para explicar los datos obtenidos en concentración. El espectro del simulador solar ( $E_{sim}(\lambda)$ ) se ajusta de forma que cumple la relación de la ecuación 3.3, donde  $E_{ref}(\lambda)$  es el espectro de referencia respecto al que se quiere optimizar el espectro del simulador solar<sup>3</sup>:

$$\frac{I_{sc}^{top}(E_{ref}(\lambda))}{I_{sc}^{mid}(E_{ref}(\lambda))} = \frac{I_{sc}^{top}(E_{sim}(\lambda))}{I_{sc}^{mid}(E_{sim}(\lambda))} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

La ecuación 3.3 expresa que las corrientes de cortocircuito de las subcélulas superior ( $I_{sc}^{top}$ ) y media ( $I_{sc}^{mid}$ ) han de mantener la misma relación para los dos espectros. El espectro de referencia se toma de forma que sea el óptimo para la célula y que previamente ha sido calculado durante la caracterización espectrométrica descrita en el punto anterior. El espectro óptimo para la célula se considera cuando las subcélulas superior y medida generan la misma corriente y por lo tanto ninguna de las dos está limitando la corriente. En este punto la eficiencia de la célula es máxima, de ahí que se considere este espectro como el óptimo.

El espectro  $E_{sim}(\lambda)$  emitido por el simulador, que cumple la condición de la ecuación 3.4, no permite ajustar la parte correspondiente a la subcélula posterior o de germanio, sin embargo, el espectro  $E_{ref}(\lambda)$ , calculado durante la caracterización espectrométrica, sí permite ajustar esta parte del espectro. Debido a esto, los espectros  $E_{sim}(\lambda)$  y  $E_{ref}(\lambda)$  no son exactamente iguales en la zona correspondiente a la subcélula de germanio. Para encontrar el espectro óptimo en el simulador solar se utilizan lámparas con distinto número de usos (el espectro de una lámpara cambia en función del número

de veces que haya sido usada), cambiando la tensión de la lámpara y usando distintos filtros. Este proceso es muy complejo y debido a esta razón no es sencillo realizar medidas a distintos espectros de forma sistemática, como las que se realizaron durante la caracterización espectrométrica, por lo que no se cuenta con curvas I-V a distintos espectros bajo concentración. Debido a esta dificultad para ajustar el espectro del simulador, es muy complejo ajustar la parte del espectro correspondiente a la subcélula posterior o de germanio. La subcélula de germanio puede tener influencia en el factor de forma de las células pudiendo introducir pequeños errores no cuantificables en las medidas, tal y como se comenta en la sección de discusión de resultados.

En este apartado, además de resumir de forma breve el proceso de calibración seguido, se va a definir una nueva variable ( $K$ ) que será utilizada más adelante y facilita la tarea de presentación de resultados y elaboración del modelo. La nueva variable viene definida por la ecuación 3.4:

$$K_i = \frac{I_L^i(E(\lambda))}{I_L^i(E(\text{AM1.5d}))} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

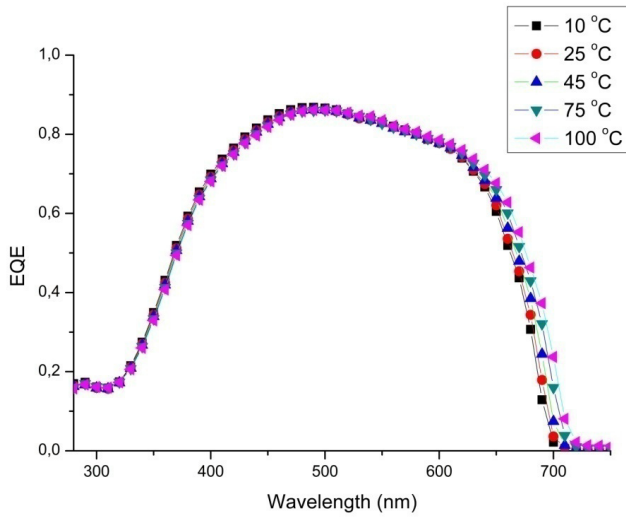
Donde la componente  $i$  representa la unión de interés de la célula de estudio e  $I_L^i$  representa la fotocorriente generada por dicha unión. Por lo tanto,  $K_i$  es el ratio entre la corriente generada bajo un espectro determinado ( $E(\lambda)$ ) y la corriente generada bajo el espectro de referencia  $E(\text{AM1.5d})$  por cada una de las uniones durante el proceso de caracterización espectrométrica, es decir, expresa la variación en la radiación recibida por cada una de las uniones respecto a un valor de referencia. Durante la caracterización espectrométrica, el ratio  $K_i$  para una de las subcélulas es mantenido constante,  $K_i = 1$ , mientras que  $K_j$  y  $K_k$  varían de forma sistemática manteniendo constante la relación  $K_j + K_k = 2$ , donde  $K_i$ ,  $K_j$  y  $K_k$  representan cada una de las subcélulas. Al final del proceso se cuenta con un conjunto de curvas I-V a espectros diferentes representadas por el vector  $(K_{\text{top}}, K_{\text{mid}}, K_{\text{bot}})$ , donde  $K_{\text{top}}$ ,  $K_{\text{mid}}$  y  $K_{\text{bot}}$  representan el ratio para las uniones o subcélulas superior, media y posterior respectivamente. Según esto, el triplete  $(1; 1; 1)$ ,  $K_{\text{top}} = K_{\text{mid}} = K_{\text{bot}} = 1$ , corresponde al espectro de referencia AM1.5d ASTM G173-03 a un sol. Este vector es una herramienta útil para representar el espectro incidente y servirá de ayuda tanto en la fase de discusión de resultados como en la fase de descripción del modelo.

### 3.2. Resultados experimentales

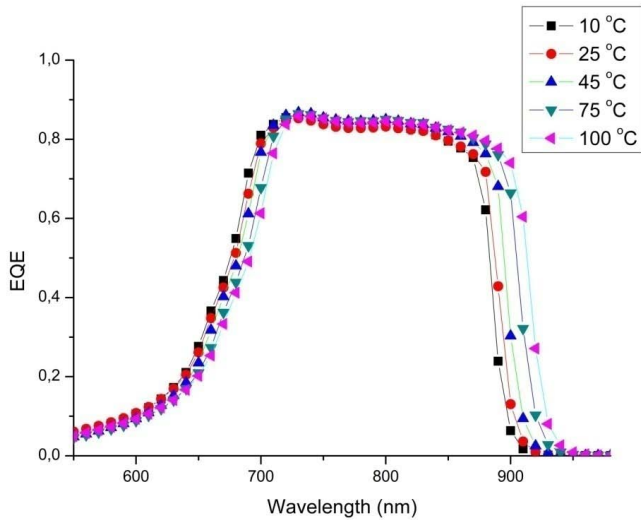
En este apartado se van a presentar los resultados experimentales obtenidos durante el procedimiento de calibración descrito en la anterior sección. En primer lugar se presentan los datos de EQE obtenidos, tras esto, los datos de la calibración espectrométrica a un sol y por último los datos a distintas concentraciones. Un vez realizado este proceso, se analizan los resultados y se presentan las principales conclusiones obtenidas de este análisis, que posteriormente permitirán introducir el modelo matemático.

#### 3.2.1. Medidas de EQE

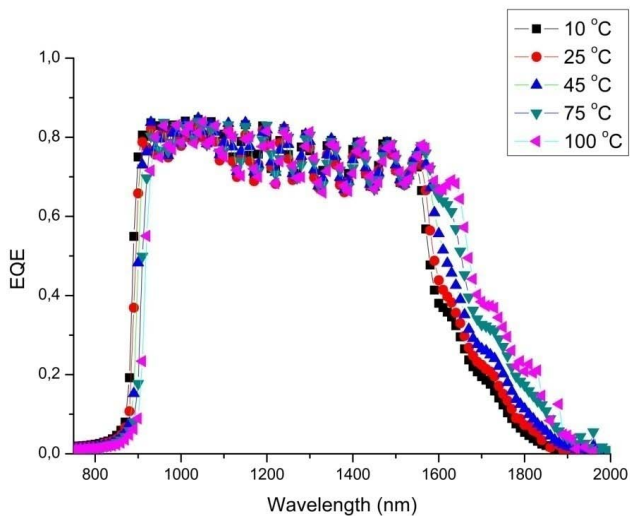
Las medidas de EQE fueron realizadas para la célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM y para la célula MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BMC. Se realizó la medida de las eficiencias cuánticas externas para cada una de las uniones de las dos células a distintas temperaturas, en concreto para temperaturas de 10 °C, 25 °C, 45 °C, 75 °C y 100 °C. Gracias a esto, al mismo tiempo que se conoce la EQE para cada una de las uniones, se estudia cómo se comporta ésta ante variaciones de temperatura. Las figuras 3.1 a 3.6 muestran los resultados obtenidos para las dos células medidas.



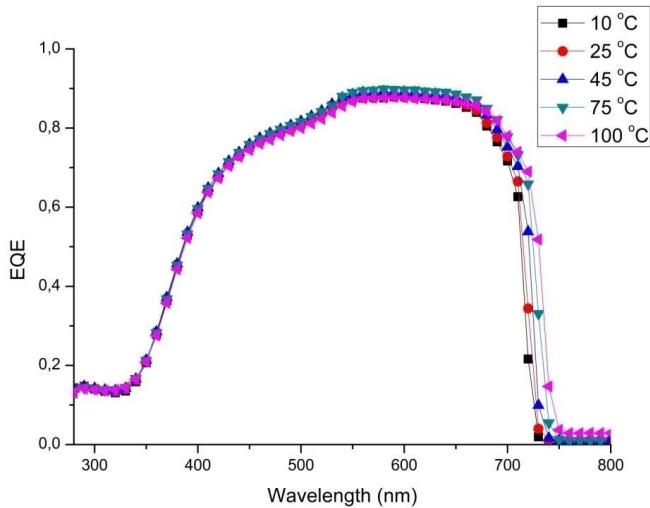
**Figura 3.1:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula superior Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P de la célula solar LM Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P/Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As/Ge 2404-6-LMM. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.



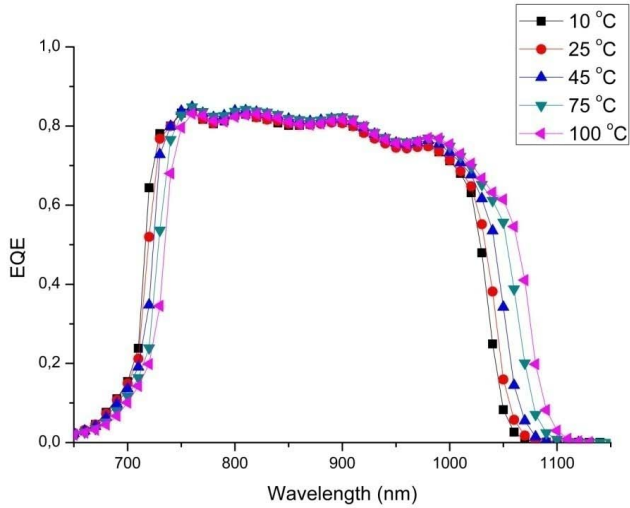
**Figura 3.2:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula media Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As de la célula solar LM Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P/Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As/Ge 2404-6-LMM. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.



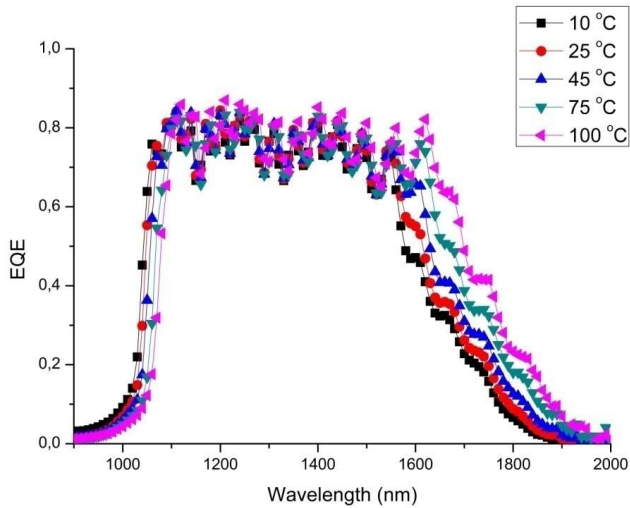
**Figura 3.3:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula posterior Ge de la célula solar LM  $\text{Ga}_{0,50}\text{In}_{0,50}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.



**Figura 3.4:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula superior  $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}$  de la célula solar MM  $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BMC. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.



**Figura 3.5:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula media  $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$  de la célula solar MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BMC. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.



**Figura 3.6:** Dependencia con la temperatura de la EQE de la subcélula posterior Ge de la célula solar MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BMC. La EQE ha sido medida a las temperaturas de 10, 25, 45, 75 y 100 °C.

Es interesante comparar los resultados de EQE para las dos células bajo estudio, para llevar a cabo esta comparación se utilizan las medidas realizadas a 25 °C. La célula

LM tiene una EQE que llega hasta longitudes de onda aproximadamente de 700 nm para la subcélula superior, 900 nm para la subcélula media y de 1900 nm para la subcélula posterior. Para la célula MM se ve como la EQE llega aproximadamente hasta 730 nm para la subcélula superior, hasta 1070 nm para la subcélula media y hasta 1900 nm para la subcélula posterior. Como se aprecia la EQE de las dos células llega hasta la misma longitud de onda, 1900 nm aproximadamente, ya que las subcélulas posteriores de ambas son iguales, las dos son células de germanio. Sin embargo, tanto para las subcélulas superior como media el comportamiento es distinto entre ambas células. En concreto, se aprecia un incremento en el rango de la EQE de la célula MM tanto en la subcélula superior, de 30 nm aproximadamente, como media, de unos 170 nm. Debido a este incremento de la respuesta de la EQE a mayores longitudes de onda de las subcélulas posterior y media, la subcélula de Ge para la célula MM ve reducido su rango en la EQE, ya que, para las longitudes de onda más cortas los fotones son absorbidos por las subcélulas que se encuentran situadas directamente encima. Para la célula LM, ésta va desde 800 a 1900 nm y para la célula MM, ésta va de 1000 nm a 1900 nm. Las células MJ están construidas de tal forma que la energía del *gap*<sup>6</sup> de las subcélulas sea mayor para la subcélula superior y luego vaya decreciendo hasta la subcélula posterior<sup>7</sup>. El hecho de que el rango de la EQE de las subcélulas superior y media de la célula MM sea superior que en la célula LM tiene como objetivo incrementar la eficiencia de la célula, ya que los fotones capturados por las subcélulas superior y media tienen más energía que los capturados por la subcélula de germanio. Esto justifica los importantes esfuerzos que se realizan en la búsqueda de nuevos materiales y en el aumento de uniones de las células MJ, con motivo de incrementar la eficiencia final de la célula para aprovechar de mejor forma la energía del espectro incidente<sup>8,9,10</sup>.

Atendiendo al comportamiento a diferentes temperaturas de la EQE de las subcélulas de las células MJ estudiadas, se puede ver como no hay ninguna diferencia en el comportamiento de éstas ante las variaciones en temperatura. Como se ha dicho antes, el rango de absorción de una célula o subcélula viene determinado por su energía del *gap*. Para entender el comportamiento de la EQE a distintas temperaturas es necesario entender como varía la energía del *gap* con la temperatura. Este comportamiento viene descrito por la ecuación de Varshini<sup>11</sup>, ecuación 3.5:

$$E_{\text{gap}}(T) = E_{\text{gap}}(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde  $E_{\text{gap}}(0)$  es la energía del *gap* a 0 K, y  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que dependen del material. La ecuación 3.5 muestra que la energía del *gap* decrece a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, a más altas temperaturas las subcélulas pueden capturar fotones con menor energía o longitudes de onda más largas. Esto explica el incremento de la EQE para longitudes de onda más largas en las subcélulas superior, media y posterior tanto para la célula LM como para la MM, tal y como se aprecia en las figuras mostradas. Al mismo tiempo, también se aprecia como el rango de EQE decrece para las subcélulas media y posterior para longitudes de onda más cortas. Esto se explica porque los fotones son absorbidos por la célula que se encuentra situada justo encima, que ve incrementada su EQE para longitudes de onda más largas, debido a la disminución de la energía del *gap* por el incremento de la temperatura.

### 3.2.2. Medidas a un sol

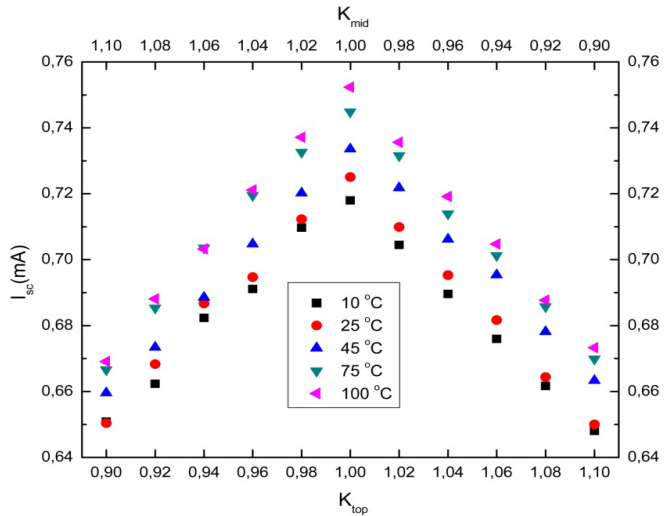
Esta sección se centra en la calibración a un sol a distintos espectros incidentes de la célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM y de la célula MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BXC.

En la primera parte de esta sección se van a presentar los resultados obtenidos de la caracterización espectrométrica variando la fotocorriente de las subcélulas superior y media a distintas temperaturas con motivo de estudiar la influencia del espectro y de la temperatura, manteniendo la fotocorriente de la subcélula posterior constante. En la segunda parte se presentan las medidas de la caracterización espectrométrica variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior únicamente para la célula  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM ya que no fue posible realizar el estudio para la célula MM. Este último estudio tiene como objetivo evaluar la posible influencia de la subcélula posterior en los parámetros eléctricos de salida de la célula.

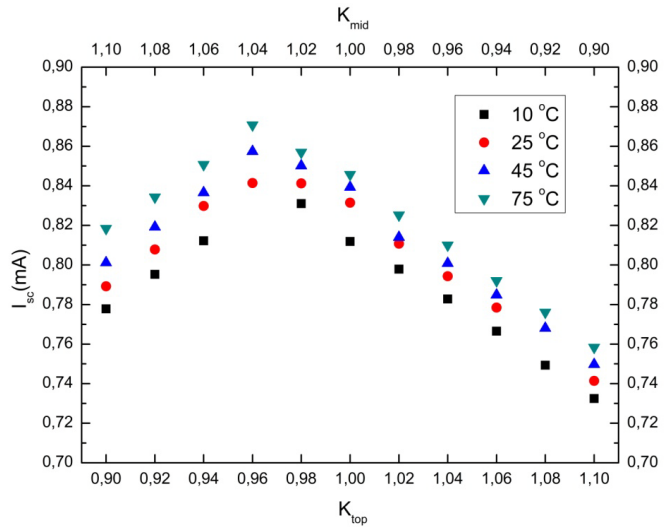
- *Caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y media a distintas temperaturas para las células LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM y MM  $Ga_{0,35}In_{0,65}P/Ga_{0,83}In_{0,17}As/Ge$  2517-2-BXC.*

Es ampliamente conocido que las células MJ están fuertemente influenciadas por el espectro incidente en mayor medida que las células de una unión<sup>12</sup>. Esto es debido al uso de distintos semiconductores, con distintas energías de *gap*, unidos en serie. La utilización de distintos tipos de semiconductores hace que la dependencia de cada uno de ellos con la temperatura pueda producir que la influencia de un mismo espectro a distintas temperaturas sea diferente<sup>13</sup>. Esto va a ser analizado, y los coeficientes de temperatura normalizados a 25 °C grados para cada uno de los parámetros estudiados, se calculados para poder cuantificar de forma precisa la posible influencia de la temperatura con los distintos espectros incidentes. Como se puede ver en las figuras 3.7 a 3.14, se han realizado medidas de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), potencia máxima ( $P_{mpp}$ ), factor de forma (FF) y tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) a distintas temperaturas y espectros. En concreto para temperaturas que van de 10 a 100 °C para la célula LM y de 10 °C a 75 °C para la célula MM. La temperatura de 100 °C no se pudo alcanzar durante la caracterización espectrométrica de la célula MM por problemas técnicos.

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran el comportamiento de la  $I_{sc}$  durante la caracterización espectrométrica para las dos células en estudio bajo las temperaturas consideradas. Como se puede ver hay un máximo en  $K_{top} = 1,00$  para la célula LM y en  $K_{top} = 0,96$  para la célula MM. Este máximo representa el punto donde las subcélulas superior y media generan la misma corriente. A ambos lados de este punto la corriente  $I_{sc}$  decrece de forma lineal debido a la limitación de corriente producida por una de las subcélulas. En la parte izquierda del máximo, la corriente de la subcélula media crece mientras que la corriente de la subcélula superior decrece, esto corresponde con un espectro rojo donde es la subcélula superior la que está limitando la corriente. En la parte derecha de este punto, la corriente de la subcélula superior crece mientras que la corriente de la subcélula media decrece. Nos encontramos ante un espectro azul donde es la subcélula media la que está limitando la corriente<sup>14</sup>. Si se analiza el comportamiento frente a la temperatura se ve como  $I_{sc}$  aumenta linealmente, de forma más o menos independiente del espectro incidente.

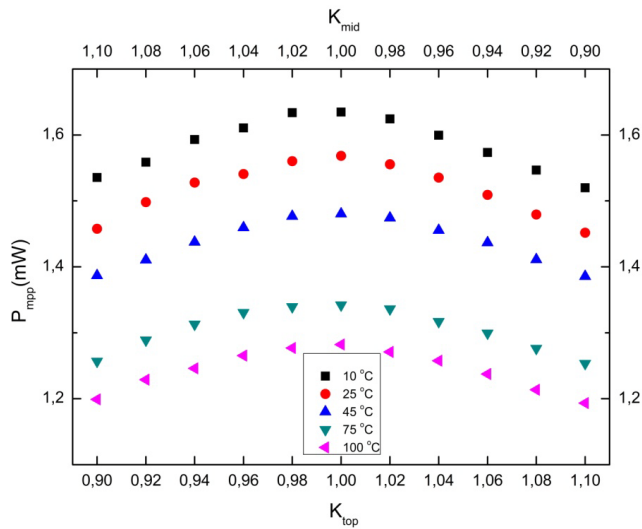


**Figura 3.7:** Dependencia con la temperatura de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de la célula LM  $Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  2404-6-LMM. La caracterización espectrométrica fue realizada a 5 temperaturas entre 10 y 100 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ .



**Figura 3.8:** Dependencia con la temperatura de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de la célula MM  $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge$  2517-2-BXC. La caracterización espectrométrica fue realizada a 4 temperaturas entre 10 y 75 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ . Los puntos  $K_{top} = 0,96$  a 10 °C y  $K_{top} = 1,08$  a 25 °C no se han tenido en cuenta por problemas en la toma de las medidas durante la caracterización espectrométrica.

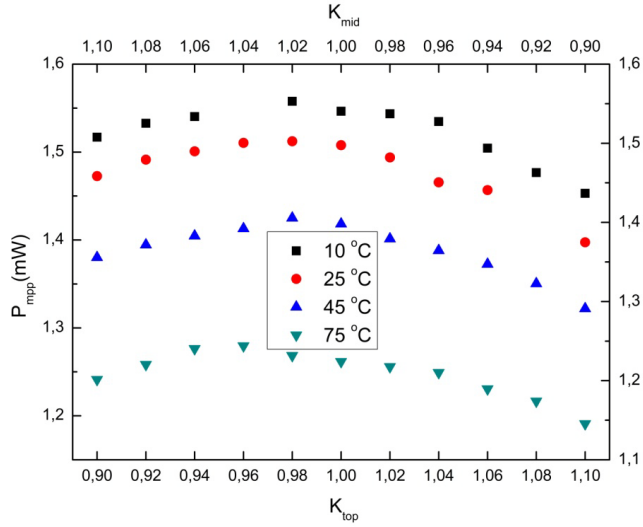
En las figuras 3.9 y 3.10 se muestra el comportamiento de  $P_{mpp}$ . Como se puede ver en las dos gráficas, la  $P_{mpp}$  muestra un comportamiento similar al de la  $I_{sc}$ , es decir, un máximo a una cierta condición espectral. El mismo comportamiento, pero inverso, se muestra para el factor de forma de las dos células, figuras 3.11 y 3.12. Es decir, hay un mínimo a una cierta condición espectral. Además, al igual que para  $I_{sc}$ , el comportamiento con la temperatura parece ser el mismo pero a la inversa. Es decir, el FF y la  $P_{mpp}$  decrecen a medida que aumenta la temperatura de forma lineal y aparentemente independiente del espectro incidente.



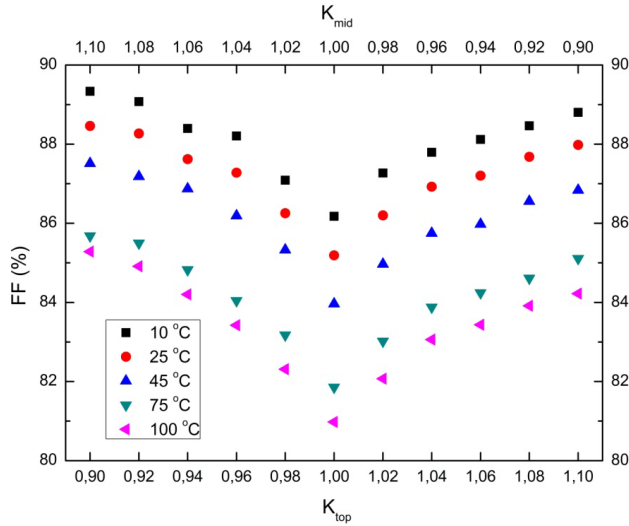
**Figura 3.9:** Dependencia con la temperatura de la potencia máxima ( $P_{mpp}$ ) de la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM. La caracterización espectrométrica fue realizada a 5 temperaturas entre 10 y 100 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ .

Los resultados obtenidos para  $V_{oc}$  difieren de los analizados hasta ahora, ya que, la  $V_{oc}$  no muestra influencia con el espectro, figuras 3.13 y 3.14. Como se ha comentado anteriormente, durante la caracterización espectrométrica, a medida que se incrementa la corriente en una de las uniones bajo estudio se reduce en el mismo ratio la corriente en la otra subcélula bajo estudio. Esto quiere decir que los pequeños cambios que se puedan producir por las variaciones de la radiación recibidas por cada una de las subcélulas se cancelan entre ellas, en primera aproximación, motivo por el que no se encuentra ningún tipo de influencia espectral para  $V_{oc}$ . Respecto a la temperatura, de

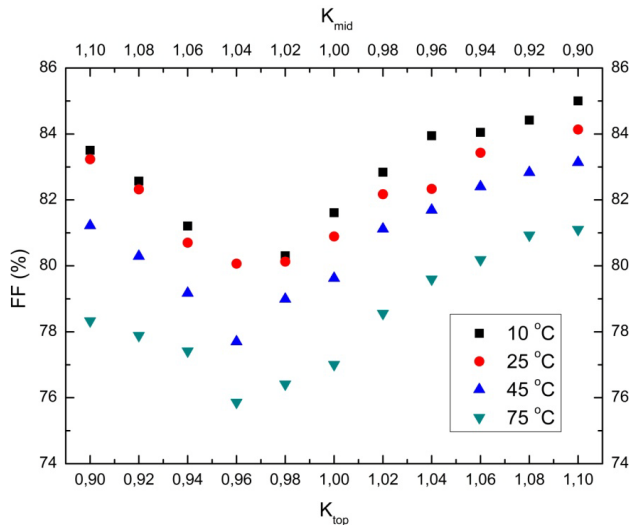
igual forma que en las células de una unión, se observa como  $V_{oc}$  decrece al mismo tiempo que la temperatura aumenta.



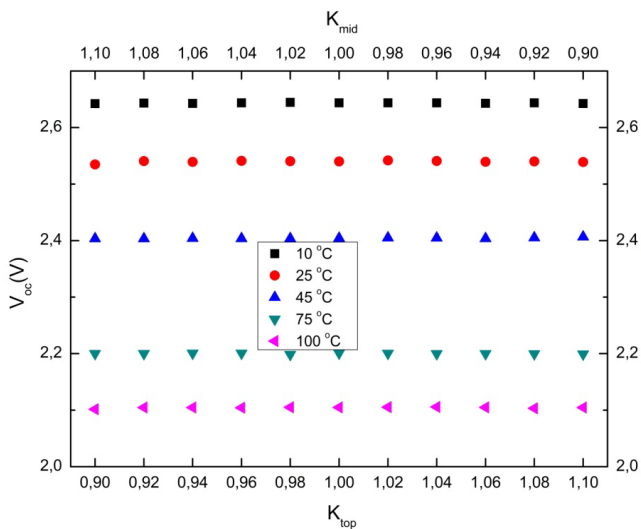
**Figura 3.10:** Dependencia con la temperatura de la potencia máxima ( $P_{mpp}$ ) de la célula MM  $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge$  2517-2-BXC. La caracterización espectrométrica fue realizada a 4 temperaturas entre 10 y 75 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ . Los puntos  $K_{top} = 0,96$  a 10 °C y  $K_{top} = 1,08$  a 25 °C no se han tenido en cuenta por problemas en la toma de las medidas durante la caracterización espectrométrica.



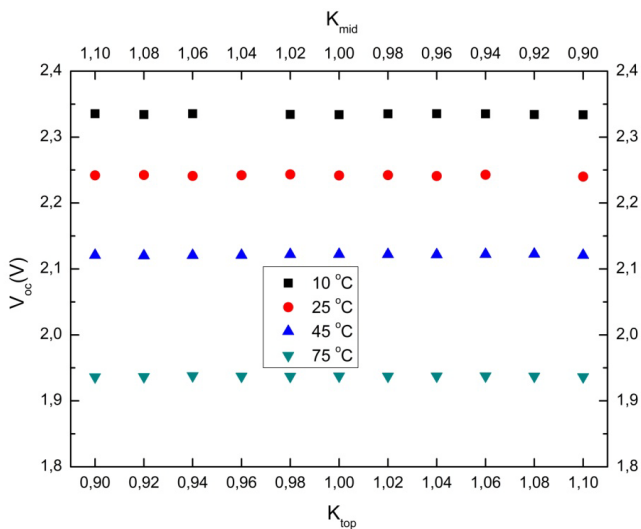
**Figura 3.11:** Dependencia con la temperatura del factor de forma (FF) de la célula LM  $Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  2404-6-LMM. La caracterización espectrométrica fue realizada a 5 temperaturas entre 10 y 100 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ .



**Figura 3.12:** Dependencia con la temperatura del factor de forma (FF) de la célula MM  $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge$  2517-2-BXC. La caracterización espectrométrica fue realizada a 4 temperaturas entre 10 y 75 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ . Los puntos  $K_{top} = 0,96$  a 10 °C y  $K_{top} = 1,08$  a 25 °C no se han tenido en cuenta por problemas en la toma de las medidas durante la caracterización espectrométrica.



**Figura 3.13:** Dependencia con la temperatura de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la célula LM  $\text{Ga}_{0,50}\text{In}_{0,50}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM. La caracterización espectrométrica fue realizada a 5 temperaturas entre 10 y 100 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ .



**Figura 3.14:** Dependencia con la temperatura de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la célula MM  $\text{Ga}_{0,35}\text{In}_{0,65}\text{P}/\text{Ga}_{0,83}\text{In}_{0,17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BXC. La caracterización espectrométrica fue realizada a 4 temperaturas entre 10 y 75 °C. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula posterior se mantiene constante en  $K_{bot} = 1,00$ . Los puntos  $K_{top} = 0,96$  a 10 °C y  $K_{top} = 1,08$  a 25 °C no se han tenido en cuenta por problemas en la toma de las medidas durante la caracterización espectrométrica.

Es interesante también comparar la influencia espectral de cada una de las células estudiadas, para de esta forma, estimar cuál muestra una mayor dependencia con ésta. En concreto se van a comparar los valores de  $I_{sc}$  y  $P_{mpp}$  para todos los rangos de temperatura de célula ( $T_{célula}$ ) estudiados, ya que estos dos parámetros se consideran claves para estimar la influencia del espectro. La tabla 3.2 muestra los valores de  $I_{sc}$  y  $P_{mpp}$  máximos y mínimos, alcanzados durante la caracterización espectrométrica para cada una de las temperaturas, así como la diferencia relativa entre éstos. Para  $I_{sc}$  se obtiene un valor promedio de la diferencia relativa del 10,4% para las dos células, lo que indica una misma influencia espectral. Para la  $P_{mpp}$ , los valores promedio son del 6,9% y de 7,1% para las células LM y MM respectivamente. Esto sugiere una misma influencia espectral para la potencia máxima de igual forma que para  $I_{sc}$ , ya que el valor obtenido es prácticamente igual. También se puede extraer como conclusión que la influencia espectral es mayor para  $I_{sc}$  que para  $P_{mpp}$ .

La ecuación 3.6 expresa la relación matemática para FF:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}} \text{ Ecuación 3.6}$$

Debido a que  $V_{oc}$  es independiente del espectro y que  $I_{sc}$  varía en mayor medida que  $P_{mpp}$  ante las variaciones espectrales, hace que el cociente de la ecuación 3.6, y por tanto el comportamiento del FF, sea decreciente cuando  $P_{mpp}$  aumenta ya que  $I_{sc}$  lo hace en mayor medida, gráficas 3.9 a 3.12.

Célula	$T_{célula}$ (°C)	$I_{sc}$ máxima (mA)	$I_{sc}$ mínima (mA)	Diferencia relativa (%)	$P_{mpp}$ máxima (mW)	$P_{mpp}$ mínima (mW)	Diferencia relativa (%)
LM	10	0,718	0,648	9,7	1,635	1,520	7,0
	25	0,725	0,650	10,4	1,568	1,452	7,4
	45	0,734	0,660	10,1	1,480	1,386	6,4
	75	0,745	0,667	10,5	1,342	1,253	6,6
	100	0,752	0,669	11,1	1,282	1,193	6,9
MM	10	0,812	0,732	9,8	1,558	1,453	6,7
	25	0,831	0,741	10,8	1,512	1,397	7,6
	45	0,839	0,750	10,7	1,425	1,322	7,2
	75	0,846	0,758	10,3	1,280	1,191	6,9

**Tabla 3.2:** Valores de  $I_{sc}$  y  $P_{mpp}$  de las células estudiadas a distintos espectros siguiendo el proceso de la caracterización espectrométrica a distintas temperaturas de célula ( $T_{célula}$ ). También se muestra la diferencia alcanzada por el valor máximo y mínimo para los distintos espectros estudiados.

Hasta ahora se ha tratado de forma cualitativa la influencia de la temperatura en los distintos parámetros. Tal y como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos es calcular los coeficientes de temperatura para cada uno de los espectros incidentes. Esto, además de ayudar a entender la influencia de la temperatura, puede tener consecuencias interesantes, ya que si se pudieran trasladar los distintos parámetros con un único coeficiente de temperatura, independiente del espectro, simplificaría la predicción de los parámetros a distintas temperaturas y espectros. Bastaría por lo tanto con calcular el coeficiente de temperatura para el espectro de referencia y éste podría ser usado para trasladar el parámetro deseado a la temperatura elegida, sin que el espectro tuviera ninguna influencia. Las tablas 3.3 y 3.4 muestran los valores de los coeficientes de temperatura de los parámetros representados en las anteriores gráficas, para las células LM y MM respectivamente. Los coeficientes de temperatura se han calculado gracias a la ecuación 3.7 donde Z representa el parámetro estudiado:

$$T_c(Z) = \left. \frac{1}{Z} \frac{\Delta Z}{\Delta T} \right|_{T=25^\circ\text{C}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

En la tabla 3.3 se ve como el coeficiente de temperatura para  $I_{sc}$  bajo el espectro de referencia es de 0,053 %/K y que este alcanza valores que van de 0,053 %/K a 0,35 %/K, con lo que sí se aprecia una importante influencia del espectro en este coeficiente. Lo mismo ocurre para el coeficiente de temperatura calculado para el FF cuyo valor ante el espectro de referencia es -0,070 %/K, variando este coeficiente entre los rangos que van desde -0,077 %/K a -0,053 %/K, por lo que nuevamente se ve como la influencia del espectro no es despreciable. Sin embargo, tanto para  $P_{mpp}$  como para  $V_{oc}$ , los coeficientes de temperatura pueden considerarse independientes del espectro incidente. Para la  $P_{mpp}$  se obtiene un valor de coeficiente de temperatura para el espectro de referencia de -0,257% y valores que van desde -0,259%/K a -0,251 %/K lo que indica que, en primera aproximación, los coeficientes de temperatura para la  $P_{mpp}$  pueden considerarse independientes respecto al espectro incidente para la célula estudiada. Para  $V_{oc}$ , al no encontrarse influencia del espectro, el coeficiente de temperatura es totalmente independiente del espectro incidente, manteniéndose prácticamente constante para el valor del espectro de referencia, -0,241%/K.

$(K_{top}; K_{mid}; K_{bot})$	$T_c (I_{sc})$	$T_c (P_{mpp})$	$T_c (FF)$	$T_c (V_{oc})$
	(%/K)	(%/K)	(%/K)	(%/K)
(0,90;1,10;1,00)	0,035%	-0,259%	-0,053%	-0,242%
(0,92;1,08;1,00)	0,044%	-0,251%	-0,054%	-0,241%
(0,94;1,06;1,00)	0,038%	-0,257%	-0,056%	-0,241%
(0,96;1,04;1,00)	0,053%	-0,253%	-0,064%	-0,241%
(0,98;1,02;1,00)	0,046%	-0,259%	-0,064%	-0,242%
(1,00;1,00;1,00)	0,053%	-0,257%	-0,070%	-0,241%
(1,02;0,98;1,00)	0,051%	-0,258%	-0,068%	-0,241%
(1,04;0,96;1,00)	0,048%	-0,255%	-0,062%	-0,241%
(1,06;0,94;1,00)	0,048%	-0,254%	-0,061%	-0,241%
(1,08;0,92;1,00)	0,047%	-0,255%	-0,060%	-0,242%
(1,10;0,90;1,00)	0,046%	-0,254%	-0,066%	-0,241%

**Tabla 3.3:** Coeficientes de temperatura para los parámetros estudiados de la célula LM Ga<sub>0,50</sub>In<sub>0,50</sub>P/Ga<sub>0,99</sub>In<sub>0,01</sub>As/Ge 2404-6-LMM. Los coeficientes de temperatura han sido normalizados a su valor a 25 °C.

En la tabla 3.4 se obtienen resultados equivalentes para la célula MM a los obtenidos para la célula LM. Se ve como el coeficiente de temperatura para  $I_{sc}$  bajo el espectro de referencia es de 0,057 %/K y que este alcanza valores que van de 0,078 %/K a 0,46 %/K, con lo que si se aprecia nuevamente una importante influencia del espectro en este coeficiente. Lo mismo ocurre con el coeficiente de temperatura calculado para el FF cuyo valor ante el espectro de referencia es -0,088 %/K, variando entre rangos que van desde -0,103 %/K a -0,063 %/K, por lo que nuevamente se ve como la influencia del espectro no es despreciable. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, se aprecia cómo tanto para la  $P_{mpp}$  como para la  $V_{oc}$  los coeficientes de temperatura podrían considerarse independientes del espectro incidente. Para la  $P_{mpp}$  se obtiene un valor para el espectro de referencia de -0,297% y valores que van desde -0,298%/K a -0,278 %/K, que, a pesar de mostrar mayor influencia que para el caso anterior, indica que en primera aproximación los coeficientes de temperatura para la  $P_{mpp}$  pueden considerarse independientes respecto al espectro incidente para la célula estudiada. Para la  $V_{oc}$ , debido a que no se encontró influencia con el espectro, el coeficiente de temperatura es totalmente independiente del espectro incidente al igual que para el caso anterior, obteniéndose un valor bajo el espectro de referencia de -0,272%/K.

Cabe destacar también, al comparar los coeficientes de temperatura de las dos células bajo estudio, como la célula metamórfica muestra una mayor influencia con la temperatura para todos los parámetros estudiados. Otra conclusión interesante es que si

se comparan los resultados obtenidos para el espectro de referencia con los típicos de una célula de silicio, se observa que los valores obtenidos no difieren mucho de los típicos que suelen obtenerse para una célula de silicio monocristalino<sup>4</sup>, 0,06 %/K para la  $I_{sc}$ , -0,15, %/K para el FF, de -0,4 a -0,5 %/K para la  $P_{mpp}$  y de -0,3 %/K para la  $V_{oc}$ , además de presentar el mismo comportamiento con la temperatura. Esto indica que el comportamiento ante la temperatura no difiere en gran medida entre las células de una unión y de multiunión, aunque si se aprecia una menor dependencia con la temperatura para las células MJ.

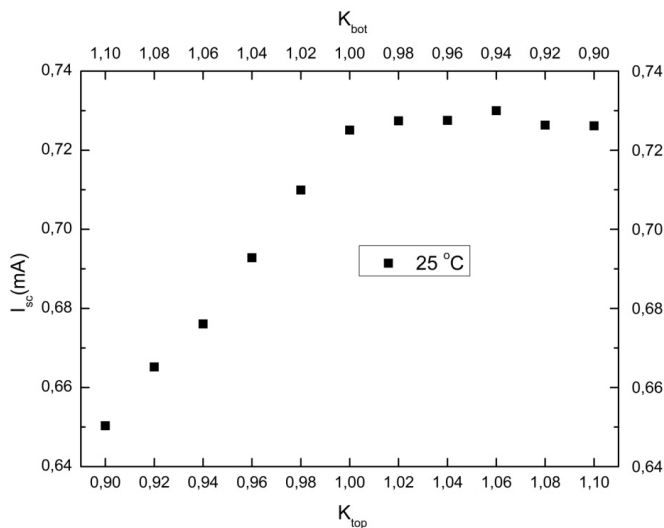
$(K_{top}; K_{mid}; K_{bot})$	$T_c (I_{sc})$	$T_c (P_{mpp})$	$T_c (FF)$	$T_c (V_{oc})$
	(%/K)	(%/K)	(%/K)	(%/K)
(0,90;1,10;1,00)	0,078%	-0,293%	-0,100%	-0,274%
(0,92;1,08;1,00)	0,073%	-0,290%	-0,093%	-0,273%
(0,94;1,06;1,00)	0,066%	-0,278%	-0,075%	-0,272%
(0,96;1,04;1,00)	0,068%	-0,282%	-0,103%	-0,272%
(0,98;1,02;1,00)	0,046%	-0,298%	-0,077%	-0,272%
(1,00;1,00;1,00)	0,057%	-0,297%	-0,088%	-0,272%
(1,02;0,98;1,00)	0,048%	-0,298%	-0,081%	-0,273%
(1,04;0,96;1,00)	0,050%	-0,297%	-0,077%	-0,272%
(1,06;0,94;1,00)	0,048%	-0,293%	-0,072%	-0,272%
(1,08;0,92;1,00)	0,055%	-0,287%	-0,063%	-0,262%
(1,10;0,90;1,00)	0,053%	-0,289%	-0,071%	-0,272%

**Tabla 3.4:** Coeficientes de temperatura para los parámetros estudiados de la célula MM  $Ga_{0,35}In_{0,65}P/Ga_{0,83}In_{0,17}As/Ge$  2517-2-BXC. Los coeficientes de temperatura han sido normalizados a su valor a 25 °C.

- *Caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y posterior a 25 °C para la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM.*

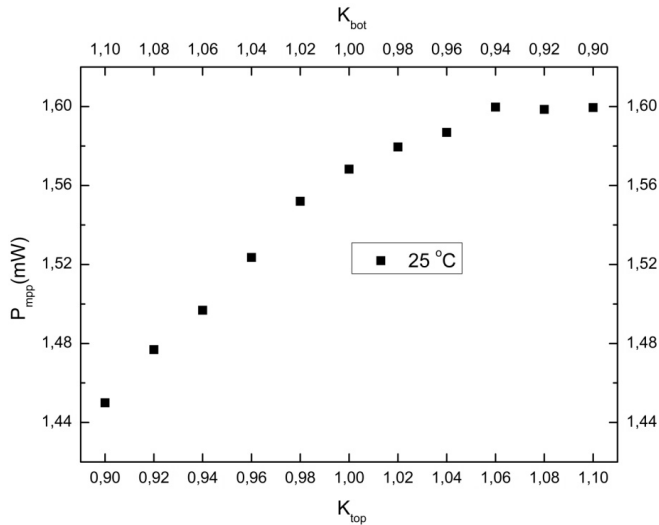
Como se ha comentado al principio de esta sección, el objetivo de este apartado es estudiar la posible influencia de la célula de germanio en los parámetros eléctricos de una célula MJ, lo que servirá más adelante para plantear y verificar el modelo matemático propuesto. El estudio se llevó a cabo para la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM a 25 °C. En estas células, la subcélula de germanio suele considerarse como una fuente de tensión constante que no influye en los parámetros de salida ante variaciones espectrales, exceptuando una pequeña influencia en el factor de forma<sup>15,16</sup>. Las figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18 muestran la posible influencia de la subcélula de germanio en la  $I_{sc}$ , la  $P_{mpp}$ , el FF y la  $V_{oc}$ .

La figura 3.15 muestra la caracterización espectrométrica para  $I_{sc}$  variando la fotocorriente en las subcélulas superior y posterior, mientras que la fotocorriente de la subcélula media se mantuvo constante en  $K_{mid} = 1,00$ . Como se puede ver  $I_{sc}$  es constante para  $K_{top} > 1,00$ . Esto significa que la subcélula media, que se mantiene constante en  $K_{mid} = 1,00$ , está limitando la corriente. La gráfica muestra como la subcélula de germanio nunca limita la corriente, incluso reduciendo la intensidad en la región de su respuesta espectral hasta  $K_{bot} = 0,90$ . Esto demuestra como la subcélula de germanio no tiene influencia relevante en la  $I_{sc}$  de una célula LM multiunión tal y como había sido comentado anteriormente. Esto se debe a que el rango de la EQE de la subcélula de germanio, ver figura 3.3, es muy ancho, lo que unido a su estrecha banda del *gap* produce que esta subcélula sea siempre excedentaria en corriente ante cualquier espectro incidente en condiciones reales de funcionamiento. Esta afirmación no puede hacerse para las células metamórficas, ya que como se vio en la figura 3.6, el rango para la EQE de la subcélula de germanio para este tipo de células se veía reducido por el incremento en el rango de las subcélulas superior y media, por lo que su fotocorriente también se ve reducida y podría en ocasiones llegar a limitar la corriente y tener una mayor influencia en la célula. Este estudio no fue posible para las células MM, con lo que no se ha podido llegar a demostrar esta afirmación.

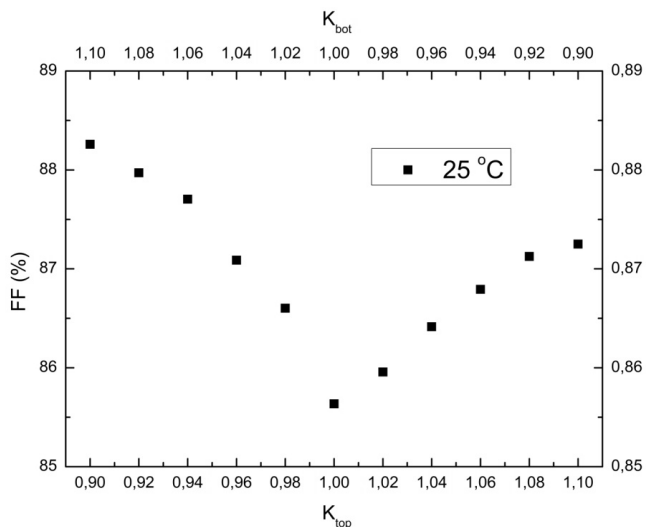


**Figura 3.15:** Caracterización espectrométrica de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03,  $1000 W/m^2$ . La fotocorriente de la subcélula media se mantiene constante en  $K_{mid} = 1,00$ .

La figura 3.16 muestra la caracterización espectrométrica para  $P_{mpp}$  siguiendo el mismo procedimiento que para la  $I_{sc}$ . Como se puede ver, a pesar de que para  $K_{top} > 1,00$  la subcélula media está limitando la corriente, se produce un pequeño incremento en la potencia. Este incremento puede ser debido a que la fotocorriente en la subcélula superior continua incrementándose lo que produce un aumento de la potencia, y también explicaría el incremento en el FF para  $K_{top} > 1,00$  mostrado en la figura 3.17. Como se muestra en dicha figura, el FF decrece hasta una determinada condición espectral,  $K_{top} = 1,00$ , y luego crece para  $K_{top} > 1,00$ , aunque en menor grado que para  $K_{top} < 1,00$ . A pesar de todo, es importante reseñar que la  $P_{mpp}$  no llega nunca a decrecer, aunque se reduzca la fotocorriente en la subcélula posterior hasta  $K_{bot} = 0,90$ , lo que indica la poca influencia que la célula de germanio tiene en la potencia de la célula MJ ante variaciones espectrales.

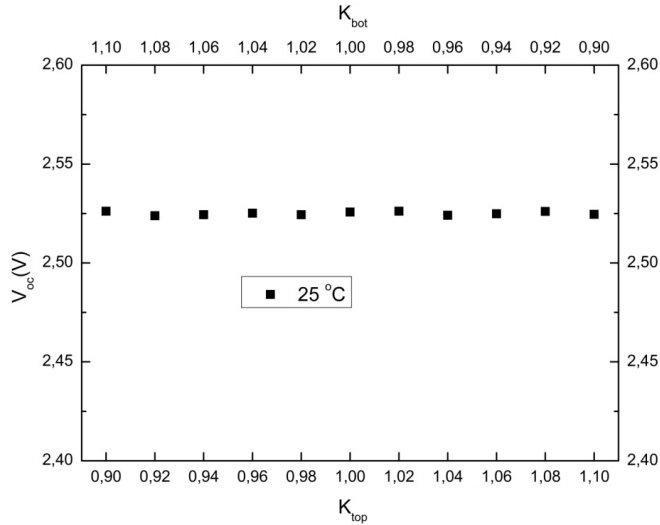


**Figura 3.16:** Caracterización espectrométrica de la potencia máxima ( $P_{mpp}$ ) de la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03,  $1000 \text{ W/m}^2$ . La fotocorriente de la subcélula media se mantiene constante en  $K_{mid} = 1,00$ .



**Figura 3.17:** Caracterización espectral del factor de forma (FF) de la célula LM Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P/Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As/Ge 2404-6-LMM variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03, 1000 W/m<sup>2</sup>. La fotocorriente de la subcélula media se mantiene constante en K<sub>mid</sub> = 1,00.

Como se vio en el punto anterior, la tensión de circuito abierto no muestra influencia con la caracterización espectral, figura 3.18, cuando se varía la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior, mientras que la subcélula media se mantiene constante en K<sub>mid</sub> = 1,00. Esto nuevamente puede ser explicado de igual forma que para los dos casos anteriores, es decir, que los pequeños cambios que se puedan producir por las variaciones de la radiación recibidas por cada una de las subcélulas se cancelan entre ellos, en primera aproximación, motivo por el que no se encuentra influencia del espectro.



**Figura 3.18:** Caracterización espectrométrica de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior. El punto 1,00 de los ejes x corresponde al espectro de referencia AM1.5d, ASTM G173-03,  $1000 \text{ W/m}^2$ . La fotocorriente de la subcélula media se mantiene constante en  $K_{mid} = 1,00$ .

### 3.2.3. Medidas a distintas concentraciones

Este apartado se centra en el estudio a distintas concentraciones de las células LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM y MM  $Ga_{0,35}In_{0,65}P/Ga_{0,83}In_{0,17}As/Ge$  2517-2-BHC. Igual que en los apartados anteriores, el estudio se realizará a distintas temperaturas para poder analizar su influencia con la concentración. Para la célula LM las medidas se realizaron para cuatro valores de temperaturas comprendidos entre 10 y 65 °C y para la célula MM para tres valores, comprendidos entre 10 y 45 °C. Por problemas durante la medida no fue posible alcanzar 65 °C para la célula MM.

Las figuras 3.19 a 3.21 muestran los parámetros típicos en el análisis de una célula MJ ante distintas concentraciones, en este caso para la célula LM. Estos parámetros son: la eficiencia, la tensión de circuito abierto y el factor de forma. Como se vio en la figura 3.7, el espectro para el que las uniones superior y media obtenían la misma corriente se cumplía en  $K_{top} = K_{mid} = 1$ , por lo que éste es considerado como el espectro óptimo de referencia. El espectro del simulador solar fue, por tanto, ajustado teniendo en cuenta esta condición, de forma que se cumpla la relación de la ecuación 3.3. Como se puede ver en la gráfica 3.19, la célula está optimizada para trabajar bajo

una concentración de entre 250 y 500 soles. Para valores mayores de esta concentración la eficiencia decrece debido a pérdidas por la resistencia en serie de la célula<sup>17,18</sup>. En cuanto a la  $V_{oc}$ , figura 3.20, los resultados muestran como ésta crece de forma lineal en escala logarítmica con la concentración (X) siguiendo la ecuación 3.8<sup>19</sup>.

$$V_{oc} = \frac{mkT}{q} \ln(X) + V_{oc}(X = 1) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

En la ecuación 3.8, m es el factor de idealidad del diodo, k es la constante de Boltzman y T es la temperatura.

Para el FF, figura 3.21, se obtienen resultados equivalentes para la eficiencia, es decir, alcanza un máximo a una determinada concentración y luego decrece debido a la resistencia en serie. Sin embargo lo hace a valores de concentración diferentes, en concreto el FF decrece a partir de una concentración de 30 soles.

Las figuras 3.22 a 3.24 muestran los mismos parámetros analizados que para la célula LM, en este caso para la MM. Como se vio en la figura 3.8 el espectro para el que las uniones superior y media obtenían la misma corriente se cumplía en  $K_{top} = 0,96$  y  $K_{mid} = 1,04$ , por lo que éste es considerado como el espectro de referencia. El espectro del simulador solar fue, por tanto, ajustado teniendo en cuenta esta condición de forma que se cumpla la relación de la ecuación 3.3 de igual forma que en el caso anterior. Para la célula MM se obtienen resultados equivalentes a los obtenidos para la célula LM. La eficiencia, figura 3.22, está optimizada para valores de concentración entre 250 y 500 soles, decreciendo para concentraciones mayores debido a pérdidas asociadas a la resistencia en serie de la célula. Respecto a la  $V_{oc}$ , figura 3.23, nuevamente se comprueba cómo puede ser expresada gracias a la ecuación 3.8, es decir, crece con la concentración de forma lineal en escala logarítmica. Para el FF, figura 3.24, se observa, que igual que para la célula LM, también decrece a partir de un cierto valor de concentración y nuevamente lo hace a un valor más bajo que para el valor de la eficiencia, entre 60 y 100 soles.

Es interesante comparar las eficiencias alcanzadas por cada una de las células. Tal como se ha dicho en el apartado 3.2.1, la célula MM aumentaba el rango de la EQE

para las subcélulas superior y medida en decremento del rango de la subcélula posterior. Esto era debido a que los fotones capturados por las subcélulas superior y media tenían más energía, por lo que la eficiencia final de la célula MJ aumentaría. Esto ha quedado demostrado en las figuras 3.19 y 3.22. La eficiencia de la célula LM a 25 °C grados y 250 soles alcanza un valor máximo de 36,5% mientras que la célula MM alcanza un máximo de 38,3%.

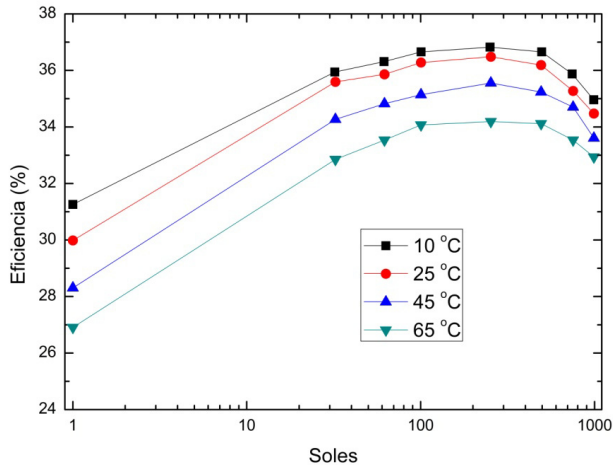
Se puede obtener otra conclusión importante si se analiza el comportamiento de  $V_{oc}$  a distintas concentraciones. Como se aprecia en las figuras 3.20 y 3.23, hay una diferencia de pendientes para valores a baja concentración respecto a alta concentración, en concreto para valores más bajos y más altos de 100 soles. Gracias a la ecuación 3.8 y a las pendientes de las rectas obtenidas a partir de las figuras 3.20 y 3.23, se pueden calcular los factores de idealidad de los diodos para baja concentración ( $X \leq 100$ ) y para alta concentración ( $X > 100$ ). En las tablas 3.5 y 3.6 se encuentran los valores calculados. Como se puede ver, los valores para bajas concentraciones difieren respecto a los de alta concentración. Para la célula LM a  $X \leq 100$  se obtiene un valor medio de  $m$  de 3,20 mientras que para una concentración mayor se obtiene un valor de 2,13. De igual forma, para la célula MM, se obtiene un valor medio para  $X \leq 100$  de 3,49 mientras que para una concentración mayor se obtiene un valor de 2,93. Es decir, el valor de  $m$  varía de forma importante con la concentración. Esto sugiere que para describir correctamente una célula MJ a alta y baja concentración debería utilizarse el modelo basado en dos diodos, de forma que un diodo describa el comportamiento de la célula a bajas concentraciones, y el otro a altas concentraciones<sup>20</sup>. Además de esto, se observa la influencia con la temperatura, ya que tanto para bajas como altas concentraciones se comprueba como el valor de  $m$  aumenta con la temperatura.

Concentración	m				Media
	T = 10 °C	T = 25 °C	T = 45 °C	T = 65 °C	
$X \leq 100$	3,08	3,08	3,24	3,40	3,20
$X > 100$	2,02	2,05	2,18	2,25	2,13

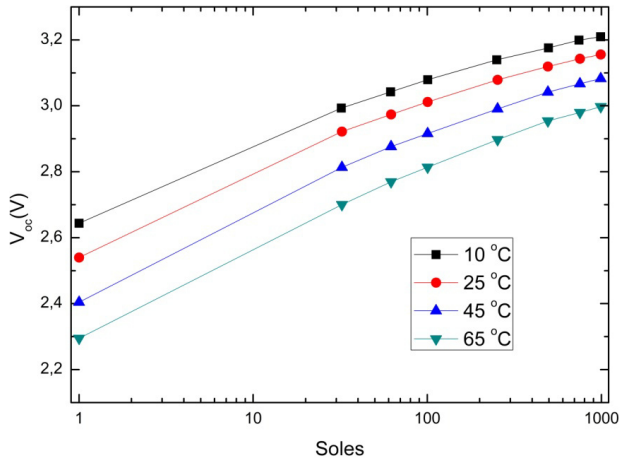
**Tabla 3.5:** Factor de idealidad del diodo para la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM para 4 temperaturas entre 10 y 65 °C. Los datos han sido calculados gracias a la ecuación 3.8 y a los valores de la figura 3.20. Como se muestra la concentración tiene una fuerte influencia en  $m$  ya que se obtienen valores medios de 3,20 y 2,13 para concentraciones por debajo y por encima de 100 respectivamente.

Concentración	m			Media
	T = 10 °C	T = 25 °C	T = 45 °C	
X ≤ 100	3,49	3,53	3,63	3,49
X > 100	2,93	2,92	2,96	2,93

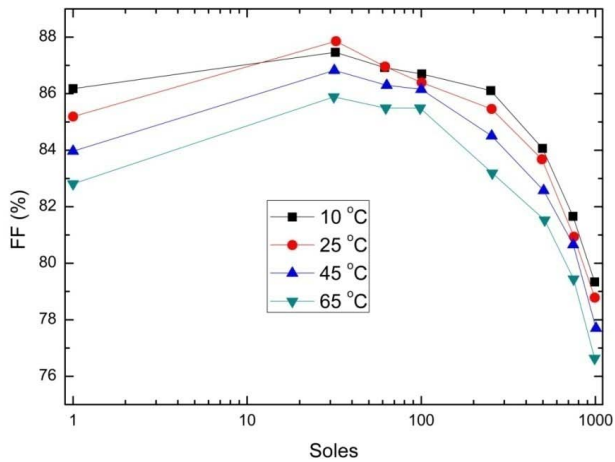
**Tabla 3.6:** Factor de idealidad del diodo para la célula MM Ga<sub>0,35</sub>In<sub>0,65</sub>P/Ga<sub>0,83</sub>In<sub>0,17</sub>As/Ge 2517-2-BXC para 3 temperaturas entre 10 y 45 °C. Los datos han sido calculados gracias a la ecuación 3.8 y a los valores de la figura 3.23. Como se muestra la concentración tiene una fuerte influencia en m ya que se obtienen valores medios de 3,49 y 2,93 para concentraciones por debajo y por encima de 100 respectivamente.



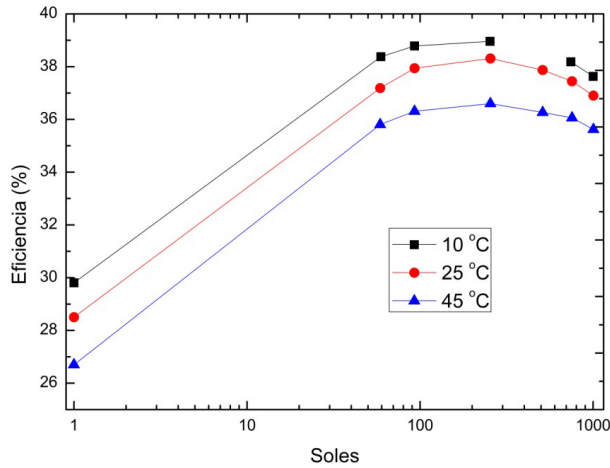
**Figura 3.19:** Eficiencia a diferentes concentraciones para la célula LM Ga<sub>0,50</sub>In<sub>0,50</sub>P/Ga<sub>0,99</sub>In<sub>0,01</sub>As/Ge 2404-6-LMM a 4 temperaturas entre 10 y 65 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueran llevadas a cabo con el simulador solar y las medidas se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente.



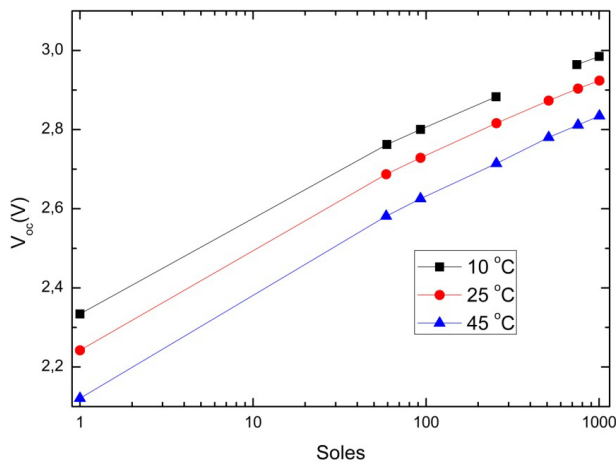
**Figura 3.20:** Tensión de circuito abierto a diferentes concentraciones para la célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM a 4 temperaturas entre 10 y 65 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueran llevadas a cabo con el simulador solar y las medidas se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente.



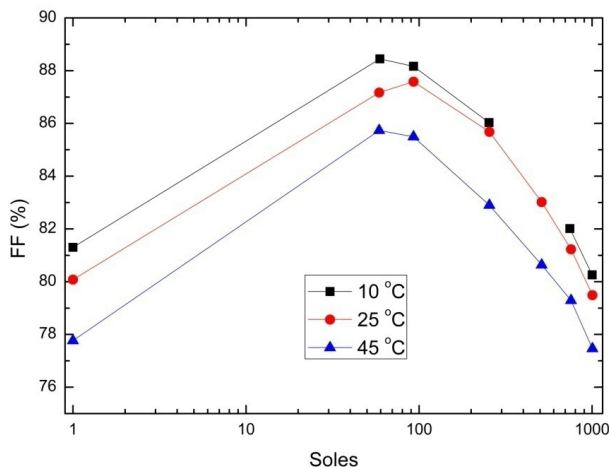
**Figura 3.21:** Factor de forma a diferentes concentraciones para la célula LM  $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}/\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}/\text{Ge}$  2404-6-LMM a 4 temperaturas entre 10 y 65 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueran llevadas a cabo con el simulador solar y las medidas se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente.



**Figura 3.22:** Eficiencia a diferentes concentraciones para la célula MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BHC a 3 temperaturas entre 10 y 45 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueron llevadas a cabo con el simulador solar y se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. El punto a una concentración de 500 a 10 °C fue suprimido por un problema durante la medida.



**Figura 3.23:** Tensión de circuito abierto a diferentes concentraciones para la célula MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BHC a 3 temperaturas entre 10 y 45 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueron llevadas a cabo con el simulador solar y se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. El punto a una concentración de 500 a 10 °C fue suprimido por un problema durante la medida.



**Figura 3.24:** Factor de forma a diferentes concentraciones para la célula MM  $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$  2517-2-BHC a 3 temperaturas entre 10 y 45 °C. Las medidas a distintas concentraciones fueran llevadas a cabo con el simulador solar y se toman de la caracterización espectrométrica a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. La concentración se determina gracias a la ecuación 3.2 tomando la corriente de cortocircuito a un sol a la temperatura y espectro correspondiente. El punto a una concentración de 500 a 10 °C fue suprimido por un problema durante la medida.

Tal y como se esperaba según estudios previos sobre la influencia de la concentración en los parámetros característicos de una célula MJ<sup>21,22</sup>: eficiencia, tensión de circuito abierto y factor de forma, los coeficientes de temperatura calculados para estos parámetros eléctricos son negativos a cualquier concentración, tablas 3.7 y 3.8. Esta influencia de la temperatura en los parámetros se apreciaba en las gráficas anteriores.

Se va a comenzar analizando los resultados obtenidos para los coeficientes de temperatura de la célula LM, tabla 3.7. Como se puede ver, el coeficiente de temperatura para la eficiencia tiene una clara tendencia decreciente con la concentración. Para la  $V_{oc}$  se observa también una clara tendencia decreciente de los coeficientes de temperatura con la concentración, sin ningún dato que rompa esta tendencia. Sin embargo, para el FF se comprueba como los coeficientes a alta concentración son menores que a un sol, aunque éstos varían con la concentración de forma aparentemente aleatoria sin observarse ninguna tendencia en concreto.

La tabla 3.8 muestra los mismos resultados estudiados para la célula MM que para la célula LM. Como se ve, los resultados son prácticamente idénticos. El coeficiente de temperatura para la eficiencia tiene una tendencia decreciente con la concentración. Para  $V_{oc}$  se observa una tendencia decreciente de los coeficientes de temperatura de igual forma que para el caso de la célula LM, es decir, sin ningún valor que rompa esta tendencia decreciente. Para el FF en cambio se aprecia cómo, en este caso, llega a haber un coeficiente que es claramente mayor que el obtenido para un sol, en concreto a una concentración de 500, de igual forma que para la célula anterior, no se aprecia ningún tipo de tendencia en el comportamiento de los coeficientes.

Concentración	$T_c$ (Eficiencia) (%/K)	$T_c$ ( $V_{oc}$ ) (%/K)	$T_c$ (FF) (%/K)
1	-0,257	-0,241	-0,0699
30	-0,163	-0,183	-0,0367
60	-0,142	-0,167	-0,0315
100	-0,134	-0,160	-0,0243
250	-0,132	-0,143	-0,0618
500	-0,129	-0,129	-0,0568
750	-0,117	-0,126	-0,0464
1000	-0,109	-0,122	-0,0633

**Tabla 3.7:** Coeficientes de temperatura para los parámetros estudiados de la célula LM  $Ga_{0,50}In_{0,50}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As/Ge$  2404-6-LMM a distintas concentraciones. Los coeficientes de temperatura han sido normalizados a su valor a 25 °C.

Concentración	$T_c$ (Eficiencia) (%/K)	$T_c$ ( $V_{oc}$ ) (%/K)	$T_c$ (FF) (%/K)
1	-0,305	-0,272	-0,103
60	-0,197	-0,193	-0,088
100	-0,188	-0,184	-0,089
250	-0,179	-0,172	-0,108
500	-0,172	-0,162	-0,143
750	-0,163	-0,151	-0,097
1000	-0,157	-0,147	-0,102

**Tabla 3.8:** Coeficientes de temperatura para los parámetros estudiados de la célula MM  $Ga_{0,35}In_{0,65}P/Ga_{0,83}In_{0,17}As/Ge$  2517-2-BHC a distintas concentraciones. Los coeficientes de temperatura han sido normalizados a su valor a 25 °C.

A continuación se va a realizar un estudio teórico para explicar los datos de los coeficientes de temperatura obtenidos y analizar las causas de las posibles diferencias de los valores experimentales.

Se comienza analizando el coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto para una célula con la concentración, que puede ser descrito por la ecuación<sup>21</sup>:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{V_{gap}(T) - V_{oc} + \left[3 + \frac{\Gamma}{2}\right] \frac{kT}{q}}{T} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde  $V_{gap}(T)$  es el voltaje del *gap* de la célula que viene expresado como  $E_{gap}/q$  y  $\Gamma$  es un término que incluye la dependencia con la temperatura de  $I_{sc}$  y de  $V_{gap}$ . En la ecuación 3.9 todos los términos dependen únicamente de la temperatura excepto  $V_{oc}$  que depende de la concentración siguiendo la ecuación 3.8. Como el numerador de la ecuación 3.9 es positivo, ya que el coeficiente de temperatura para  $V_{oc}$  es negativo, al aumentar la tensión de circuito abierto con la radiación el numerador se hace más pequeño, ya que la  $V_{oc}$  está restando. Es decir, para una temperatura dada el coeficiente de temperatura para la  $V_{oc}$  debería hacerse más pequeño a medida que aumenta la radiación. Como se vio en las tablas 3.7 y 3.8 esto fue lo obtenido en ambos casos.

Se analiza ahora el coeficiente de temperatura del FF. Suponiendo que la resistencia en serie ( $R_s$ ) y la resistencia en paralelo ( $R_p$ ) no dependen de la temperatura, lo cual es considerado por distintos autores como una buena aproximación para células de silicio<sup>23</sup> y que cobra más sentido para las células MJ, ya que como se ha demostrado anteriormente la influencia de la temperatura en éstas era menor, y para un factor de idealidad del diodo de 1, se puede expresar la variación del factor de forma de una célula con la concentración con la ecuación 3.10<sup>21</sup>. El factor de forma con las aproximaciones anteriormente nombradas se denota por  $FF_0$  y se denomina factor de forma de una célula ideal:

$$\frac{1}{FF_0} \frac{dFF_0}{dT} = \frac{(1-FF_0)}{FF_0} \left[ \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{1}{T} \right] \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Según la ecuación 3.10 el valor del coeficiente de temperatura del factor de forma también debería decrecer con la radiación. Si nos fijamos en el paréntesis de la ecuación 3.10, vemos como el hecho de que el coeficiente de temperatura para  $V_{oc}$  disminuya con la radiación, hace que este término disminuya al incrementarse la radiación o concentración para una temperatura dada. De igual forma, la ecuación 3.10 también expresa de forma teórica que el coeficiente para el FF es menor que para  $V_{oc}$  debido al término  $-1/T$  dentro del paréntesis<sup>21</sup>. Ésto queda demostrado

experimentalmente en las tablas 3.7 y 3.8. Para que esta afirmación sea cierta hay que considerar que el factor de idealidad sea 1 y como se vio, según los cálculos presentados en las tablas 3.5 y 3.6 esto no es cierto. Sin embargo, el hecho de que el factor de forma no sea 1 debería únicamente variar el coeficiente de temperatura cuantitativamente, pero no en cuanto a su tendencia, es decir, debería observarse una tendencia determinada y no los datos aparentemente aleatorios observados. Respecto a  $R_s$  y  $R_p$ , suponiendo que la aproximación realizada no fuera válida y alguno de estos dos parámetros tuviera una dependencia no despreciable con la temperatura, deberían en principio tener una influencia que produjese una determinada tendencia en el FF y no los resultados aparentemente aleatorios que se observan. Una posible explicación para estos valores podrían venir por el efecto que la célula de germanio tiene en el factor de forma. Como se comentó en la sección 3.1, el simulador solar no es capaz de controlar la intensidad en el rango de la subcélula de germanio, esto puede producir cambios en el FF, de manera que los resultados parezcan aleatorios dependiendo del espectro incidente que recibe la subcélula de germanio en cada medida. Además, de ser esto cierto, se espera que esta influencia sea mayor en la célula MM que en la LM, debido a la disminución en el rango de la EQE de la subcélula de germanio en la célula MM. Como se ha visto anteriormente, los resultados experimentales obtenidos para la célula MM son aún más aleatorios que para la LM, donde se llega a tener coeficientes de temperatura más altos para el FF, a una concentración de 250 y 500 que a un sol, lo parece estar de acuerdo con esta idea. Por lo tanto, se ha considerado que el motivo principal de no encontrar una tendencia clara decreciente con la temperatura es debida a la influencia de la subcélula de germanio durante el proceso de medida.

Por último se analiza el coeficiente de temperatura de la eficiencia. Si se despeja  $P_{mpp}$  de la ecuación 3.6 y se deriva respecto a la temperatura, el coeficiente de temperatura para la  $P_{mpp}$  puede ser expresado según la ecuación:

$$\frac{1}{P_{mpp}} \frac{dP_{mpp}}{dT} = \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Este coeficiente de temperatura para potencia puede ayudar a entender los resultados obtenidos para la eficiencia en concentración ya que, la potencia y la eficiencia ( $\eta$ ) están relacionadas por la ecuación:

$$\eta = \frac{P_{\text{mpp}}(\text{W})}{\text{DNI}\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \cdot A(\text{m}^2)} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde DNI es la radiación directa incidente y A el área de la célula. Combinando las ecuaciones 3.11 y 3.12, es decir, sustituyendo en el término de la izquierda la potencia máxima por la eficiencia, se llega a la ecuación 3.13, al ser DNI y A constantes con la temperatura. Esta ecuación puede utilizarse para explicar el comportamiento de la eficiencia con la concentración:

$$\frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dT} = \frac{1}{V_{\text{oc}}} \frac{dV_{\text{oc}}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{\text{sc}}} \frac{dI_{\text{sc}}}{dT} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Tal como ha quedado demostrado anteriormente, el coeficiente de temperatura para  $V_{\text{oc}}$  es mayor que el de FF e  $I_{\text{sc}}$  y por tanto, es el que tiene un mayor efecto sobre el coeficiente de temperatura de la eficiencia. Esto significa que el coeficiente de temperatura para  $\eta$  debería ser decreciente con la radiación y del mismo orden que el obtenido para  $V_{\text{oc}}$ , como efectivamente se pone de manifiesto en las tablas 3.7 y 3.8.

### 3.3. Modelo matemático propuesto

En esta sección se va a plantear un modelo matemático, basado en medidas experimentales, que sea capaz de predecir la potencia máxima de salida de una célula MJ y que no necesite parámetros inherentes de la célula difíciles de obtener. Como se comentó en el capítulo del estado del arte existen distintos modelos destinados a la caracterización y modelado de células MJ<sup>24,25,26</sup>. Sin embargo, estos modelos presentan ciertas desventajas que a continuación se van a detallar.

El primero de ellos, realizado por el Fraunhofer ISE<sup>24</sup>, se basa en la utilización del modelo de dos diodos para la caracterización de cada unión, de forma que se pueda cuantificar la influencia espectral de una célula MJ, y en medidas obtenidas gracias a la caracterización espectrométrica. Una de las desventajas del método es que para la obtención de los parámetros necesarios del modelo de dos diodos para cada unión se utilizan complejos métodos matemáticos que no son fáciles de implementar. Además como se comenta en el mismo artículo, los parámetros de ajuste, obtenidos para el

modelo durante el proceso de cálculo, no son reales ya que se obtienen múltiples soluciones que dan los mismos resultados. En principio esto no sería una desventaja si el método fuera capaz de predecir otros valores de espectro distintos a los utilizados durante el proceso de ajuste. Sin embargo, esto no fue demostrado, lo que pone en duda que el método sea de utilidad. Otra desventaja es que el modelo no introduce ningún tipo de corrección con la temperatura y la irradiancia.

El segundo método<sup>25</sup> se basa en el cálculo de  $I_{sc}$  a una concentración determinada, gracias a la respuesta espectral de las subcélulas que componen la célula MJ, a distintas temperaturas para corregir la  $I_{sc}$  con el espectro incidente. El principal problema de este método es que no introduce correcciones en el factor de forma para las variaciones espectrales ni para la intensidad, es decir, sólo introduce correcciones del FF en temperatura. Esto, tal y como se ha demostrado en la sección anterior y como el propio autor comenta en el artículo, introduce errores, ya que el factor de forma está fuertemente influenciado por el espectro y la intensidad.

El último método<sup>26</sup> de los expuestos en el capítulo 2 está basado en el modelo de un solo diodo. Este modelo define un complejo sistema de ecuaciones que han de ser ajustadas con un completo conjunto de medidas experimentales, que no son fáciles de realizar. Este método es el más completo de todos al introducir correcciones con la radiación, la temperatura y el espectro. Sin embargo, debido al complejo sistema de ecuaciones que se han de utilizar y ajustar y que además se requieren parámetros inherentes de la célula MJ a modelar, los cuales son difíciles de obtener, hacen que éste sea difícil de implementar.

Además de los métodos comentados anteriormente existen otros métodos destinados a modelar el comportamiento de una célula<sup>27,28,29,30,31</sup>. Sin embargo, estos métodos, basados en física de semiconductores, en programas de simulación y en herramientas computacionales y que además necesitan parámetros inherentes del material a modelar, están orientados al diseño y optimización de células MJ y no a la predicción de los parámetros I-V o la energía producida por una célula MJ bajo condiciones reales de funcionamiento.

El objetivo de este estudio es encontrar un modelo matemático, basado en medidas experimentales, que pueda predecir la potencia máxima de salida de una célula MJ y no necesite parámetros inherentes de la célula difíciles de obtener, de forma que se eviten algunos de los inconvenientes mencionados en los métodos anteriores. El modelo matemático propuesto estudia la posibilidad de predecir la potencia de una célula LM  $\text{Ga}_{0,50}\text{In}_{0,50}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}/\text{Ge}$  a un sol, a distintas condiciones espectrales y de temperatura. Dicha célula, usada de forma mayoritaria por los actuales módulos CPV, ha mostrado la mejor relación entre su eficiencia teórica y la real, de las distintas configuraciones estudiadas en la arquitectura de células MJ, motivo por lo que será objeto del modelo. El modelo puede tener distintas aplicaciones y ser útil para diferentes propósitos, por ejemplo, ayudar al diseño de una célula MJ o a predecir la energía generada en función de los parámetros que influyen en su funcionamiento, como serían las condiciones atmosféricas de un emplazamiento en particular. Puede servir también para la optimización de una célula MJ, ya que ayudaría a comprender la influencia de los parámetros atmosféricos en este tipo de células, poniendo de manifiesto bajo qué condiciones la célula se comporta mejor. Esto va a permitir obtener conclusiones claves que permitan optimizar su diseño con el objetivo de maximizar su eficiencia ante las variaciones atmosféricas en las que se verían obligadas a trabajar. Además, como se ha dicho con anterioridad, el objetivo también es encontrar un modelo basado en relaciones matemáticas poco complejas y que no necesiten parámetros inherentes de las células, parámetros que son difíciles de obtener excepto para las compañías fabricantes de células, de manera que su aplicación sea sencilla. El fin último, por lo tanto, consistirá en encontrar una relación óptima entre precisión y sencillez.

### 3.3.1. Introducción del modelo

Como ya se ha comentado, la subcélula de germanio es comúnmente considerada como una fuente de tensión que nunca limita la corriente bajo condiciones reales de funcionamiento para las células LM. La figura 3.15 coincide con esta afirmación,  $K_{\text{bot}}$  se varió de 1,10 a 0,90 al mismo tiempo que  $K_{\text{top}}$  lo hacía de 0,90 a 1,10, mientras  $K_{\text{mid}}$  se mantuvo constante en 1,00 y no se encontró influencia de la subcélula de germanio en la corriente de cortocircuito. Por lo tanto, la  $I_{\text{sc}}$  de la célula MJ puede ser descrita siguiendo la ecuación:

$$I_{sc} = \min[I_{sc}^{top}, I_{sc}^{mid}] \text{ Ecuación 3.14}$$

De igual forma, la célula de germanio no muestra una importante influencia en el resto de los parámetros ante variaciones espectrales, a excepción de una ligera influencia en FF como ya se ha discutido. Por lo tanto, el modelo matemático propuesto estudia la posibilidad de predecir el punto de máxima potencia de una célula LM suprimiendo la subcélula de germanio y reduciendo el sistema a dos subcélulas que llamaremos subcélulas equivalentes 1 y 2.

Las características I-V de una célula de una unión pueden ser descritas por la ecuación 3.15:

$$I(V) = I_L - I_0 \left( \exp^{\frac{q(V+IR_s)}{mkT}} - 1 \right) \text{ Ecuación 3.15}$$

Donde  $I_L$  es la fotocorriente generada a  $V = 0$  e  $I_0$  es la corriente de saturación del diodo.

En la ecuación 3.15 se puede considerar que  $\exp^{\frac{q(V+IR_s)}{mkT}} \gg 1$ . Al mismo tiempo, en condición de corriente de cortocircuito ( $V = 0$ ), se puede considerar que  $I_L = I_{sc}$ <sup>32</sup>. Debido a esto, la ecuación 3.14 se puede expresar según la ecuación:

$$I(V) = I_{sc} - I_0 \left( \exp^{\frac{q(V+IR_s)}{mkT}} \right) \text{ Ecuación 3.16}$$

Llevando la ecuación 3.16 a condición de circuito abierto ( $I = 0$  y  $V = V_{oc}$ ),  $I_0$  puede expresarse de la siguiente forma:

$$I_0 = I_{sc} \exp \left[ \frac{-qV_{oc}}{mkT} \right] \text{ Ecuación 3.17}$$

Para nuestra propuesta de modelo, se definen dos subcélulas, subcélula equivalente 1 y subcélula equivalente 2, siendo la corriente de las subcélulas equivalentes 1 y 2 la misma que la de las subcélulas superior y media respectivamente. De esta forma, la

corriente de cortocircuito viene determinada por estas dos subcélulas. Esto se había demostrado con anterioridad llegando a la conclusión de que la subcélula de germanio nunca limita la corriente, ecuación 3.14. Por lo tanto la corriente de la célula MJ y de cada una de las subcélulas equivalentes viene descrita por las ecuaciones:

$$I_{sc}^1 = I_{sc}^{top} \text{ Ecuación 3.18}$$

$$I_{sc}^2 = I_{sc}^{mid} \text{ Ecuación 3.19}$$

Considerando un modelo basado en dos células, el voltaje total de la célula MJ puede obtenerse a partir de la ecuación 3.14, expresado como sigue:

$$V_j = \frac{kT}{q} \sum_{i=1}^2 \ln \left[ \frac{I_{sc}^i - I_j + I_0^i}{I_0^i} \right] - I_j R_s \text{ Ecuación 3.20}$$

Donde la componente  $i$  representa la subcélula equivalente considerada y la componente  $j$  representa cada par de puntos de la curva I-V, de forma que ésta viene definida por el vector  $(V_j, I_j)$ . El rango para  $I_j$  en la ecuación 3.20 va desde la máxima corriente de la célula multiunión, definida por la ecuación 3.14, hasta cero.

Teniendo en cuenta que nuestra célula viene descrita por dos subcélulas, las corrientes de saturación de cada una de estas dos subcélulas equivalentes puede ser expresada siguiendo la ecuación 3.21:

$$I_0^i = I_{sc}^i \exp \left[ \frac{qV_{oc}^i}{mKT} \right] \text{ Ecuación 3.21}$$

Las tensiones de circuito abierto de cada subcélula equivalente  $(V_{oc}^1, V_{oc}^2)$  van a ser consideradas parámetros de ajuste y deben cumplir la condición definida por la ecuación 3.22, de forma que las subcélulas equivalentes sumen la tensión de circuito abierto total de la célula MJ. Es decir, la tensión aportada por la subcélula de germanio está repartida entre la tensión de circuito abierto de las subcélulas equivalentes:

$$V_{oc} = V_{oc}^1 + V_{oc}^2 \text{ Ecuación 3.22}$$

Aunque el objetivo de esta parte es predecir únicamente la  $P_{mpp}$  total de la célula MJ, es interesante destacar que, debido a la considerablemente menor tensión de circuito abierto de la subcélula de germanio respecto a las demás<sup>25</sup>, el modelo no debería tampoco introducir grandes errores en la predicción de la  $V_{oc}$ , al mismo tiempo que se justificaría la aproximación realizada por la ecuación 3.22.

La ecuación 3.8 explicaba el comportamiento de  $V_{oc}$  ante la variación de la radiación incidente en una célula MJ. Siguiendo esta ecuación, la  $V_{oc}$  de cada subcélula equivalente viene dada por las ecuaciones:

$$V_{oc}^1(K_{top}) = \frac{mkT}{q} \cdot \ln(K_{top}) + V_{oc}^1(K_{top} = 1) \quad \text{Ecuación 3.23}$$

$$V_{oc}^2(K_{mid}) = \frac{mkT}{q} \cdot \ln(K_{mid}) + V_{oc}^2(K_{mid} = 1) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Como se había dicho,  $K_i$  representa las variaciones en la radiación recibida por cada una de las uniones, de igual forma que  $X$ , ecuación 3.2, representa la variación en la radiación que recibe la célula MJ. Debido a esto, y a que la radiación que recibe cada subcélula equivalente es igual a la recibida por la subcélula superior y media respectivamente, ecuaciones 3.18 y 3.19, lleva a que las variaciones de  $V_{oc}$  para cada subcélula equivalente vengan igualmente dadas por la radiación que reciben estas uniones.

Hasta ahora no se ha introducido corrección a la posible influencia de la resistencia en paralelo ( $R_p$ ). Una posible corrección de cada punto  $j$  del vector  $(V_j, I_j)$  de la curva I-V con la resistencia en paralelo vendría dada por la ecuación 3.25. Por lo tanto, la curva I-V corregida viene definida por el vector  $(V_j, I_j^{Rp})$ :

$$I_j^{Rp} = I_j - \left[ \frac{V_j + I_j R_s}{R_p} \right] \quad \text{Ecuación 3.25}$$

La tabla 3.9 recoge un resumen de los parámetros necesarios por el modelo propuesto: parámetros de entrada del modelo, parámetros de ajuste del modelo y sus valores. Como parámetros de entrada para ajustar el modelo se necesita: la corriente de cortocircuito de las subcélulas superior y media a distintos espectros, la  $P_{mpp}$  y la  $V_{oc}$  totales de la célula MJ a dichos espectros. Como se ha comentado en la sección anterior,

sólo se cuenta con medidas para la caracterización espectrométrica a un sol por lo que el modelo será ajustado únicamente con estos parámetros. Como parámetros de ajuste del modelo se consideran: la resistencia en serie, la resistencia en paralelo, el factor de idealidad y la  $V_{oc}$  de cada una de las subcélulas equivalentes, siguiendo la condición expresada por la ecuación 3.22, y las variaciones con el espectro expresadas por las ecuaciones 3.23 y 3.24. De forma que, una vez conocidos los valores de los parámetros de ajuste del modelo propuesto, sólo es necesario conocer los valores de la  $I_{sc}$  de las subcélulas superior y media para predecir los valores de la  $P_{mpp}$ .

Parámetros de entrada del modelo	Parámetros de ajuste	Valores de los parámetros de ajuste
$I_{sc}^{top}$	$R_s$	0,012 $\Omega$
$I_{sc}^{mid}$	$R_p$	300 k $\Omega$
$V_{oc}$	m	1,94
$P_{mpp}$	$V_{oc}^1$ and $V_{oc}^2$	1,40 and 1,14 V

**Tabla 3.9:** Resumen de los parámetros necesarios por el modelo propuesto. También se muestran los valores de ajuste del modelo. Los valores de  $V_{oc}$  mostrados corresponden con los calculados bajo el espectro de referencia. Los parámetros de ajuste no representan una célula real y han de ser considerados únicamente como parámetros del modelo matemático propuesto.

Los parámetros de ajuste fueron calculados gracias a un programa realizado en Matlab<sup>TM</sup> para minimizar el error entre los valores de  $P_{mpp}$  medidos y los estimados con el modelo propuesto. El modelo fue ajustado usando los datos de las curvas I-V de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y medida a 25 °C. El resto de espectros de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y posterior y los valores a distintas temperaturas de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y medida serán usados en el próximo apartado para evaluar el modelo.

La tabla 3.10 muestra los valores de  $P_{mpp}$  obtenidos con el modelo propuesto y los medidos. Para comprobar el correcto ajuste del modelo se ha calculado el error relativo (ER) entre ambos valores, ecuación 3.26:

$$ER(\%) = \frac{(P_{mpp\text{medida}} - P_{mpp\text{calculada}})}{P_{mpp\text{medida}}} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Como se puede ver, el máximo error relativo encontrado es de 0,77% siendo el valor medio de los errores de 0,00%, lo que demuestra el adecuado ajuste del modelo. Además, como se ve, el error relativo promedio está centrado en cero. Esto sugiere que

el ajuste del modelo no está estimando la potencia por encima ni por debajo de su valor real.

$(K_{top}; K_{mid}; K_{bot})$	$P_{mpp}$ medidos (mW)	$P_{mpp}$ modelados (mW)	Error relativo (%)
(0,90;1,10;1,00)	1,458	1,461	-0,23
(0,92;1,08;1,00)	1,498	1,495	0,21
(0,94;1,06;1,00)	1,528	1,516	0,77
(0,96;1,04;1,00)	1,541	1,540	0,04
(0,98;1,02;1,00)	1,560	1,559	0,08
(1,00;1,00;1,00)	1,568	1,567	0,10
(1,02;0,98;1,00)	1,555	1,557	-0,11
(1,04;0,96;1,00)	1,535	1,537	-0,10
(1,06;0,94;1,00)	1,509	1,512	-0,18
(1,08;0,92;1,00)	1,479	1,484	-0,33
(1,10;0,90;1,00)	1,452	1,455	-0,23

**Tabla 3.10:** Valores medidos y obtenidos con el modelo propuesto para  $P_{mpp}$  para evaluar el correcto ajuste del modelo. El modelo fue ajustado con los datos de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y media a 25 °C.

### 3.3.2. Resultados del modelo

Tal y como ya se ha comentado, el modelo fue ajustado usando los datos de las curvas I-V de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y medida a 25 °C. En este apartado se muestran los resultados obtenidos con el modelo para distintas temperaturas y se comparan con los datos provenientes de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y medida a distintas temperaturas. También se muestran los resultados obtenidos por el modelo para distintos espectros comparándose con los obtenidos de la caracterización espectrométrica para las subcélulas superior y posterior mostrados en la sección de resultados experimentales.

- *Resultados a distintas temperaturas*

Según las conclusiones obtenidas en la sección 3.2, a pesar de los distintos semiconductores que forman una célula MJ, la influencia de la temperatura para  $P_{mpp}$  puede ser descrita con un único coeficiente de temperatura, que no cambia con el espectro incidente. Por lo tanto, calculando el coeficiente de temperatura para  $P_{mpp}$  bajo el espectro de referencia es posible calcular la potencia a la temperatura deseada para cualquier espectro incidente. El coeficiente de temperatura, normalizado a 25 °C,

obtenido para la célula utilizada en el modelo era de  $-0,257\%/K$ . Usando este coeficiente de temperatura y los datos modelados en la tabla 3.10 es posible, por lo tanto, calcular el valor de la potencia máxima a otras temperaturas. En concreto se han elegido las temperaturas usadas durante la caracterización espectrométrica para las subcélulas posterior y media, figura 3.9. De esta forma se pueden comparar los datos obtenidos con el modelo con los datos medidos. La tabla 3.11 muestra los resultados obtenidos para las temperaturas: 10 °C, 45 °C, 75 °C y 100 °C. Se puede ver que el máximo error relativo encontrado es menor del 2%, lo que indica el correcto ajuste entre los datos modelados y los datos medidos. Se ha calculando el error relativo medio para todas las temperaturas, obteniéndose un valor de 0,16%. Igual que para el error calculado durante el ajuste del modelo en el apartado anterior, éste vuelve a estar centrado en cero, lo que de nuevo sugiere que el ajuste del modelo no está estimando la potencia por encima ni por debajo de su valor real.

$(K_{top};$ $K_{mita};$ $K_{bot})$	T = 10 °C			T = 45 °C			T = 75 °C			T = 100 °C		
	$P_{mppm}$ (mW)	$P_{mpps}$ (mW)	ER (%)	$P_{mppm}$ (mW)	$P_{mpps}$ (mW)	ER (%)	$P_{mppm}$ (mW)	$P_{mpps}$ (mW)	ER (%)	$P_{mppm}$ (mW)	$P_{mpps}$ (mW)	ER (%)
(0,90; 1,10; 1,00)	1,535	1,518	1,1	1,387	1,387	0,0	1,257	1,274	-1,3	1,199	1,180	1,6
(0,92; 1,08; 1,00)	1,559	1,554	0,3	1,410	1,419	-0,6	1,289	1,304	-1,2	1,229	1,208	1,7
(0,94; 1,06; 1,00)	1,593	1,575	1,1	1,438	1,439	-0,1	1,313	1,322	-0,7	1,246	1,225	1,7
(0,96; 1,04; 1,00)	1,611	1,599	0,7	1,459	1,461	-0,1	1,331	1,342	-0,9	1,265	1,243	1,8
(0,98; 1,02; 1,00)	1,634	1,619	0,9	1,477	1,479	-0,1	1,339	1,359	-1,4	1,277	1,259	1,4
(1,00; 1,00; 1,00)	1,635	1,626	0,5	1,480	1,486	-0,3	1,342	1,365	-1,7	1,282	1,264	1,4
(1,02; 0,98; 1,00)	1,624	1,617	0,5	1,474	1,477	-0,2	1,336	1,357	-1,6	1,271	1,257	1,1
(1,04; 0,96; 1,00)	1,600	1,596	0,2	1,455	1,458	-0,2	1,317	1,339	-1,7	1,258	1,241	1,3
(1,06; 0,94; 1,00)	1,573	1,570	0,2	1,437	1,434	0,2	1,299	1,318	-1,4	1,237	1,221	1,4
(1,08; 0,92; 1,00)	1,547	1,542	0,3	1,411	1,409	0,2	1,276	1,294	-1,4	1,214	1,199	1,2
(1,10; 0,90; 1,00)	1,520	1,512	0,5	1,386	1,381	0,3	1,253	1,268	-1,2	1,193	1,175	1,5

**Tabla 3.11:** Valores del punto de máxima potencia medidos ( $P_{mppm}$ ) en comparación con los estimados ( $P_{mpps}$ ) usando el coeficiente de temperatura normalizado a 25 °C para el espectro de referencia. El error relativo (ER) entre los datos estimados y los calculados es también mostrado.

- *Resultados a distintos espectros*

El propósito de este apartado es evaluar el modelo propuesto a espectros distintos de los que fue ajustado, es decir, espectros diferentes a los de la caracterización espectrométrica de las subcélulas superior y media. De esta forma se pretende demostrar que el modelo es capaz de predecir la  $P_{mpp}$  a espectros que no han sido incluidos en el proceso de ajuste del modelo. Como se mostró en la figura 3.16, la célula usada en el modelo fue también medida a espectros en los que se variaba la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior a 25 °C, mientras que la fotocorriente de la subcélula media se mantenía constante en  $K_{mid} = 1,00$ . Estos espectros son usados ahora para evaluar el modelo. La tabla 3.12 muestra los valores medidos, los modelados y el error relativo entre ellos. Como se puede ver el error máximo encontrado es menor del 1% para todos los espectros usados, lo que indica el adecuado comportamiento del modelo. Además el error relativo medio es de -0,22 % por lo que no se aprecia que el modelo esté evaluando la potencia por encima o debajo de su valor real, ya que el valor se encuentra prácticamente centrado en cero.

$(K_{top}; K_{mid}; K_{bot})$	$P_{mpp}$ medidos	$P_{mpp}$ estimados	Error relativo (%)
(0,90;1,00;1,10)	1,450	1,445	0,36
(0,92;1,00;1,08)	1,477	1,473	0,24
(0,94;1,00;1,06)	1,497	1,501	-0,25
(0,96;1,00;1,04)	1,524	1,526	-0,17
(0,98;1,00;1,02)	1,552	1,549	0,20
(1,00;1,00;1,00)	1,568	1,568	0,03
(1,02;1,00;0,98)	1,579	1,584	-0,27
(1,04;1,00;0,96)	1,587	1,595	-0,49
(1,06;1,00;0,94)	1,600	1,607	-0,47
(1,08;1,00;0,92)	1,599	1,613	-0,88
(1,10;1,00;0,90)	1,599	1,612	-0,79

**Tabla 3.12:** Valores del punto de máxima potencia estimados y medidos a distintos espectros obtenidos durante la caracterización espectrométrica variando la fotocorriente de las subcélulas superior y posterior a 25 °C mientras que la fotocorriente de la subcélula media se mantuvo constante en  $K_{mid} = 1,00$ .

Para obtener los valores presentados en la tabla 3.12 se han usado las ecuaciones del apartado 3.3.1, así como los valores de los parámetros de ajuste de la tabla 3.9 incluida en el mismo apartado. Como se ha comentado anteriormente, para poder predecir la potencia es necesario conocer las corrientes de cortocircuito de las subcélulas superior y media como parámetros de entrada del modelo. En nuestro caso estos datos se han tomado directamente de las medidas mostradas en la figura 3.15.

El modelo propuesto presenta una serie de limitaciones ya que como se ha dicho, las medidas para predecir los valores de la tabla 3.12 fueron tomadas de las medidas mostradas en la figura 3.15, sin embargo, para poder aplicar el modelo ante condiciones reales de funcionamiento es necesario poder calcular las corrientes de cortocircuito mediante algún procedimiento. Además, como se ha mostrado el modelo solo está probado para radiaciones de un sol. Sin embargo, el hecho de que se esté modelando una célula de concentración hace que la posibilidad de reproducir los mismos resultados bajo concentración sea una necesidad. Pero, como se ha comentado, no fue posible variar el espectro bajo concentraciones por limitaciones del simulador solar, por lo que no fue posible evaluar el modelo bajo concentración. A pesar de esto, existen procedimientos que permitirían probar y ajustar el modelo bajo concentración que serán considerados como líneas de trabajo futuras.

<sup>1</sup> Meusel M., Baur C., G. Létay, Bett A. W. et al., (2003), "Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurements Artifacts and their Explanation", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11:449-514.

<sup>2</sup> Meusel M., Adelhelm R., Dimroth F., Bett A. W. et al., (2002), "Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 10:243-255.

<sup>3</sup> Siefert G., Baur C., Meusel M., Dimroth F., Bett A.W., Warta W., (2002), "Influence of the Simulator Spectrum on the Calibration of Multi-junction Solar Cells under Concentration", 29<sup>th</sup> IEEE PVSC New Orleans, Paper No 302.6, 20-24 May.

<sup>4</sup> Abella M. A. (2005), "Sistemas Fotovoltaicos", S.A.P.T. Publicaciones Técnicas, S.L. segunda edición.

<sup>5</sup> ASTM G173-Edition 1, (2003) "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface", American Society for Testing and Materials.

<sup>6</sup> Pierret R. F. (1994), "Fundamentos de Semiconductores", Addison-Wesley Iberoamericana, S.A, segunda edición.

<sup>7</sup> Luque A. L., Andreev V. M. (2007), "Concentrator Photovoltaics", Springer-Verlag 2, New York.

<sup>8</sup> Law D. C. et al., (2010), "Future Pathways of Terrestrial III-V Multi-Junction Solar Cells for Concentrator Photovoltaic Systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 1314-1318.

<sup>9</sup> Yamaguchi M. et al., (2008), "Novel Materials for High-Efficiency III-V Multi-Junction Solar Cells", *Solar Energy* 82 173-180.

<sup>10</sup> Yamaguchi M., Takamoto T., Araki K., Ekins-Daukes N., (2005), "Multi-Junction III-V Solar Cells: Current Status and Future Potential", *Solar Energy* 79 78-85.

<sup>11</sup> Varshni Y. P., (1967) "Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors", *Physica* 34, pp. 149-154.

- <sup>12</sup> Faine P., Kurtz S. R., Riordan C. And Olson J. M., (1991), “The Influence of Spectral Solar Irradiance Variations on the Performance of Selected Single-Junction and Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Cells* 31 259-278.
- <sup>13</sup> Fernández E. F., García Loureiro A. J., Pérez Higuera P. J., Siefer G., (2011), “Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells under different Temperatures and Spectra”, 8<sup>th</sup> IEEE CDE, Palma de Mallorca, Spain.
- <sup>14</sup> Aronova E. S. et al., (2008), “On Correct Estimation of Hourly Power Output of Solar Photovoltaic Installations with MJ SCs and Sunlight Concentrators”, 33<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.
- <sup>15</sup> Kinsey G. S. et al., (2009) “Spectral Response and Energy Output of Concentrator Multijunction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:279-288
- <sup>16</sup> Peharz G., Siefer G., Bett A.W., (2009), “A Simple Method for Quantifying Spectral Impacts on Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Energy* 83 1588–1598.
- <sup>17</sup> Kinsey G. S., Pien P., Hebert P., Sherif R. A., (2009), “Operating Characteristics of Multi-Junction Solar Cells”. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93:950–1.
- <sup>18</sup> Perez-Higuera P., Muñoz E., Almonacid G., Vidal, P. G., (2011), “High Concentrator Photovoltaics Efficiencies: Present Status and Forecast”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 1810–1815.
- <sup>19</sup> Kinsey G. S., Hebert P., Barbour K. E., Krut D. D., Cotal H. L. and Sherif R. A., (2008), “Concentrator Multi-Junction Solar Cell Characteristics Under Variable Intensity and Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:503–508.
- <sup>20</sup> Overtraeten R. J., Mertens R. P., (1986), “Physics, Technology, and Use of Photovoltaics”. Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston.
- <sup>21</sup> Yoon S. and Garboushian V., (1994), "Reduced Temperature Dependence of High-Concentration Photovoltaic Solar Cell Open Circuit Voltage (Voc) at high Concentration Levels", 1<sup>st</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 1500-1504.
- <sup>22</sup> Siefer G. et al., (2005) “Determination of the Temperature Coefficients of Various III-V Solar Cells”, 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 6-10 June.
- <sup>23</sup> Green M. A. et al., (1982), “Silicon Solar Cells with Reduced Temperature Sensitivity”. *Electronic Letters* 2:97-98.
- <sup>24</sup> Baur C. and Bett A. W., (2005), “Modelling of III-V Multi.Junction Cells Based on Spectrometric Characterization”, 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 6-10 June.
- <sup>25</sup> Kinsey G. S. et al., (2009) “Spectral Response and Energy Output of Concentrator Multijunction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:279-288.
- <sup>26</sup> Domínguez C., Antón I. and Sala G., (2010), “Multijunction Solar Cell Model for Translating I-V Characteristics as a Function of Irradiance, Spectrum, and Cell Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18:272-284.
- <sup>27</sup> Gonzalez M. et al., (2011), “Modeling and Analysis of Multijunction Solar Cells”, *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIX*, Witzigmann, B., Henneberger F., Arakawa Y., Freundlich, A., San Francisco, USA.
- <sup>28</sup> King R. R., Bhusari D., Boca A., Larrabee D., Liu X.-Q., Hong W., Fetzer C. M., Law D. C. and Karam N. H., (2011), “Band Gap-Voltage Offset and Energy Production

in Next-Generation Multi-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:797–812.

<sup>29</sup> Rey-Stolle I., Algora C., Garcia I., Baudrit M., Espinet P., Galiana B. And Barrigón E., (2009) “Simulating III-V Concentrator Solar cells: a Comparison of Advantages and Limitations of Lumped Analytical Models; Distributed Analytical Models and Numerical Simulation”, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.

<sup>30</sup> Díaz V., López Villanueva J. A., Rodríguez Bolívar S., Jiménez Tejada J. A. And Rodríguez E., (2007), “ISOSIM: A Multi-Junction Solar Cell Simulation Program”, 4<sup>th</sup> International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo de El Escorial, Spain, 12 –16 March.

<sup>31</sup> Galiana B., Algora C., Rey-Stolle I., and García Vara Ivan, (2005), “A 3-D Model for Concentrator Solar Cells based on Distributed Circuit Units”, *IEEE transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 12, December.

<sup>32</sup> Green M. A., (1986), “Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Application”, University of New South Wales, Sydney, Australia.



## **Capítulo 4. Modelización y caracterización de módulos de concentración**

Como se ha comentado anteriormente existen modelos que permiten obtener el punto de máxima potencia de módulos CPV para unas condiciones de operación dadas. Sin embargo, como también se había reseñado, para usar estos modelos se necesita realizar una serie de medidas experimentales en condiciones controladas utilizando simuladores solares o en condiciones *outdoor* para obtener los parámetros necesarios de las ecuaciones de los modelos.

De forma que, se puede obtener la potencia máxima generada por un módulo CPV, y por lo tanto la energía que genera un sistema CPV en un emplazamiento, mediante alguno de los siguientes procedimientos:

- 1) Realizando las medidas experimentales necesarias para calcular los coeficientes de los modelos. Esto es un proceso laborioso y al alcance de pocos debido a los instrumentos requeridos.
- 2) Que el fabricante de los módulos ofrezca estos parámetros en las hojas de características, algo que en la actualidad realizan.

- 3) Planteando un modelo que permita el cálculo del punto de máxima potencia, con un error aceptable basándose en parámetros disponibles en bases de datos de acceso público y por tanto fácil de obtener.

En este capítulo se va a estudiar el comportamiento, en condiciones reales de funcionamiento, de distintos módulos de concentración. Este estudio va a permitir definir que parámetros atmosféricos influyen en la salida de un módulo CPV, lo que permite caracterizar los módulos estudiados ante variaciones de estos parámetros. Como objetivo final se va a plantear un modelo matemático que permite obtener el punto de máxima potencia de un módulo CPV trabajando a sol real.

Para llevar a cabo los objetivos marcados, el capítulo se va a dividir en tres secciones. En la primera sección se describe el montaje experimental y el procedimiento seguido para realizar las medidas de la característica I-V de los módulos estudiados. También se lleva a cabo, en esta sección, una validación de estas medidas. En la segunda sección se va a estudiar la influencia de los parámetros atmosféricos en la característica I-V de los módulos CPV, se presentan los resultados obtenidos y las principales conclusiones. En la última sección, a partir del estudio y análisis de los módulos realizado en la sección anterior, se va a presentar un método para estimar el punto de máxima potencia de los módulos de concentración estudiados basado en parámetros meteorológicos. Se analizan también, en esta última sección, los errores obtenidos del modelo frente a las medidas realizadas.

#### **4.1. Dispositivo experimental**

En esta primera sección se realiza una exhaustiva descripción de los instrumentos y la metodología seguida para llevar a cabo el estudio del comportamiento de los módulos de concentración bajo condiciones reales de funcionamiento. Tras esto, se realiza un análisis de las medidas tomadas, para comprobar que son representativas de un año típico y así poder generalizar las medidas.

#### 4.1.1. Módulos CPV, instrumentos y sistema de medida

Para poder plantear un modelo que permita predecir la potencia de salida de un módulo CPV es necesario realizar medidas del funcionamiento de los módulos a sol real. Estas medidas se han realizado sobre tres módulos CPV de distintos fabricantes. El montaje experimental destinado a estudiar el comportamiento de los módulos de concentración (CPV) consta de los siguientes sistemas e instrumentos:

- Tres módulos CPV de distintos fabricantes.
- Un seguidor solar sobre el que van montados los módulos.
- Una carga electrónica encargada de medir las curvas I-V de los módulos CPV.
- Un sistema de adquisición de datos (SAD) con dos sondas de temperatura para medir la temperatura de la célula de uno de los módulos CPV.
- Una estación atmosférica dotada de distintos sensores e instrumentos, que mide los parámetros atmosféricos necesarios para el estudio en condiciones exteriores de los módulos CPV.

En la figura 4.1 se muestran los instrumentos que forman el montaje experimental descrito: arriba a la izquierda se muestra una fotografía del laboratorio donde están ubicados por un lado, la carga electrónica utilizada para registrar las curvas I-V de los módulos de concentración y por otro, el sistema de adquisición de datos utilizado para medir la temperatura de célula de uno de los módulos. Abajo a la izquierda se muestra una fotografía de la estación atmosférica, dotada de los instrumentos necesarios para medir los parámetros meteorológicos, que se encuentra localizada en la terraza del edificio. A la derecha, se muestran los tres módulos estudiados y el seguidor solar sobre el que van montados. La estructura completa (módulos + seguidor) está situada, de igual forma que la estación atmosférica, en la terraza del edificio.



**Figura 4.1:** Fotografías de los instrumentos utilizados para el desarrollo del proyecto.

Las tablas 4.1 y 4.2 recogen las principales características, proporcionadas por los fabricantes, de los módulos utilizados. Los módulos serán denotados como A, B y C por motivos de confidencialidad. En la tabla 4.1 se muestra la concentración, el número de células y el área (A) de cada uno de los módulos. Además, cada módulo tiene un sistema óptico basado en lentes Fresnel con óptica secundaria, está equipado con células solares *lattice-matched* III-V de triple unión GaInP/GaInAs/Ge y tiene refrigeración pasiva. En la tabla 4.2 se muestra la eficiencia ( $\eta$ ), el punto de máxima potencia ( $P_{mpp}$ ), la temperatura de la célula ( $T_{célula}$ ) y el espectro de referencia<sup>1</sup>.

Módulo	Concentración	Número de células solares	A (m <sup>2</sup> )
A	550	16 células en serie	0,44
B	500	6 células en serie	0,39
C	625	6 células en serie	0,47

**Tabla 4.1:** Principales características de los módulos CPV estudiados. Todas las células están protegidas con diodos bypass. Cada módulo tiene un sistema óptico basado en lentes Fresnel con óptica secundaria, está equipado con células solares células *lattice-matched* III-V de triple unión GaInP/GaInAs/Ge y tiene refrigeración pasiva.

Módulo	Eficiencia (%)	$P_{mpp}$ (W)	DNI ( $W/m^2$ )	$T_{célula}$ ( $^{\circ}C$ )	Espectro de referencia
A	21,8	96,0	1000	25	AM1,5d
B	17,9	57,9	850	---	---
C	19,4	90,2	1000	25	AM1,5d

**Tabla 4.2:** Características eléctricas de los módulos CPV medidos.

Como se puede ver en la tabla 4.2 las características eléctricas de los módulos no se proporcionan a las mismas condiciones de funcionamiento. Mientras que para los módulos A y B se proporcionan las potencias máximas de los mismos cuando la radiación directa incidente sobre ellos es de  $1000W/m^2$ , las células están a una temperatura de  $25^{\circ}C$  y se tiene un espectro AM1,5d, para el módulo B se da la potencia cuando la radiación directa incidente es de  $850W/m^2$  no especificándose a que temperatura están trabajando las células ni el espectro incidente. Esto hace que la comparación entre los módulos sea difícil. Para conocer las características eléctricas de los módulos A, B y C a unas mismas condiciones se utilizó el método definido por K. Araki. Este método permite trasladar las curvas I-V de un módulo CPV a unas condiciones exteriores particulares<sup>2</sup>. El procedimiento seguido para trasladar las curvas I-V gracias a este método, así como un estudio de los distintos métodos destinados a este mismo propósito y las razones de la elección final del método de K. Araki, están incluidos en el Anexo I.

Las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 muestran la potencia máxima y la eficiencia de los tres módulos. Estos valores han sido obtenidos al aplicar el método de K. Araki a distintas irradiancias normales incidentes, una temperatura de aire ( $T_{aire}$ ) de  $20^{\circ}C$ , un espectro definido por la masa del aire o air mass (AM) de 1,5 y una velocidad del viento (VV) menor de 2 m/s. El air mass o AM viene definido como la cantidad de aire que tienen que atravesar los rayos procedentes del sol hasta una localización determinada<sup>3</sup>. De esta forma se pueden comparar y conocer las características I-V de los módulos a unas mismas condiciones.

<b>Módulo A</b>		
<b>DNI</b>	<b>P<sub>mpp</sub> (W)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
750	68,0	20,6
800	72,7	20,6
850	77,0	20,5
900	81,5	20,5

**Tabla 4.3:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo A para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

<b>Módulo B</b>		
<b>DNI</b>	<b>P<sub>mpp</sub> (W)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
750	57,2	19,7
800	61,2	19,8
850	64,5	19,7
900	68,1	19,6

**Tabla 4.4:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo B para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

<b>Módulo C</b>		
<b>DNI</b>	<b>P<sub>mpp</sub> (W)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
750	61,3	17,5
800	66,4	17,8
850	69,8	17,6
900	72,7	17,3

**Tabla 4.5:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo C para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

Como se ha comentado anteriormente, los módulos van montados sobre la estructura de un seguidor solar. Se trata de un seguidor de alta precisión diseñado por la compañía BSQ, situado en la terraza del edificio, que se encarga de realizar el seguimiento solar gracias a un sistema de control, de forma que los módulos siempre van a estar apuntando al sol con el objetivo de aprovechar la radiación normal directa incidente. Las características principales del seguidor solar se muestran en la tabla 4.6.

Detalle técnico	Características
Largo (m)	2,66
Ancho (m)	2,57
Peso (kg)	1230
Rango en azimut (°)	-135/+135
Rango en elevación (°)	-5/93
Flexión a 10 m/s (°)	0,13
Reacción mecánica (°)	0,03
Velocidad angular (°/min)	27
Resolución del encoder (°)	0,018

**Tabla 4.6:** Características principales del seguidor solar de la compañía BSQ sobre el que van montados los módulos CPV.

La carga electrónica encargada de medir las curvas I-V de los módulos CPV es el equipo PVPM 1000C40 fabricada por la compañía PVE PhotoVoltaik Engineering. Esta carga se encuentra ubicada, como se mostró en la figura 4.1, en el laboratorio del CEAEMA. La longitud del cable entre los módulos y la carga electrónica es de 50 metros. La tabla 4.7 muestra las principales características de la carga electrónica. Como se puede ver el error proporcionado por el fabricante para todos los rangos de medidas permitidos por la carga es menor del 1%, lo que indica la adecuada precisión de la carga empleada.

Detalle técnico	Características
Rangos de medidas voltaje (V)	25/100/500/1000
Rangos de medidas corriente (A)	2/5/10/40
Máxima frecuencia de muestreo (kHz)	100
Resolución (bits)	12
Precisión de la medida de los parámetros de la curva I-V	< 1%
Periodo de medida (s)	≈ 2
Temperatura de operación (°)	0-40
Comunicación	RS-232
Sistema de medición	4 hilos

**Tabla 4.7:** Características principales de la carga electrónica PVPM 1000C40 usada para la medición de las curvas I-V de los módulos CPV.

Además de la carga electrónica, se contó con un sistema de adquisición de datos, Agilent 34970<sup>a</sup>, dotado de una tarjeta 34901A y de dos sondas de platino, con el

objetivo de registrar la temperatura de célula de uno de los módulos, en concreto del módulo B. Esta temperatura fue medida con el propósito de estudiar la influencia de la temperatura de la célula en las características I-V de un módulo CPV. Se ha tratado de encontrar una relación matemática que permita relacionar dicha temperatura con otros parámetros atmosféricos tales como: temperatura del aire, radiación directa o velocidad del viento. El procedimiento seguido para establecer esta relación, así como un estudio de distintos métodos destinados a este mismo propósito, están incluidos en el Anexo II. Para medir la temperatura de la célula, las dos sondas se situaron dentro del módulo, lo más cerca posible de la célula solar sobre el receptor CPV y con una longitud de cable entre las sondas y el sistema de adquisición de datos, situado en el laboratorio, de 50 metros. Las tablas 4.8 y 4.9 muestran las características técnicas, más relevantes, del sistema destinado a medir la temperatura de célula, formado por el sistema de adquisición de datos y las sondas.

SAD y tarjeta	Detalle técnico	Características
Agilent 34970A	Canales de entrada	1 a 120
	Resolución (bits)	22
	Sensores de entrada	Termopares, sondas RTD a dos y cuatro hilos, termistores, voltios y corriente en dc y ac, frecuencia y periodo, y resistencias a dos y cuatro hilos
	Comunicaciones	LAN, USB, GPIB y RS-232
	Software	BenchLink Data Logger para configurar y controlar los tests y almacenar los datos
Tarjeta 34901A	Canales	20+2
	Frecuencia de escaneo (canales/s)	60
	Sistema de medición	2 y 4 hilos
	Sensores de entrada	Termopares, sondas RTD a dos y cuatro hilos, termistores, voltios y corriente en dc y ac, frecuencia y periodo, y resistencias a dos y cuatro hilos
	Voltaje máximo (v)	300
	Corriente máxima (A)	1
	Ancho de banda (MHz)	10 Mhz
	Offset térmico ( $\mu$ V)	Offset térmico < 3
Comunicación	Conexión interna con el DMM	

**Tabla 4.8:** Características relevantes del SAD Agilent 34970A y de la tarjeta 34901A.

Detalle técnico	Características
Estándar	EN 60 751
Coefficiente de temperatura $\alpha$ (C <sup>-1</sup> )	3.850 x 10 <sup>-3</sup>
Rango de temperatura (°C)	-80 a 180
$R_0/\Omega$	1x100
Anchura (mm)	21
Longitud (mm)	50
Espesor (mm)	0,3
Resistencia de aislamiento (M $\Omega$ )	10
Estabilidad de $R_0$ (%/año)	Desviación $\leq 0,1$
Sistema de medición	4 hilos
Error de la medida (°C)	$\pm 0,3$

**Tabla 4.9:** Características principales de la sonda RTD de platino utilizada para medir la temperatura.

A parte de los instrumentos anteriormente comentados, que permiten medir las características de los módulos estudiados, es necesario conocer también las condiciones atmosféricas a las que dichos parámetros fueron medidos, para poder realizar el estudio de la influencia de los distintos parámetros meteorológicos. Para la medida de estos parámetros atmosféricos se contó con la estación meteorológica de GEONICA, MTD 3000C, mostrada en la figura 4.1. Esta estación está equipada con distintos sensores destinados a medir y recopilar los valores atmosféricos que puedan influir en los módulos CPV. Los valores recogidos por la estación meteorológica, con un intervalo de medida de dos minutos, son:

- Dirección y velocidad máxima, mínima y media del viento.
- Temperatura máxima, mínima y media del aire.
- Humedad relativa máxima, mínima y media.
- Radiación directa máxima, mínima, media e instantánea.
- Elevación y azimut solar máxima, mínima, media e instantánea.

Las tablas 4.10 y 4.11 muestran las características principales de la estación atmosférica y de los sensores o sondas utilizados por ésta para realizar las medidas.

Sondas		Detalle técnico	Características	
Pirheliómetro (NIP) EPPLEY		Rango de longitudes de onda ( $\mu\text{m}$ )	0,20 a 4,0	
		Clasificación	WMO secondary standard/ISO de más alta precisión	
		Sensibilidad ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ )	$\approx 8$	
		Apertura ( $^\circ$ y $'$ )	5 y 43	
		Impedancia ( $\Omega$ )	$\approx 200$	
		Dependencia con la temperatura (%)	1 de -20 a 40°C	
		Tiempo de respuesta (s)	1	
Seguidor solar GEOTRACKER 3000		Señal de salida	Análogica en mV proporcionales a la radiación incidente	
		Comunicación	RS-485 a 9600 baudios	
		Control de seguimiento	Alta precisión: Hasta 64 posiciones por paso con giros de hasta 0,0003° refrescados cada segundo.	
		Rango de temperaturas de funcionamiento ( $^\circ$ )	-20 a 60	
		Rango de humedad de funcionamiento (%)	0 a 100	
		Rango de velocidad del viento de funcionamiento (m/s)	Hasta 30 sin afectar al alineamiento	
		Accesorios	Soporte para dos pirheliómetros	
		Tracción	Dos motores paso a paso de 200 pasos con velocidad de 9,8°/s y un par de 35 Nm	
STH/STA/SHA-5031		Transmisión	Relación de 96:1 (0,01875°/paso)	
		Azimut y elevación	Canal lógico que proporciona valores cada segundo con un error de 0,01°	
		Temperatura	Precisión ( $^\circ\text{C}$ )	$\pm 0,1$ de 0 a 70
			Máxima temperatura de operación ( $^\circ\text{C}$ )	100
			Temperatura de trabajo ( $^\circ\text{C}$ )	-80 a 75
		Humedad relativa (HR)	Rango de medida (%HR)	0 a 98
			Precisión (%HR)	$\pm 3$ de 0 a 90 $\pm 5$ de 90 a 98
Estabilidad (%HR/2años)	2			
Temperatura de operación ( $^\circ\text{C}$ )	-10 a 60			
Young modelo 03002		Rango (m/s)	50	
		Velocidad del viento	Umbral (m/s)	1,1
			Frecuencia de salida	1 ciclo por revolución
			Temperatura de trabajo ( $^\circ\text{C}$ )	-50 a 50
		Dirección del viento	Rango de medida ( $^\circ$ )	360 mecánicos y 352 eléctricos
			Umbral (m/s)	1,3
			Señal de salida	Voltaje proporcional al ángulo de la dirección del viento
			Temperatura de trabajo ( $^\circ\text{C}$ )	-50 a 50

**Tabla 4.10:** Sondas utilizadas por la estación atmosférica GEONICA MTD 3000C para el registro de los parámetros atmosféricos.

Detalle técnico	Características
<b>Entradas analógicas</b>	8 a 16
<b>Entradas digitales</b>	4 de frecuencia y 4 de estado
<b>Comunicaciones</b>	Cable físico, modem RTC, modem GSM o GPRS, ethernet, adaptador de fibra, adaptador a cable y radio Modem
<b>Memoria interna (MB)</b>	128

**Tabla 4.11:** Características principales de la estación atmosférica GEONICA MTD 3000C.

En lo anteriormente descrito se han detallado las características que se han considerado más relevantes, tanto de los módulos CPV bajo estudio, como de los sistemas e instrumentos utilizados para su análisis. A modo de resumen, la figura 4.2 muestra el esquema del montaje experimental descrito. Tal y como se ha comentado, los módulos CPV van montados sobre el seguidor solar y medidos a cuatro hilos gracias a una carga electrónica PVPM 1000C40. La temperatura del módulo B, único módulo que contiene sondas para medir la temperatura de célula, es medida gracias a las sondas de temperatura ubicadas en dos receptores CPV y registrada por medio del sistema de adquisición de datos Agilent 34970A. Tanto las medidas de las curvas I-V de los tres módulos estudiados, como las de temperatura del aire, se registraron cada 10 minutos de forma sincronizada. Por otro lado, la estación atmosférica, dotada de todos los sensores descritos, se encargó de medir los parámetros atmosféricos cada 2 minutos.

Las comunicaciones de los distintos instrumentos con el PC situado en el laboratorio fueron las siguientes:

- PVPM 1000C40: RS-232.
- Agilent 34970A: GPIB.
- Geónica 3000C: Ethernet.

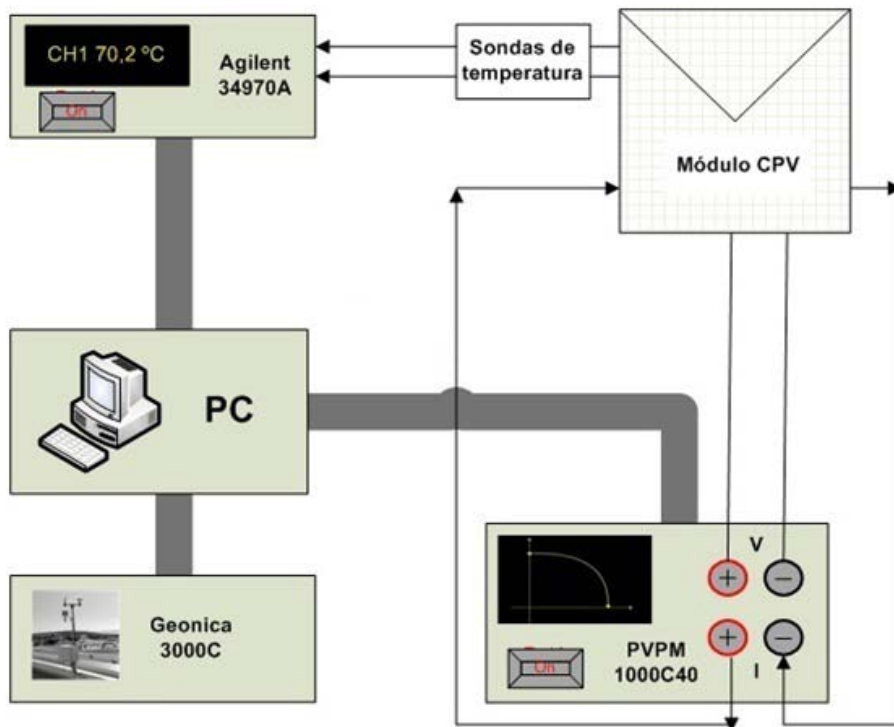


Figura 4.2: Esquema del sistema de medidas para la medición de los módulos CPV bajo estudio.

De esta forma todos los datos fueron almacenados en un PC para su posterior análisis. La figura 4.3 muestra el esquema simplificado del procedimiento seguido para recoger los datos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

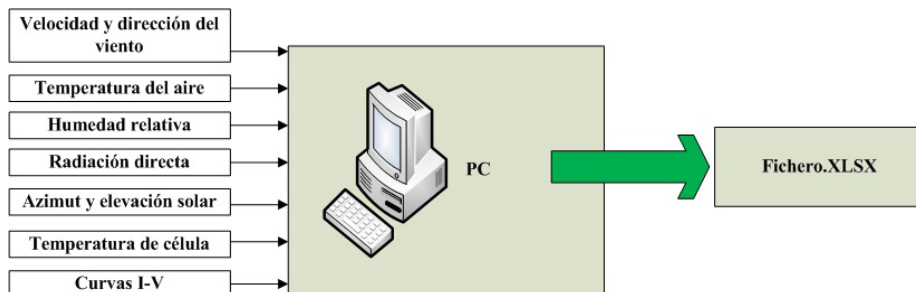


Figura 4.3: Esquema simplificado del procedimiento experimental seguido.

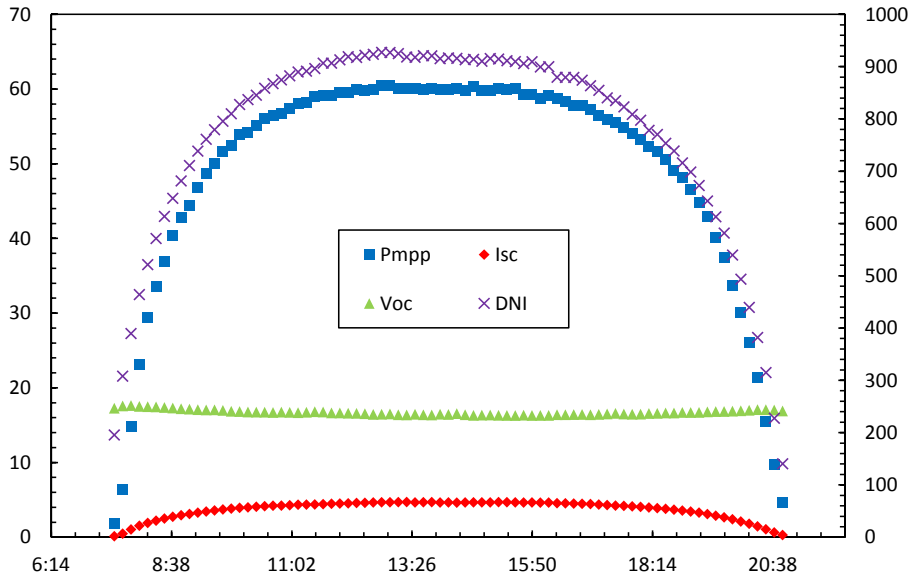
El PC, ubicado en el laboratorio, registra todos los datos anteriormente indicados siendo después procesados, de forma que se obtiene un único fichero con formato .xlsx para cada día de medida. Este fichero contiene todas las medidas que se han realizado a

lo largo de un día, sincronizadas a la misma hora. Estos archivos van a ser el punto de partida del estudio y gracias a ellos se podrá estudiar la influencia de los parámetros atmosféricos en el funcionamiento de los módulos CPV.

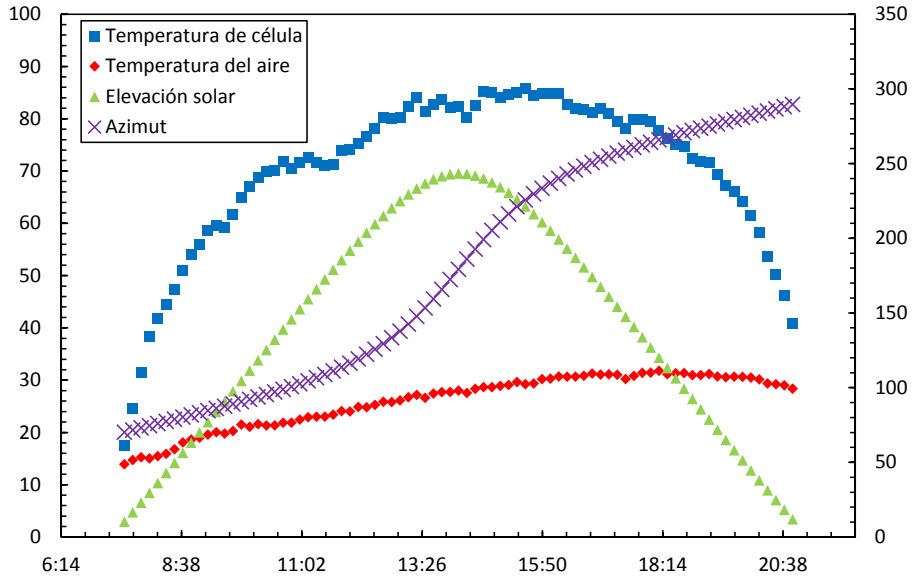
A continuación se enumeran todos los parámetros registrados, así como sus unidades:

- Hora (hora:minuto:segundo).
- Intensidad de cortocircuito del módulo:  $I_{sc}$  (A).
- Tensión de circuito abierto del módulo:  $V_{oc}$  (V).
- Intensidad en el punto de máxima potencia del módulo:  $I_{mpp}$  (A).
- Tensión en el punto de máxima potencia del módulo:  $V_{mpp}$  (V).
- Potencia máxima del módulo:  $P_{mpp}$  (W).
- Factor de forma del módulo: FF (%).
- Temperatura de célula del módulo:  $T_{célula}$  (°C).
- Velocidad del viento: VV máxima, mínima y media (m/s).
- Dirección del viento:  $\theta_v$  máxima, mínima y media (°).
- Temperatura de aire:  $T_{aire}$  máxima, mínima y media (°C).
- Humedad relativa: HR máxima, mínima y media (%).
- Irradiancia normal directa: DNI máxima, mínima media e instantánea ( $W/m^2$ ).
- Elevación solar:  $\gamma_s$  máxima, mínima, media e instantánea (°).
- Azimut solar:  $\alpha_s$  máximo, mínimo, medio e instantáneo (°).

A modo de ejemplo, las figuras 4.4 y 4.5 muestran algunas de las medidas realizadas para un día particular, en concreto para el 09/05/2011. La figura 4.4 muestra los parámetros eléctricos  $P_{mpp}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y la DNI a lo largo ese día para el módulo B. La figura 4.5 muestra los valores instantáneos de la temperatura de célula, medidos mediante una de las sondas de temperatura PT100, la temperatura media del aire medida cada dos minutos y el valor instantáneo de la elevación solar y el azimut, medidos también cada dos minutos, a lo largo del día.



**Figura 4.4:** Parámetros eléctricos para el módulo B y DNI medidos el día 09/05/2011. En el eje y de la izquierda se representan los valores de  $P_{mpp}$  (W),  $I_{sc}$  (A), y  $V_{oc}$  (V) mientras que en el eje y de la derecha se representa la DNI ( $W/m^2$ ), medida al mismo tiempo que los parámetros eléctricos.



**Figura 4.5:** Temperatura de célula, temperatura del aire, elevación solar y azimut para el módulo B a lo largo del día 09/05/2011. En el eje y de la izquierda se representa la temperatura de la célula ( $^{\circ}C$ ), la temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ) y la elevación solar ( $^{\circ}$ ) mientras que en el eje y de la derecha se representa el azimut ( $^{\circ}$ ).

Para finalizar esta sección, se va a describir el procedimiento seguido para calibrar la carga electrónica utilizada para medir las curvas I-V de los módulos CPV. Este dispositivo se consideró la parte más crítica del procedimiento de medición, por lo que se decidió calibrar la carga electrónica de forma individual y así poder estimar, del modo más preciso posible, el error que se pudiera estar cometiendo en la medida de las curvas I-V. Para llevar a cabo este proceso de calibración se realizaron diversas medidas sobre un módulo FV policristalino Suntech modelo STP160-24/AC, con características de corriente y tensión similares a las de los módulos CPV estudiados. Este módulo había sido calibrado con anterioridad por un laboratorio acreditado independiente, el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), con el objetivo de conocer sus características I-V, con la máxima precisión posible, a unas condiciones de radiación y temperatura determinadas, tabla 4.12. Se utilizó este módulo como patrón para validar y estimar el error del sistema de medida de las curvas I-V. Gracias a este módulo, a los coeficientes de temperatura aportados por la compañía, que permiten trasladar las curvas I-V a distintas temperaturas, y a una célula calibrada de igual tecnología que el módulo, que permite conocer de forma precisa tanto la temperatura a la que se encuentran trabajando las células del módulo como la radiación que recibe, se determinó el valor de los parámetros eléctricos: corriente, tensión, y potencia del módulo calibrado y de esta forma estimar el error del sistema de medida<sup>4</sup>. Se obtuvo una desviación del -1% para la potencia máxima, del -0,3% para la corriente de cortocircuito y del -0,4% para la tensión de circuito abierto. Todas las medidas han sido corregidas teniendo en cuenta este error.

Detalle técnico	Características
Irradiancia solar total ( $W/m^2$ )	1000
Temperatura de célula ( $^{\circ}C$ )	25
$I_{sc}$ (A)	5,03
$V_{oc}$ (V)	43,6
$P_{mpp}$ (W)	165
Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$ ( $\%/^{\circ}C$ )	0,06
Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$ ( $mV/^{\circ}C$ )	-155
Coefficiente de temperatura de $P_{max}$ ( $\%/^{\circ}C$ )	-0,47

**Tabla 4.12:** Características principales del módulo Suntech STP160-24/AC calibrado en el CIEMAT y utilizado para calibrar el sistema de adquisición de curvas I-V.

#### 4.1.2. Validación y valoración de las medidas

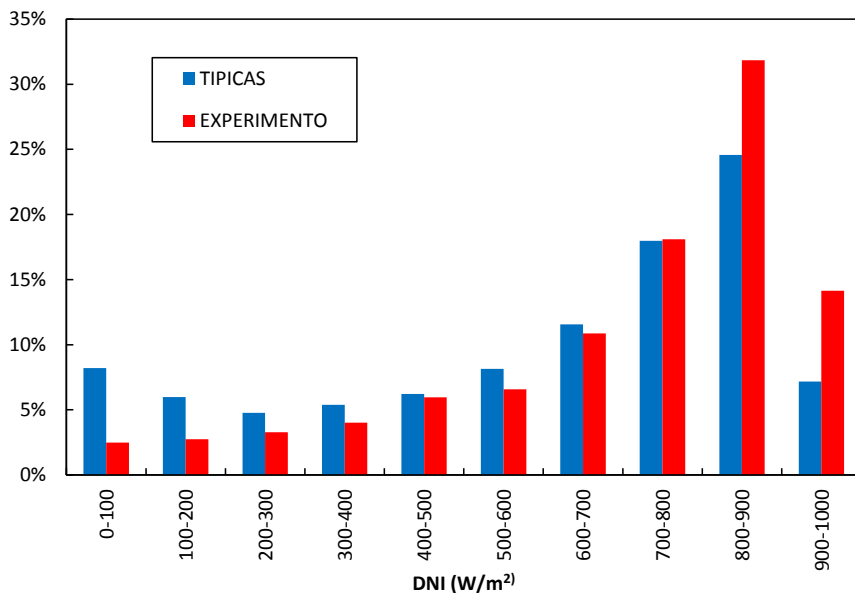
Como se ha comentado en el apartado anterior, cada archivo generado contiene las medidas diarias de las características I-V del módulo bajo estudio, la temperatura de célula, en el caso del módulo B, y todos los parámetros atmosféricos detallados anteriormente. Para el estudio de los módulos CPV sólo se han tenido en cuenta los días totalmente despejados o con muy poca nubosidad. Las medidas se han realizado a lo largo de un año: desde Julio del 2010 hasta Junio del 2011, de esta manera se tienen datos del funcionamiento de los módulos CPV bajo distintas condiciones ambientales. Teniendo en cuenta únicamente las medidas de los días que cumplen el requisito anterior, es decir, días despejados o con muy poca nubosidad, se tiene un total de 4518 medidas repartidas a lo largo de 78 días. Hay que destacar que aproximadamente el 50% de las medidas se centraron en el módulo B, debido a que es el módulo que tiene las sondas de temperatura y por ello tiene un mayor interés. El resto de las medidas se reparten aproximadamente en un 35% para el módulo A y en un 15 % para el módulo C. El módulo C es el que dispone de menos medidas debido a que no se contó con dicho módulo desde el principio del proyecto. Esto ha impedido realizar un estudio tan profundo para este módulo como para los otros dos.

Para saber si los datos medidos son representativos de un año solar en Jaén, estos valores fueron comparados con los valores de un año típico. Los parámetros que se compararon son aquellos parámetros que se consideraron más representativos: la radiación directa, la temperatura del aire y la velocidad del viento. Las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 muestran la comparación entre los valores de estos parámetros para un año típico en Jaén frente a las medidas realizadas. Como se puede ver, existe una alta concordancia entre los datos medidos y los valores del año típico para todos los parámetros representados. Debido a esto, se puede considerar que las medidas realizadas son representativas de un año en Jaén, por lo que las conclusiones obtenidas durante el estudio tendrán validez para un año típico. La mayor desviación observada de las medidas con respecto al año solar típico se muestra en la figura 4.6 en las radiaciones que van de 0 a 200 W/m<sup>2</sup>. El año típico presenta frecuencias mucho más altas para los niveles de radiación directa en ese rango. Una posible explicación puede ser que, durante el desarrollo del proyecto, sólo se han considerado como buenas las medidas

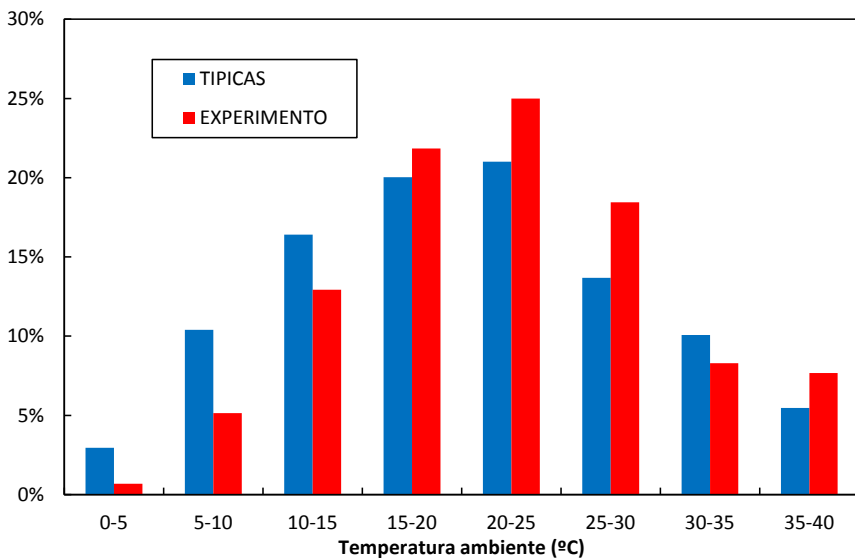
realizadas en días despejados o con muy poca nubosidad. La principal característica de estos días es que a primeras horas de la mañana ya se alcanzan rangos altos de radiación directa, por lo que la frecuencia de valores a bajos niveles de DNI es muy pequeña. El año solar típico, sin embargo, tiene en cuenta todos los días del año independientemente de su nubosidad. Existen un gran número de días nublados en los que la mayor parte de la radiación es global o difusa pero en los que también hay una parte de radiación directa de bajo nivel. Estos días sumados a lo largo del año contribuyen a que exista la discrepancia mencionada entre las medidas y el año solar típico para ese rango de radiaciones directas.

Haciendo un análisis más profundo de los resultados obtenidos, es interesante comentar que los niveles de radiación directa anual en Jaén son de los más altos de Europa, en concreto son superiores a  $2.000 \text{ kWh/m}^2$ , tal y como se representa en la figura 4.9<sup>5</sup>. Multiplicando el porcentaje de repeticiones de cada nivel de radiación por su valor, mostrado en la figura 4.6, se puede calcular la energía directa recibida en Jaén a lo largo del año clasificándola por niveles de DNI, figura 4.10. Como se puede ver, la energía incidente encuentra su máximo para el rango de radiaciones comprendido entre  $800$  y  $900 \text{ W/m}^2$ , y la mayor contribución de la energía directa recibida en Jaén para todo un año se encuentra localizada en el rango de radiaciones comprendidas entre  $400$  y  $1000 \text{ W/m}^2$ , en concreto el 95% de la energía directa recibida se encuentra en ese rango.

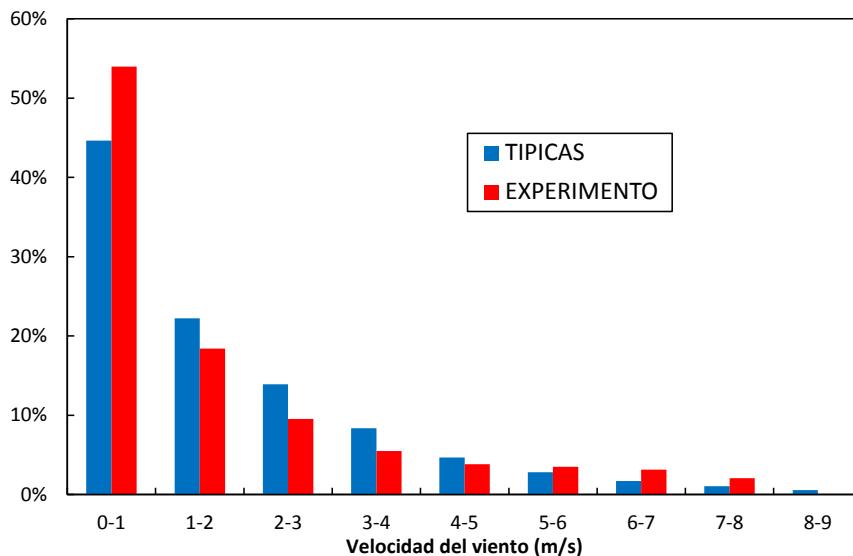
Tanto los altos niveles de radiación, como la distribución de ésta, confieren al emplazamiento en el que se llevará a cabo el estudio un carácter privilegiado. La tecnología CPV sólo es capaz de transformar en energía eléctrica la parte directa de la radiación incidente, debido al uso de lentes y/o espejos para concentrar la luz incidente, y está especialmente concebida para lugares con características de radiación directa como las descritas.



**Figura 4.6:** Porcentaje de la radiación normal en Jaén de un año típico y de los valores de DNI obtenidos durante el experimento. La figura muestra como los resultados obtenidos son muy parecidos, por lo que las medidas realizadas se pueden considerar representativas para los valores de DNI de Jaén de un año típico.



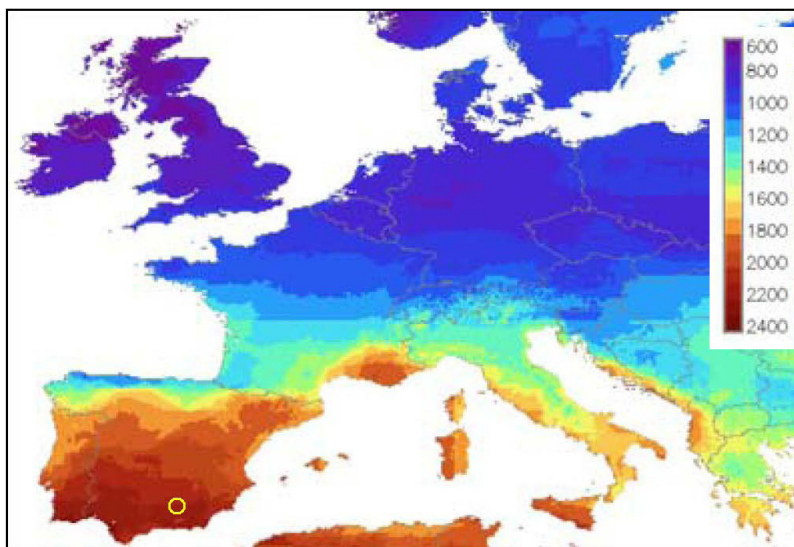
**Figura 4.7:** Porcentaje de los valores de temperatura ambiente obtenidos durante un año típico en Jaén y de los valores de temperatura ambiente medidos durante el experimento. La figura muestra que los resultados obtenidos son muy parecidos y por lo tanto, los valores medidos de temperatura ambiente se pueden considerar representativos de los valores de temperatura ambiente de Jaén de un año.



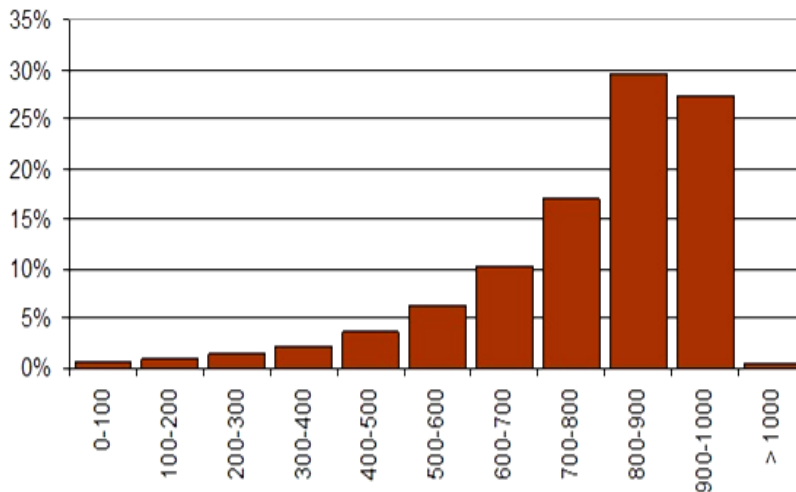
**Figura 4.8:** Porcentaje de los valores de velocidad del viento medido a diez metros obtenidos durante un año típico en Jaén y de los valores de velocidad del viento medidos durante el experimento. La figura muestra como ambos son muy parecidos y por lo tanto, los valores medidos de viento se pueden considerar representativos de los valores de velocidad de viento de Jaén de un año típico.

Otro factor que contribuye a que el lugar de estudio sea considerado como muy favorable para el estudio en condiciones *outdoor* de módulos CPV es el debido al gradiente térmico que se produce entre invierno, con temperaturas que bajan a 5 ó 10 °C, y verano, donde se alcanzan temperaturas de 40 °C con relativa frecuencia. Esto permitirá realizar un estudio detallado de la influencia de la temperatura del aire en el comportamiento de los módulos CPV.

Respecto al viento, hay que destacar que la mayoría de las medidas se concentran en un rango de velocidades de viento comprendidas entre 0 y 2 m/s. Dentro de este intervalo, como más tarde se comentará, la influencia del viento en las características I-V de un módulo CPV es considerada despreciable, por lo que se va a poder realizar un estudio de la influencia del resto de los parámetros sin tener en cuenta el viento.



**Figura 4.9.** Mapa de la cantidad de radiación directa anual para Europa. Jaén está indicado por el círculo amarillo. Siguiendo la escala de colores se puede apreciar como el nivel de DNI recibido es ligeramente superior a 2000 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 4.10:** Distribución de la energía directa incidente sobre Jaén clasificada por niveles de DNI.

## 4.2. Resultados experimentales

En este apartado se van a analizar los resultados experimentales obtenidos, para tratar de entender el comportamiento en condiciones de funcionamiento a sol real de los módulos CPV estudiados. Para el estudio de los datos experimentales se ha considerado que la eficiencia ( $\eta$ ), la potencia máxima normalizada a uno ( $p_{mpp}$ ) y la potencia máxima ( $P_{mpp}$ ) del sistema son los parámetros más interesantes, por lo que, tanto la presentación como la discusión de resultados se van a centrar en estos parámetros, según convenga en cada caso. El objetivo final es encontrar un modelo que permita predecir la potencia máxima generada por los módulos CPV bajo unas condiciones atmosféricas determinadas, por lo que el estudio del comportamiento de la potencia ante las variaciones meteorológicas es clave.

Se ha considerado el estudio de la eficiencia, ecuación 4.1, ya que es un factor importante en la descripción de cualquier sistema dedicado a la generación de energía, aportando gran información sobre su funcionamiento, por lo que en ocasiones se hará uso de este parámetro para poder llegar a las conclusiones deseadas.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{DNI \cdot A} \text{ Ecuación 4.1}$$

Donde  $P_{mpp}$  es el punto de máxima potencia, DNI la irradiancia normal directa y A el área del módulo. En otras ocasiones, en lugar de la eficiencia, se utilizará la potencia máxima normalizada a 1, ecuación 4.2, que va a permitir estudiar la potencia generada por el sistema con independencia de la DNI.

$$p_{mpp} = \frac{\frac{P_{mpp}}{DNI}}{\frac{P_{mpp}^*}{DNI^*}} \text{ Ecuación 4.2}$$

Donde  $P_{mpp}^*$  y  $DNI^*$  son las condiciones estándar a las que se desea normalizar  $P_{mpp}$ .

El sentido físico de la potencia normalizada y de la eficiencia es el mismo, diferenciándose únicamente por una constante  $\Delta$ , ecuación 4.3:

$$P_{mpp} = \eta A \frac{DNI^*}{P_{mpp}} = \eta \Delta \text{ Ecuación 4.3}$$

El estudio de los datos experimentales y modelo propuesto para estimar la potencia de salida de un módulo CPV se van a centrar en rangos de radiación mayores de  $400 \text{ W/m}^2$ . Como se vio en la figura 4.10, el 95% de la energía directa recibida estaba localizada para radiaciones directas mayores de  $400 \text{ W/m}^2$ . Los sistemas CPV están especialmente diseñados para trabajar a altos niveles de radiación y es donde la utilización de este tipo de sistemas de producción de energía tienen sentido frente a otros convencionales como puede ser la energía FV<sup>6</sup>. Debido a estas razones, el estudio se ha centrado en niveles de DNI mayores de  $400 \text{ W/m}^2$ .

En los siguientes apartados se va a estudiar la influencia de los parámetros atmosféricos: el viento, la DNI, la temperatura del aire y del espectro, en la salida de un módulo de CPV, primero cada uno de ellos de manera individual y por último de forma conjunta.

#### 4.2.1. *Influencia del viento*

El viento es uno de los parámetros atmosféricos que va a influir en la salida de un módulo CPV situado en un seguidor solar, por lo que debe ser estudiado para entender y modelar el funcionamiento de un módulo CPV en condiciones reales de funcionamiento<sup>7,8,9</sup>. Sin embargo, la influencia del viento es un parámetro difícil de cuantificar, ya que depende tanto de la velocidad como de la dirección<sup>10</sup> y además su efecto puede ser tanto positivo como negativo<sup>2</sup>.

Si el viento incide sobre la parte posterior del módulo CPV sus efectos pueden ser positivos, ya que ayuda a refrigerar la temperatura de las células MJ, haciendo mejorar la eficiencia total del sistema. Además del efecto que produce en la refrigeración de las células MJ, el viento también influye en la refrigeración de las lentes si incide en la parte delantera del módulo CPV, modificando su temperatura y por lo tanto su eficiencia<sup>11</sup>. Las lentes Fresnel, lentes usadas por los módulos utilizados en el estudio y que son también las más usadas por los sistemas CPV en la actualidad,

alcanzan su eficiencia máxima en 20 °C, disminuyendo ésta para temperaturas superiores. En las localizaciones típicas para la CPV, zonas con una alta DNI, las lentes trabajan a temperaturas medias superiores a 20 °C con lo que el viento va a ser un factor de refrigeración positivo, al igual que lo era para las células MJ, ya que ayuda a disminuir su temperatura<sup>11</sup>.

Sin embargo, el viento también puede tener una influencia negativa en la salida de los módulos CPV que van montados sobre seguidores solares. Dependiendo del área del seguidor solar, de sus características mecánicas y de la velocidad y dirección del viento, se puede producir un pandeo o movimiento en la estructura del seguidor, que hace que la lente no focalice totalmente en la célula, produciéndose una disminución en la eficiencia<sup>2,9</sup>.

La norma destinada a saber la potencia generada por un módulo o instalación CPV a unas condiciones de funcionamiento determinadas, IEC 62670-Power Rating, que aún no ha sido establecida de forma definitiva<sup>12,13</sup>, pero sobre la que ya se han realizado avances tales como definir las condiciones externas de operación, indica que para que el viento no influya en la salida del módulo CPV éste debe ser menor de 2 m/s<sup>14</sup>. Tal y como se vio en la figura 4.8, que mostraba la distribución del viento por velocidades, aproximadamente el 70% del viento registrado en Jaén se encuentra por debajo de los 2 m/s. Además, si calculamos la energía total directa recibida a lo largo del año, filtrando los datos para los valores menores de 2 m/s de la figura 4.10, se obtiene que el 89 % de la energía directa total recibida en Jaén se encuentra localizada para DNI mayores de 400 W/m<sup>2</sup> y vientos menores de 2 m/s, lo que indica que el estudio de los módulos, utilizando estos datos, va a tener en cuenta la mayor parte de la energía recibida en Jaén.

Todo lo comentado anteriormente pone de manifiesto la importancia del estudio del viento, que daría por sí sólo para un proyecto amplio de investigación. El objetivo de este trabajo no es estudiar, ni desarrollar, un modelo para el viento, por lo que en este caso, el modelo propuesto no lo va a tener en cuenta. Es decir, todos los datos analizados a continuación de este apartado han sido filtrados para velocidades de viento inferiores de 2 m/s, por lo que los resultados no se verán influenciados por éste. Pese a

contar sólo con los datos para velocidades de viento menores de 2 m/s, se tiene, como se mostró en la sección anterior, un conjunto de datos suficientemente amplio para realizar un correcto estudio de los módulos CPV, ya que el 70 % de los datos medidos a lo largo de una año en Jaén se sitúan para velocidades de viento inferiores a ésta, además, de que se tiene en cuenta aproximadamente el 90% de la energía total directa recibida en Jaén.

#### 4.2.2. *Influencia de la DNI*

Como se ha visto en el capítulo anterior, las células MJ están influenciadas por la radiación incidente. Ya que los módulos CPV están constituidos por células MJ, también se verán influenciados por ésta, por lo que deberá ser objeto de estudio para entender el comportamiento de un módulo CPV.

En este apartado se pretende estudiar la relación que existe entre la DNI y la potencia máxima para los tres módulos del estudio, sin realizar ningún tipo de corrección en temperatura o espectral. Esto permitirá hacer un primer análisis del comportamiento de los módulos ante las variaciones en DNI.

Las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 muestran la relación del punto de máxima potencia con la DNI para los módulos A, B y C respectivamente. También se muestran las líneas y ecuaciones de la regresión lineal realizada, así como el coeficiente de correlación  $R^2$  para cada uno de los módulos. Como se puede ver en las tres gráficas, la potencia máxima de los módulos bajo estudio muestra un comportamiento casi lineal con la DNI, teniendo un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,96 para los módulos A y C, y de 0,95 para el módulo B. La alta correlación existente entre la DNI y la potencia máxima, para cada uno de los módulos, indica que éste parámetro va a ser el factor que más influye en el comportamiento de un módulo CPV.

La figura 4.14 compara la potencia máxima generada por cada uno de los módulos, a partir de las ecuaciones lineales mostradas en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13. Las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 mostraban que el módulo que más potencia generaba, a las DNI estudiadas, era el módulo A, seguido del C y del B. Como se puede ver en la figura 4.14, esto también se cumple para todos los rangos de DNI estudiados, sin embargo, el

comportamiento frente a las variaciones de la radiación directa difiere para cada uno de ellos. Las potencias máximas generadas por cada uno de los módulos a bajos niveles de DNI se encuentran más próximas entre sí que a más altas radiaciones. Esta diferencia se explica gracias a las pendientes de las rectas. El módulo A tiene una pendiente de 0,0979, el B de 0,0820 y el C de 0,0870. Es decir, el módulo A aumenta su potencia en mayor grado con la DNI que el resto de los módulos. El módulo C aumenta su potencia en menor grado con la DNI que el A, pero en mayor grado que el B, que es el que menos crece con la DNI.

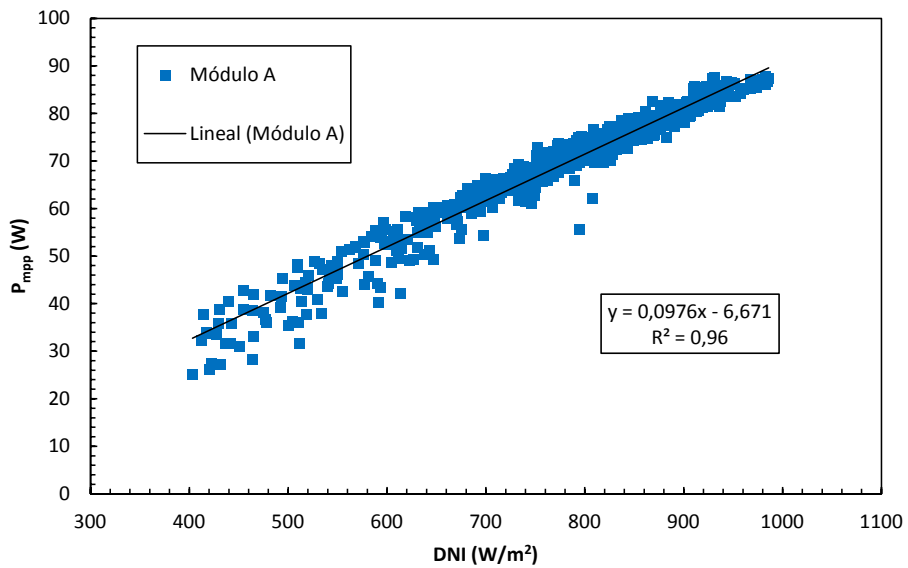


Figura 4.11:  $P_{mpp}$  versus DNI para el módulo A para radiaciones mayores de 400  $W/m^2$ .

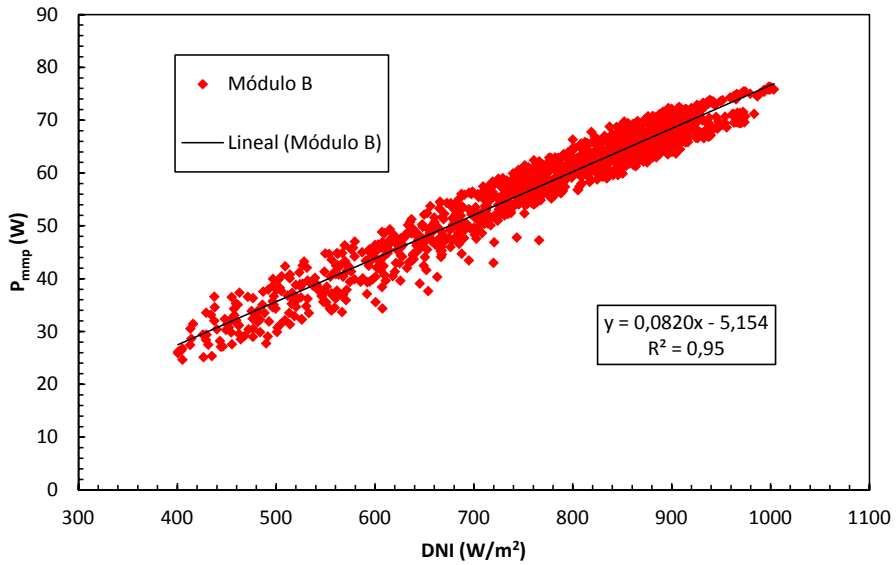


Figura 4.12:  $P_{nmp}$  versus DNI para el módulo B para radiaciones mayores de 400 W/m<sup>2</sup>.

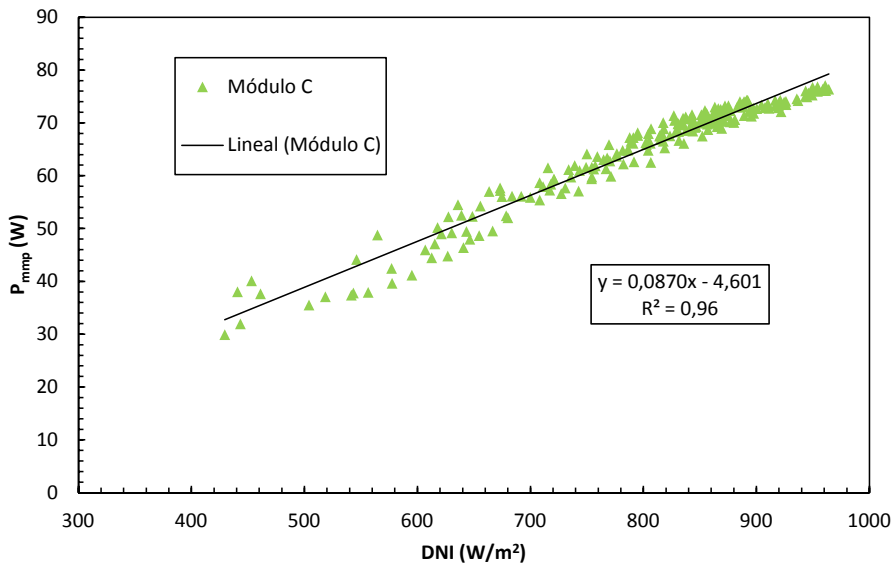
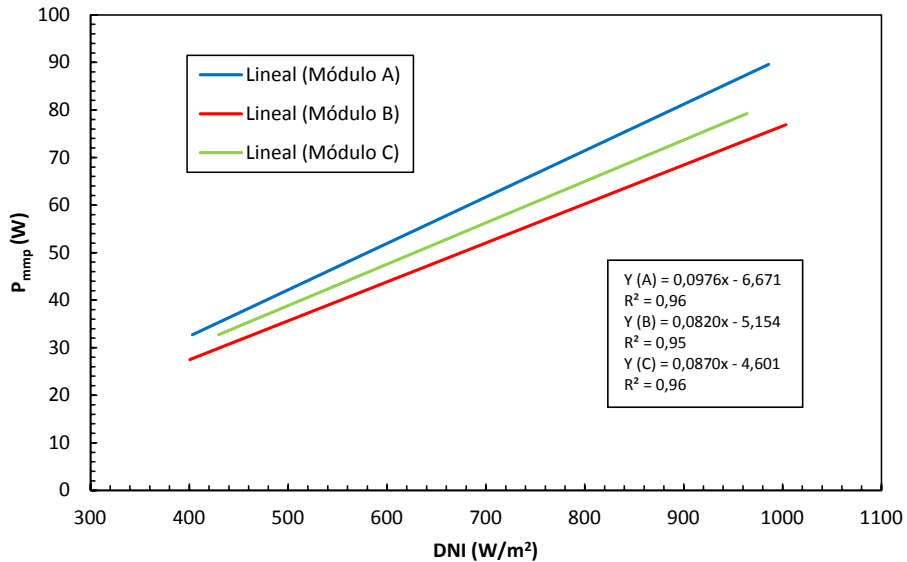


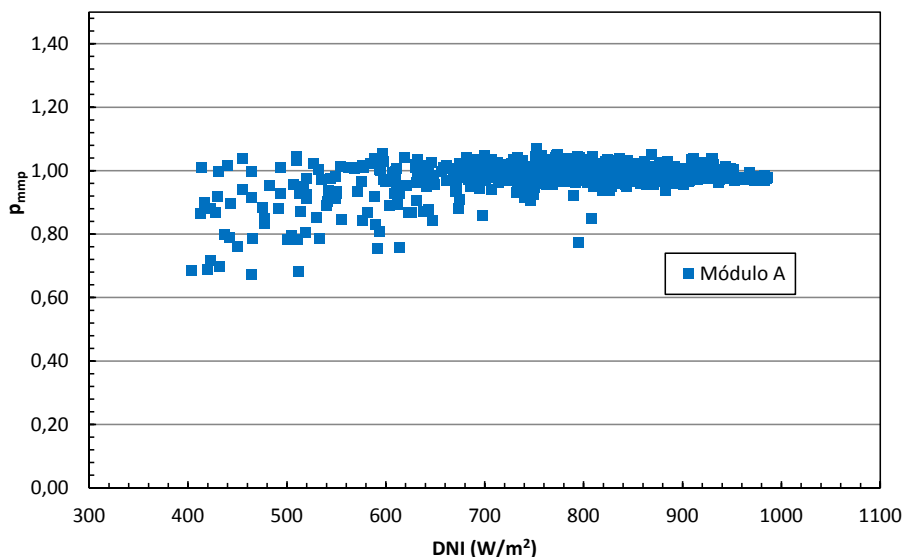
Figura 4.13:  $P_{nmp}$  versus DNI para el módulo C para radiaciones mayores de 400 W/m<sup>2</sup>.



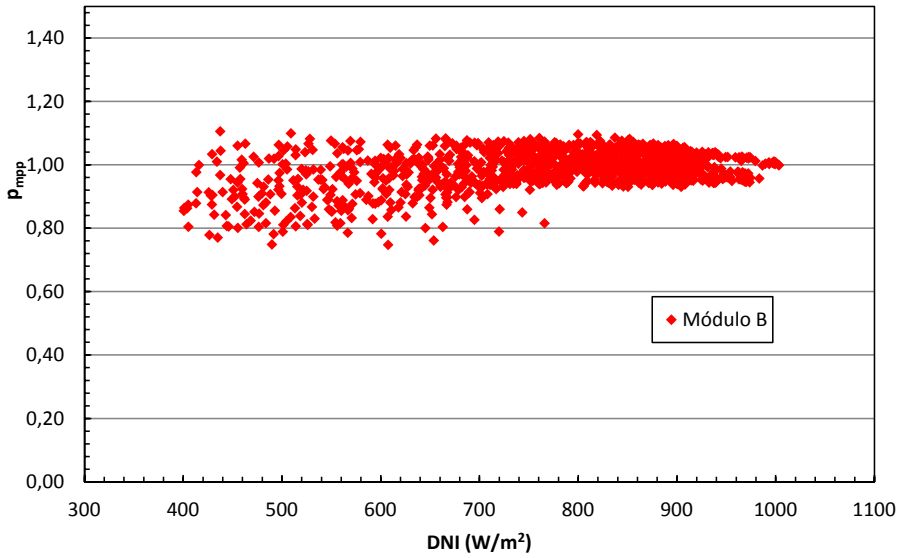
**Figura 4.14.**  $P_{mpp}$  versus DNI para los tres módulos estudiados para radiaciones mayores de 400  $W/m^2$ .

A pesar de la posible influencia de otros parámetros externos en el comportamiento de los módulos, los resultados muestran un gran comportamiento lineal con la DNI. Esto sugiere que, un modelo matemático basado únicamente en la relación entre la DNI y la potencia máxima podría tener precisión suficiente para predecir el punto de máxima potencia de un módulo CPV. Según esta idea, normalizando la  $P_{mpp}$  siguiendo la ecuación 4.2, a una  $DNI^*$  y a una  $P_{mpp}^*$  determinada, el resultado debería ser una línea centrada en 1. Las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 representan la potencia normalizada a 900  $W/m^2$  de DNI para los tres módulos bajo estudio. Los valores de  $P_{mpp}^*$  a 900  $W/m^2$  para cada uno de los módulos fueron tomados de las tablas 4.3, 4.4 y 4.5, y calculados gracias al método de estratificación descrito en el Anexo I, como se vio en la primera sección del capítulo. Pero, tal y como se muestra en las figuras comentadas, la posibilidad de describir el sistema basándose únicamente en una corrección de la DNI es sólo consistente para los niveles de radiación comprendidos entre 700 y 900  $W/m^2$ , aproximadamente, ya que sólo para este rango de DNI, la potencia normalizada se encuentra centrada en 1. Para niveles de DNI más bajos, se comprueba cómo, a medida que ésta decrece la potencia normalizada se aleja de la unidad. La misma tendencia puede observarse a niveles de radiación mayores de 900  $W/m^2$ , aunque en menor medida. Esto sugiere que, un modelo basado únicamente en la

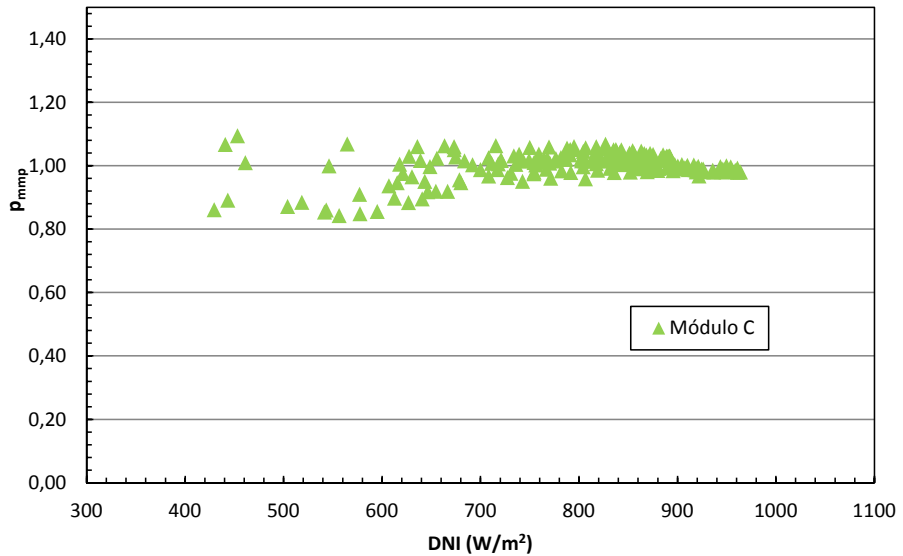
DNI no va a reproducir con suficiente precisión los datos medidos, por lo que también debe estudiarse la influencia de otros parámetros atmosféricos como la temperatura o el espectro, que serán objeto de estudio en los siguientes apartados.



**Figura 4.15:**  $P_{mpp}$  versus DNI normalizada a  $900 \text{ W/m}^2$  y al valor obtenido de  $P_{mpp}^*$  para el módulo A obtenido gracias al método de estratificación a dicha DNI.



**Figura 4.16:**  $P_{mpp}$  versus DNI normalizada a  $900 \text{ W/m}^2$  y al valor obtenido de  $P_{mpp}^*$  para el módulo B obtenido gracias al método de estratificación a dicha DNI.



**Figura 4.17:**  $P_{mpp}$  versus DNI normalizada a  $900 \text{ W/m}^2$  y al valor obtenido de  $P_{mpp}^*$  para el módulo C obtenido gracias al método de estratificación a dicha DNI.

4.2.3. Influencia de la temperatura del aire

De igual forma que la radiación incidente, la temperatura también fue objeto de estudio en el capítulo anterior, demostrándose su influencia en el comportamiento de las células MJ y por tanto, en el comportamiento de un módulo CPV. La influencia de la temperatura en un módulo CPV es un factor importante a tener en cuenta para explicar su comportamiento, como ha sido demostrado en diversos estudios<sup>15,16,17,18</sup>.

Como se ha comentado, el objetivo es encontrar un modelo basado en la temperatura del aire, y no en la temperatura del módulo, por lo que en esta sección se va a estudiar la influencia de ésta sobre la potencia máxima de salida de los módulos CPV. Debido a que para el módulo C no se dispone del número suficiente de datos, el estudio de la influencia de la temperatura del aire se centrará en los módulos A y B.

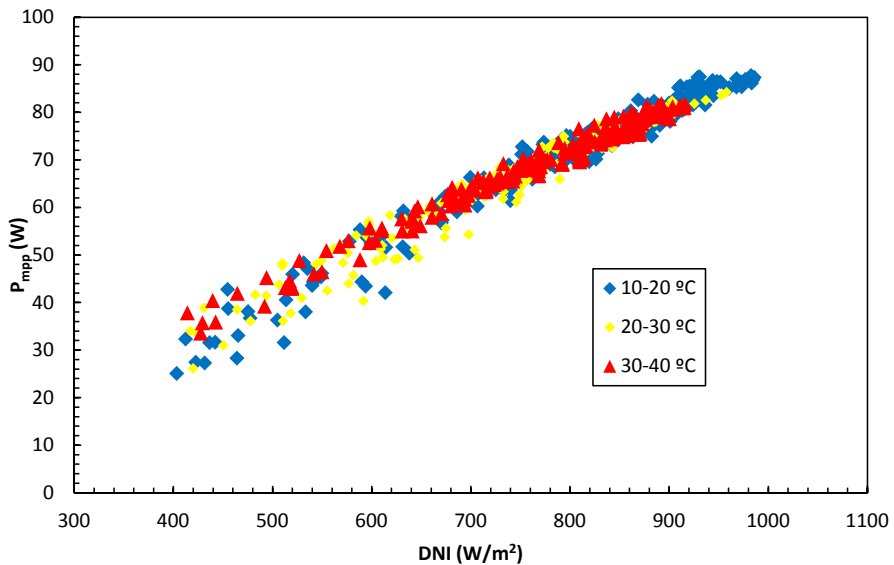
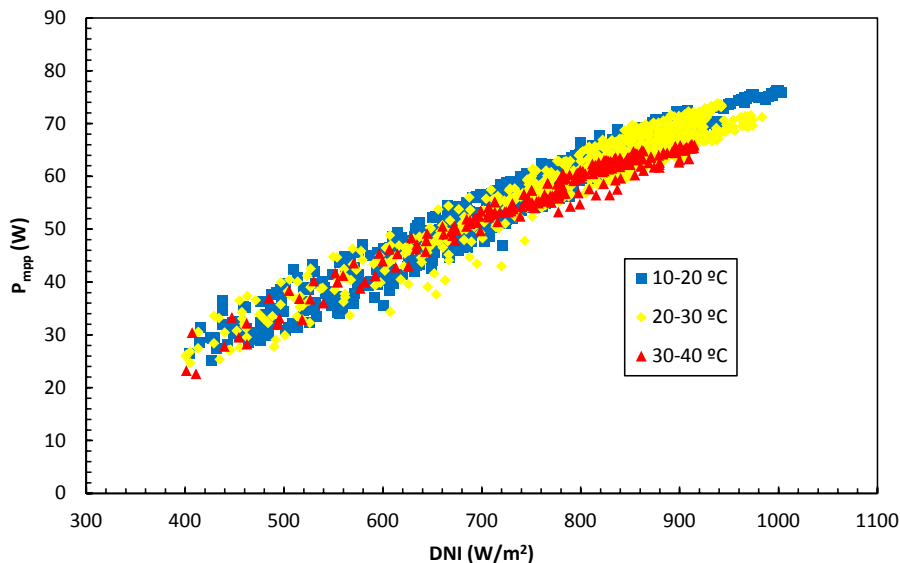


Figura 4.18:  $P_{mpp}$  versus DNI clasificado por temperatura para el módulo A.



**Figura 4.19:**  $P_{mpp}$  versus DNI clasificado por temperatura para el módulo B.

Las figuras 4.18 y 4.19 muestran la  $P_{mpp}$  frente a la DNI, clasificada por intervalos de temperatura para poder mostrar la influencia de la temperatura del aire en el comportamiento de los módulos CPV bajo estudio. Los rangos de temperatura del aire, en los que se va a clasificar la potencia, son: de 10 a 20 °C, de 20 a 30 °C y de 30 a 40 °C. La primera conclusión que puede sacarse de las gráficas es que la temperatura del aire, en primera aproximación, puede considerarse despreciable para los rangos de estudio<sup>19</sup>, exceptuando el rango de temperaturas de 30 a 40 °C a alta DNI del módulo B, donde si se aprecia como el punto de máxima potencia decrece. Para el resto de intervalos de temperatura estudiados, en ambos módulos no se aprecia diferencia en cuanto a la potencia de salida para ninguna de las DNI mostradas.

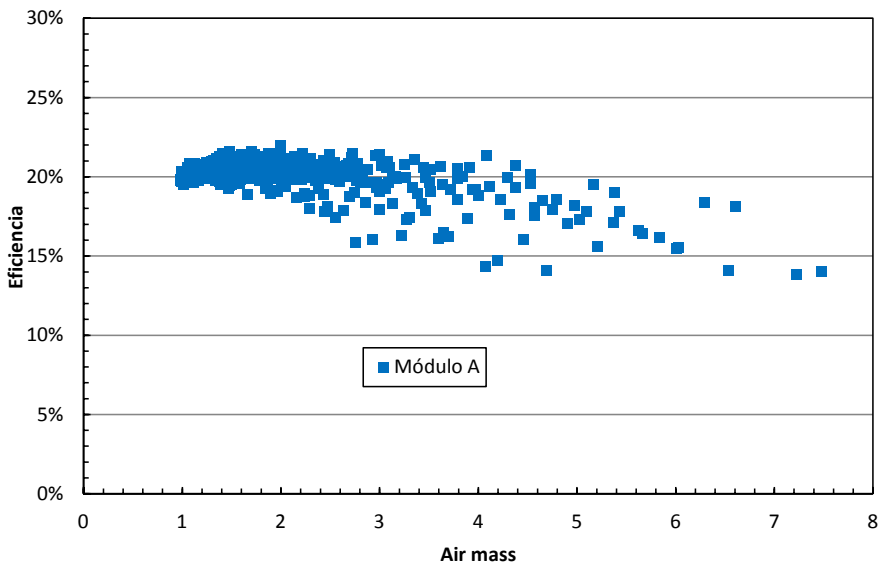
Sin embargo, a pesar de esta conclusión, tal y como se vio en el capítulo anterior, además de la temperatura, las células multiunión también se veían influenciadas por el espectro, por lo que los módulos CPV también deberían mostrar dicha influencia. En este apartado no se ha realizado ninguna corrección del espectro, que podría tener una influencia importante sobre la potencia máxima de salida de los módulos, por lo que este análisis debe tomarse como un primer acercamiento en el estudio de la influencia de la temperatura del aire en el punto de máxima potencia de los

módulos CPV. Para estudiar la influencia de la temperatura del aire de forma individual es necesario separar, tanto como sea posible, la influencia espectral de la temperatura del aire. Esto se realizará en el apartado 4.2.5.

#### 4.2.4. Influencia del espectro

Como se demostró en el capítulo anterior, las células MJ están influenciadas de forma importante por el espectro incidente. Debido a esto, los módulos CPV también muestran una importante influencia espectral, que debe ser objeto de estudio para poder comprender su comportamiento en condiciones reales de funcionamiento<sup>20,21,22,23,24</sup>.

La principal influencia del espectro viene dada por el air mass. Esta es sólo una aproximación del espectro solar, sin embargo, a pesar de la influencia de otros parámetros atmosféricos en el espectro solar, como el agua precipitable o los aerosoles<sup>25</sup>, ésta es considerada como una buena aproximación y numerosos esfuerzos para evaluar la influencia espectral en los módulos CPV van en esta dirección<sup>26,27,28</sup>.



**Figura 4.20:** Eficiencia versus AM para el módulo A.

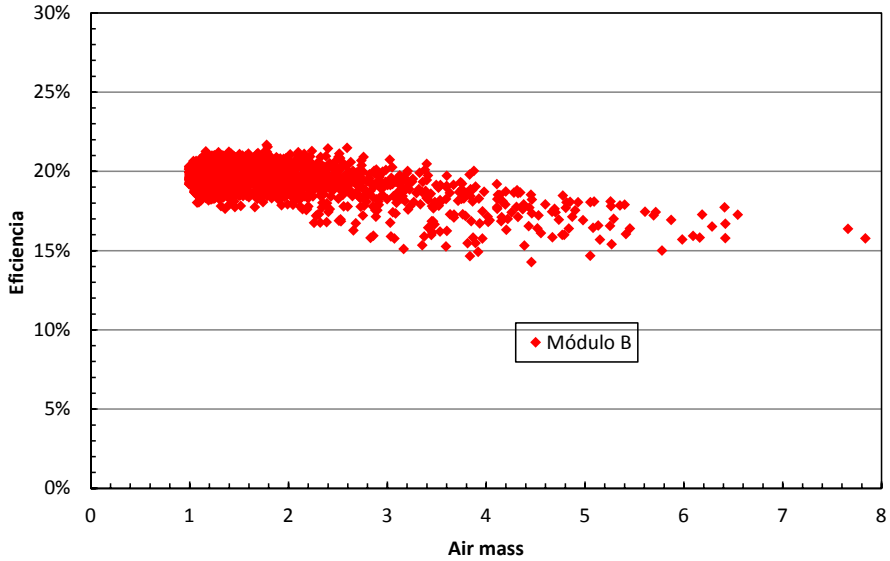


Figura 4.21: Eficiencia versus AM para el módulo B.

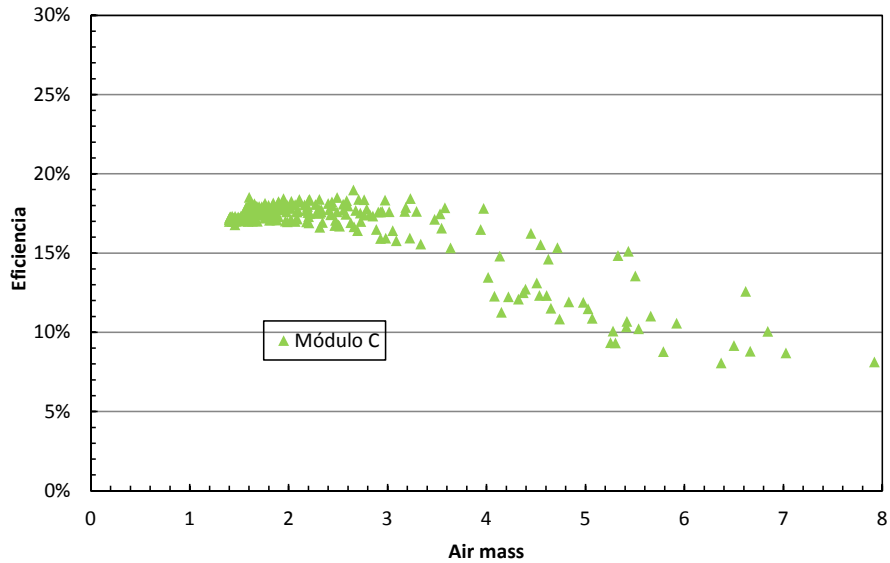


Figura 4.22: Eficiencia versus AM para el módulo C.

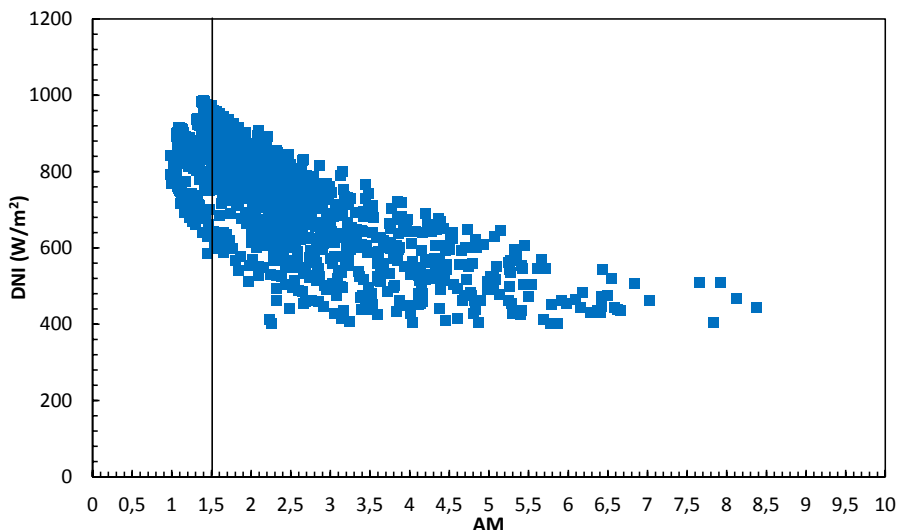
Las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 muestran la eficiencia de los módulos frente al air mass para poder estudiar su influencia en la salida de un módulo CPV. El air mass ha sido calculado gracias a la ecuación aportada por Kasten and Young en 1989<sup>3</sup>. Esta

ecuación nos permite calcular el AM a una altura determinada. En este caso, el sistema experimental se encuentra situado a 452 metros sobre la altura del mar, altura que se ha tenido en cuenta en el cálculo del air mass.

La principal conclusión que se puede obtener de las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 es que la eficiencia decrece de forma importante aproximadamente a partir de un AM mayor de 2. Las eficiencias de los módulos A y C muestran una ligera tendencia decreciente a medida que se acercan a un AM próximo a 1, aunque en primera aproximación, la eficiencia se podría considerar constante para  $AM \leq 2$ . Esto se aprecia de forma mucho más clara para el módulo B.

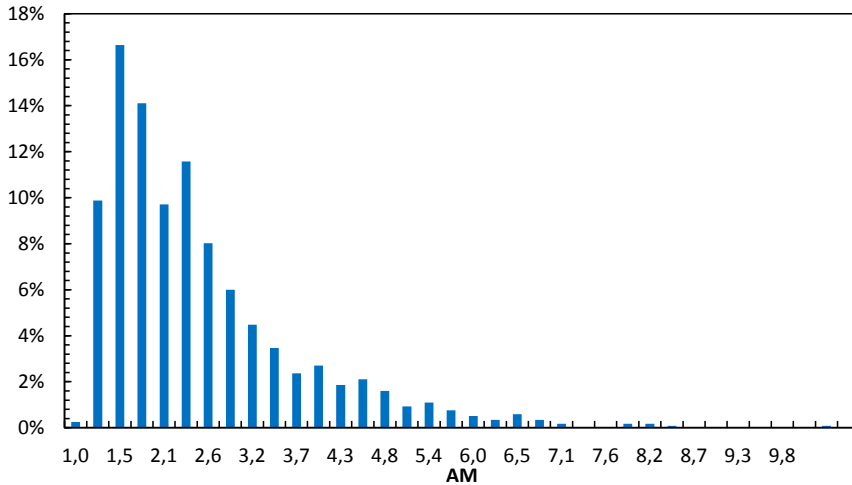
En los datos mostrados en las figuras 4.20 a 4.22 no se ha realizado ninguna corrección con la temperatura. La temperatura del aire puede tener influencia en la eficiencia, y por lo tanto en la potencia de salida de los módulos. Igual que en el apartado anterior, este análisis debe tomarse como un primer paso para estudiar la influencia del espectro, o del AM, en los módulos CPV. Para estudiar la influencia de este parámetro de forma individual es necesario separar, tanto como sea posible, la influencia espectral de la temperatura del aire. Como se ya se comentó en el apartado anterior, esto se llevará a cabo más adelante.

Va a ser también interesante, realizar en este apartado, un análisis sobre la distribución del air mass y su relación con la DNI. La figura 4.22 representa la relación entre el AM y la DNI durante el año de medida. En la figura se observa como el valor de DNI sigue una tendencia creciente a medida que la masa del aire decrece. Realizando un estudio detallado de las medidas, se calcula que aproximadamente el 50% de la energía directa recibida se obtiene para un  $AM \leq 2$ , rango para el que los módulos CPV no parecían mostrar influencia con el AM. Otra conclusión interesante, que se puede obtener de la figura, es que el valor de DNI máximo obtenido se encuentra muy cerca del AM1,5. Esto justificaría el hecho de que las células MJ y los módulos CPV estén optimizados para dicho espectro<sup>1,6</sup>.



**Figura 4.22:** Resultados obtenidos para DNI versus AM a lo largo del año de medidas.

Otro análisis interesante que puede hacerse es representar el histograma de todos los valores de AM obtenidos durante el año de medida, para estudiar su distribución. En la figura 4.23 se muestran los resultados obtenidos. La principal conclusión que se obtuvo de las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 fue que un  $AM \leq 2$  no tenía, en primera aproximación, influencia en la salida de los módulos CPV. Es interesante saber qué porcentaje representa este intervalo respecto al total de valores medidos. Tomando todos los valores medidos a lo largo del año, se obtiene que aproximadamente el 50% de los datos se encuentran en este rango. Cabe destacar que el máximo porcentaje se obtiene para  $AM = 1,5$ , en concreto un 16,6% de todas las medidas realizadas, lo cual, igual que lo comentado anteriormente, justificaría porque los módulos y células MJ están optimizadas para ese espectro o air mass.



**Figura 4.23:** Porcentaje de los valores de AM para el año de medidas.

#### 4.2.5. Estudio conjunto de los parámetros atmosféricos

Como se ha visto hasta ahora, teniendo en cuenta el filtrado del viento comentado en el apartado 4.2.1, los parámetros que se han considerado decisivos para entender el funcionamiento de un módulo CPV son: la DNI, la temperatura del aire y el air mass. Hasta ahora, el estudio realizado de la influencia de cada uno de ellos en la potencia de salida de un módulo CPV, ha sido de forma individual. En este apartado se va a realizar un estudio conjunto de estos parámetros que permita sacar las últimas conclusiones y de esta forma definir el método matemático que se plantea en la siguiente sección.

Para tratar de evaluar la posible influencia del air mass en la salida de los módulos CPV, de forma independiente al resto de los parámetros, se representa la eficiencia de los módulos estudiados frente al air mass, clasificado éste por rangos de temperaturas del aire que van de 10 a 20° C, de 20 a 30° C y de 30 y 40° C, figuras 4.24 y 4.25. Debido a que no se tienen datos suficientes del módulo C como para poder extraer conclusiones concluyentes, sólo se tendrán en cuenta los módulos A y B, aunque las conclusiones extraídas del análisis de éstos serán extensibles al módulo C.

Como se puede ver, en un primer análisis de las figuras 4.24 y 4.25, la eficiencia parece mantenerse constante para  $AM \leq 2$  para los rangos de temperatura estudiados,

aunque en la figura 4.24 se aprecia como para el rango de temperaturas entre 30 y 40° C la eficiencia tiene una ligera tendencia decreciente para valores de AM cercanos a 1. Esto sugiere que para valores de  $AM < 1$  esta aproximación puede que no sea válida, sin embargo, como se puede extraer de la figura 4.23, sólo el 0,3% de los valores de AM a lo largo del año en Jaén tenían un valor de AM menor de 1, lo que permite hacer esta afirmación extensible para todos los valores de  $AM \leq 2$ . Lo que si se aprecia en ambos módulos es como para valores de  $AM > 2$  la eficiencia decrece de forma clara con el air mass, aunque no de forma lineal, probablemente debido a otros factores espectrales de segundo orden<sup>25</sup>.

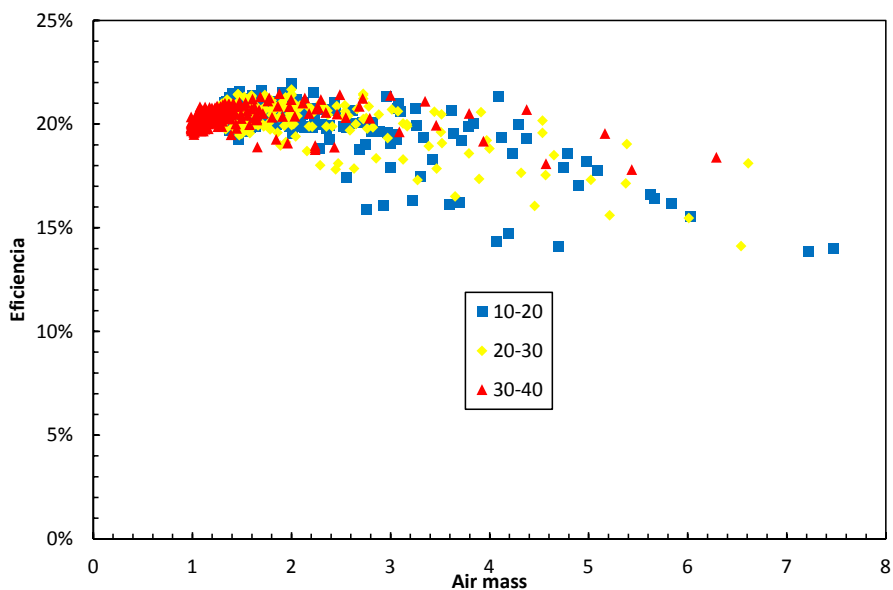
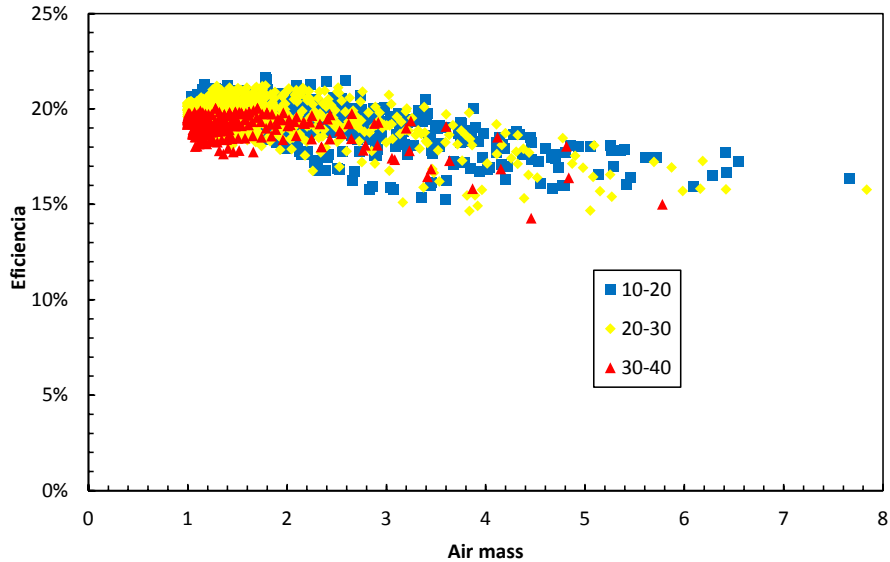


Figura 4.24: Eficiencia versus AM para el módulo A clasificado por intervalos de temperatura.



**Figura 4.25:** Eficiencia versus AM para el módulo B clasificado por intervalos de temperatura.

Para demostrar que la eficiencia para  $AM \leq 2$  se mantiene constante, en primera aproximación, y por lo tanto poder considerar que la potencia de salida no se ve influenciada por el air mass en dicho rango, se han calculado los valores promedios de la eficiencia para distintos rangos de AM desde 0,9 a 2. En concreto los rangos de AM considerados fueron: de 0,9 a 1,3, de 1,3 a 1,6 y de 1,6 a 2,0. Además, estos cálculos se hicieron para cada uno de los intervalos de temperatura considerados en las figuras 4.24 y 4.25, con el objeto de separar la influencia de la temperatura del aire y la del air mass. Las tablas 4.13 y 4.14 muestran los resultados obtenidos para los módulos A y B respectivamente. La tabla 4.13 muestra como los valores de la eficiencia calculados se pueden considerar constantes para los distintos intervalos de AM. Los valores de eficiencia para el rango de AM de 0,9 a 1,3 no se han podido calcular para el módulo A para las temperaturas entre 10 y 30° C, ya que no se dispone de datos en ese rango de AM para dichas temperaturas. Además de esto, cabe destacar como la temperatura del aire no parece influir en la eficiencia, en el rango de AM considerado, ya que las eficiencias también se pueden considerar constantes en los rangos de temperatura estudiados. La tabla 4.14 muestra el mismo análisis para el módulo B. Al igual que en el módulo A, la eficiencia se puede considerar constante para cada uno de los intervalos de AM estudiados entre 0,9 y 2. Sin embargo, a diferencia del módulo A, en este caso si existe una dependencia con la temperatura del aire, ya que la eficiencia a altas

aproximadamente un 1% menor que a bajas temperaturas. Esta diferencia del comportamiento de ambos módulos frente a la temperatura del aire será estudiada a lo largo de este apartado.

Air mass	Eficiencia (%)		
	T = 10-20 °C	T = 20-30 °C	T = 30-40 °C
0,9-1,3	---	---	20,4
1,3-1,6	20,4	20,5	20,6
1,6-2,0	20,6	20,5	20,5

**Tabla 4.13:** Eficiencia para distintos intervalos de air mass entre 0,9 y 2 para el módulo A. Los resultados se han clasificado en distintos rangos de temperatura para poder evaluar de forma individual la influencia de AM.

Air mass	Eficiencia (%)		
	T = 10-20 °C	T = 20-30 °C	T = 30-40 °C
0,9-1,3	20,2	19,6	19,1
1,3-1,6	20,1	19,6	19,1
1,6-2,0	20,0	19,8	19,3

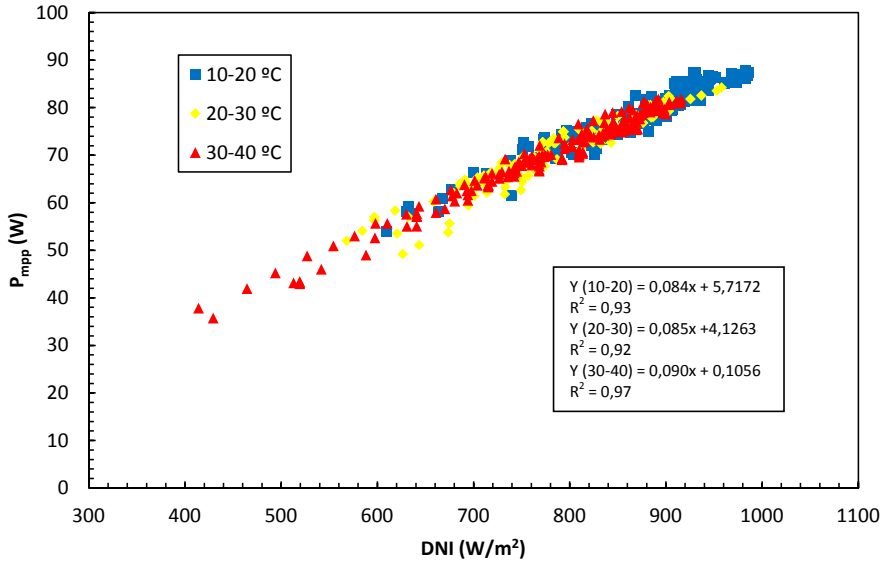
**Tabla 4.14:** Eficiencia para distintos intervalos de air mass entre 0,9 y 2 para el módulo B. Los resultados se han clasificado en distintos rangos de temperatura para poder evaluar de forma individual la influencia de AM.

El NREL (National Renewable Energy Laboratory), en<sup>14</sup>, estableció una serie de directrices sobre como estudiar la salida de un módulo o sistema CPV. Respecto al AM, plantea que para valores de un AM mayor que 2 el sistema pierde potencia de manera importante, mientras que para valores de AM menores de 2 no se aprecia una importante influencia de éste. Esto coincide con las conclusiones a las que se ha llegado con el estudio realizado, donde se muestra que para  $AM \leq 2$  la salida de un módulo CPV no estaría influenciada por el air mass, mientras que para  $AM > 2$  el sistema pierde eficiencia y por tanto potencia. Esto sugiere que un modelo para predecir los valores de potencia medidos tendría que introducir una corrección en AM para valores mayores de 2, mientras que ésta no sería necesaria para valores menores o iguales a 2.

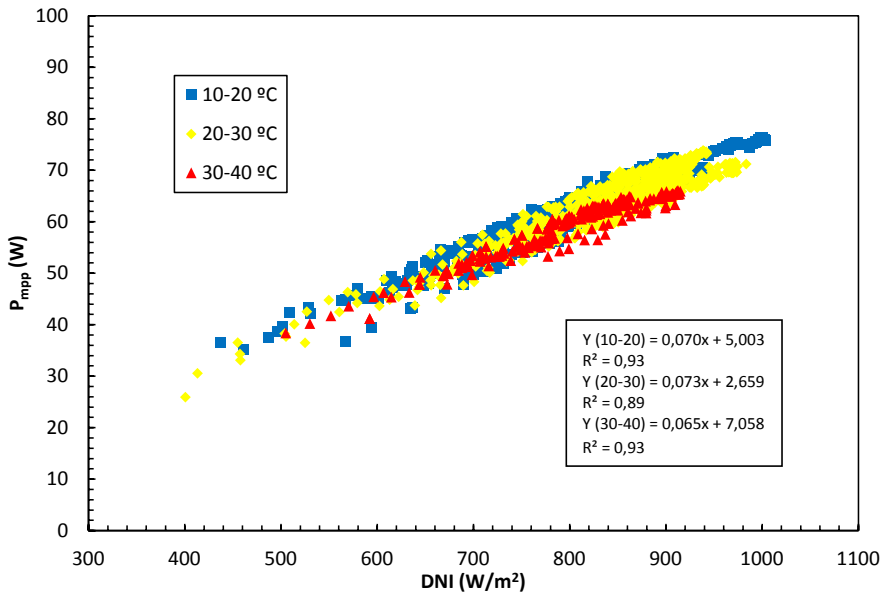
Con respecto a la temperatura de aire, como se ha comentado en el apartado 4.2.3, ésta puede jugar un papel importante en los parámetros eléctricos característicos de un módulo CPV. Sin embargo, debido a que no se realizó ningún tipo de corrección espectral, la influencia de la temperatura del aire en la salida de un módulo CPV no fue cuantificada de forma independiente al espectro. A la luz de los resultados obtenidos durante el estudio de la influencia del AM, se va a proceder a estudiar de nuevo y

cuantificar la influencia de la temperatura del aire en los módulos utilizados en el estudio. Hay que señalar, que igual que en el caso anterior, debido a que se carece de suficientes datos del módulo C, el estudio de la influencia de la temperatura sólo se llevará a cabo sobre los módulos A y B, aunque las conclusiones finales serán también aplicables a dicho módulo, es decir, la necesidad, o no, de introducir una corrección con la temperatura del aire en el modelo matemático que se propondrá.

El primer paso para estudiar la influencia de la temperatura del aire es representar la potencia máxima medida frente a la DNI para los módulos bajo estudio, figuras 4.26 y 4.27. Hay que tener en cuenta que sólo se ha considerado los datos que cumplen la condición  $AM \leq 2$ , para minimizar efectos espectrales y de esta forma poder cuantificar de forma individual la influencia de la temperatura. En las figuras 4.26 y 4.27 también se muestran las ecuaciones lineales obtenidas para cada uno de los intervalos de temperatura estudiados. Gracias a estas ecuaciones se puede obtener la potencia para cada uno de los rangos de temperatura estudiados, a los niveles de DNI deseados. Se ha calculado la potencia para radiaciones directas de 500, 600, 700, 800 y 900  $W/m^2$ , en cada uno de los rangos de temperatura estudiados. Las figuras 4.28 y 4.29 muestran gráficamente los valores de potencia obtenidos para las DNI comentadas en cada intervalo de temperatura contemplado.



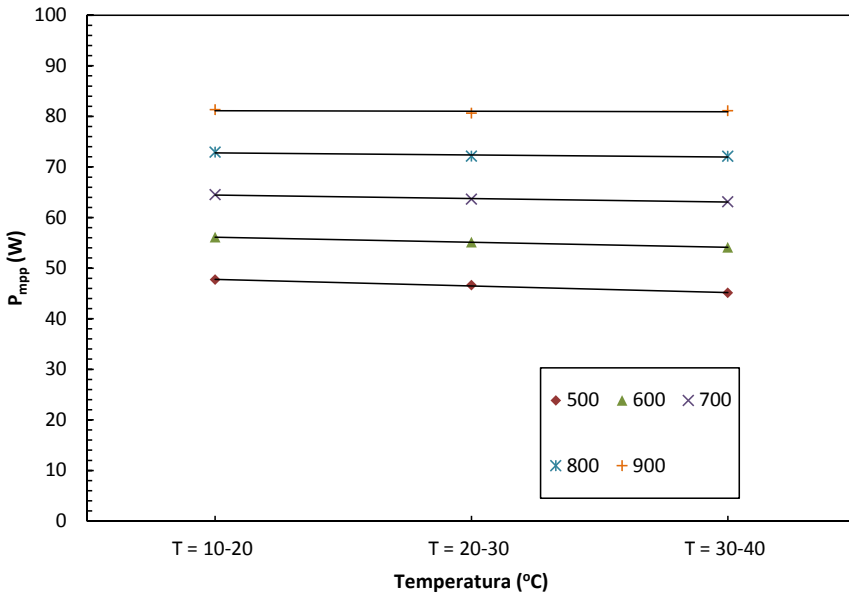
**Figura 4.26:**  $P_{mpp}$  versus DNI para el módulo A clasificado por temperaturas. Todas las medidas son filtradas para  $AM \leq 2$  para minimizar efectos espectrales.



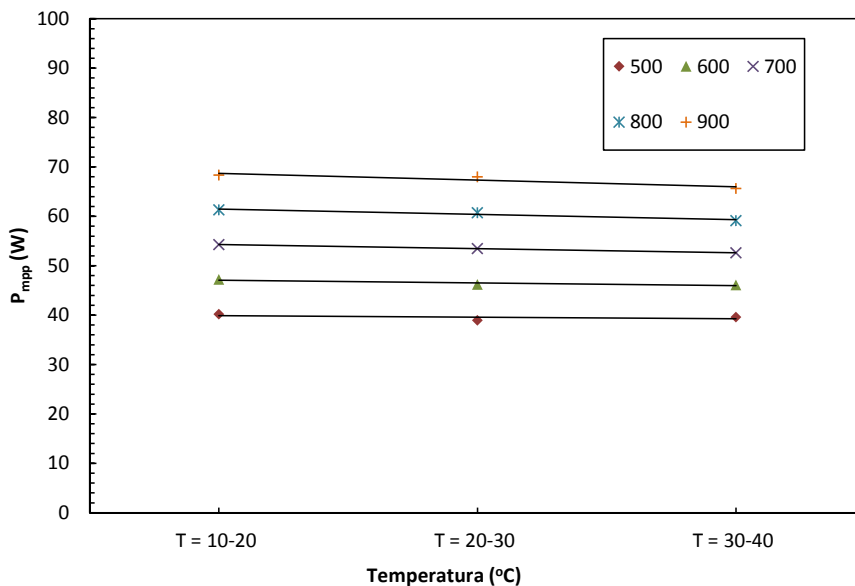
**Figura 4.27:**  $P_{mpp}$  versus DNI para el módulo B clasificado por temperaturas. Todas las medidas son filtradas para  $AM \leq 2$  para minimizar efectos espectrales.

Tanto la figura 4.28 como la 4.29 muestran como la potencia, para todos las DNI estudiadas, decrece a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo esta dependencia con la temperatura del aire es diferente para cada módulo. Así, para el módulo A, figura 4.28, la influencia de la temperatura del aire en la potencia máxima parece decrecer a medida que aumenta el valor de DNI considerado. Por el contrario, el módulo B, figura 4.29, muestra el comportamiento contrario, es decir, una mayor influencia de la temperatura en la potencia máxima a medida que aumentamos la DNI. Además de representar de forma gráfica la relación entre la potencia máxima y la temperatura, las figuras 4.28 y 4.29 permiten calcular las pendientes de las relaciones lineales obtenidas entre las potencias y la DNI, para los tres intervalos de temperatura considerados. El objetivo es definir unos coeficientes de temperatura para la potencia, que expresen la variación media de la potencia cada 10° C. El cálculo de estos coeficientes de temperatura sigue la ecuación:

$$\delta = \frac{1}{P_{mpp}} \frac{\Delta P_{mpp}}{\Delta T} \text{ Ecuación 4.4}$$



**Figura 4.28:**  $P_{mpp}$  para el módulo A para los intervalos de temperatura estudiados en la figura 4.26. Los valores de  $P_{mpp}$  han sido calculados con las ecuaciones lineales obtenidos en dicha figura a distintos niveles de DNI con el objetivo de estimar la influencia de la temperatura. En concreto para niveles de DNI de 500, 600, 700, 800, y 900  $W/m^2$ .



**Figura 4.29:**  $P_{mpp}$  para el módulo B para los intervalos de temperatura estudiados en la figura 4.27. Los valores de  $P_{mpp}$  han sido calculados con las ecuaciones lineales obtenidos en dicha figura a distintos niveles de DNI con el objetivo de estimar la influencia de la temperatura. En concreto para niveles de DNI de 500, 600, 700, 800, y 900  $W/m^2$ .

Gracias a la ecuación 4.4 y a las pendientes obtenidas de la representación gráfica de la potencia de las figuras 4.28 y 4.29, se pueden calcular los coeficientes de temperatura de la potencia para cada uno de los niveles de DNI considerados. Esta definición de los coeficientes de temperatura se basa en la variación media de la potencia cada diez grados, por lo que no se va a poder normalizar la potencia a un valor de temperatura determinado, sino a un intervalo. En este caso se ha normalizado la potencia al rango de temperaturas comprendidas entre 20°C y 30°C, ya que como se vio en la figura 4.7, en el histograma que representaba la distribución de la temperatura del aire en Jaén a lo largo de un año, la mayor parte del tiempo el sistema está trabajando en este rango.

Las tablas 4.15 y 4.16 recogen los valores de las potencias representadas en las figuras 4.28 y 4.29, las pendientes obtenidas para cada nivel de DNI y los coeficientes de temperatura, normalizados al intervalo de temperaturas comprendidas entre 20 y 30° C, calculados gracias a la ecuación 4.4. Como se puede observar, los valores de los coeficientes de temperatura de la potencia para los módulos estudiados son muy similares. Para el módulo A, los valores, más alto y más bajo, obtenidos para el

coeficiente de temperatura son de  $-2,8\%/10^{\circ}\text{C}$  y  $-0,1\%/10^{\circ}\text{C}$  respectivamente, mientras que para el módulo B, su valor máximo es de  $-2\%/10^{\circ}\text{C}$  y el mínimo de  $-0,8\%/10^{\circ}\text{C}$ . Los valores promedio de los coeficientes de temperatura para los rangos de DNI considerados son de  $-1,3\%/10^{\circ}\text{C}$  y  $-1,5\%/10^{\circ}\text{C}$  para los módulos A y B respectivamente, lo que parece indicar una mayor influencia de la temperatura en el módulo B. A pesar de que los valores máximos, mínimos y medios de los coeficientes de temperatura para la potencia de ambos módulos son similares, se aprecia que su evolución con la DNI es diferente. El módulo A pasa de un coeficiente de temperatura de  $-2,8\%/10^{\circ}\text{C}$  a  $500\text{ W/m}^2$  a otro de  $-0,1\%/10^{\circ}\text{C}$  a  $900\text{ W/m}^2$ , el módulo B pasa de un coeficiente de temperatura de  $-0,8\%/10^{\circ}\text{C}$  a  $500\text{ W/m}^2$  a otro de  $-2,0\%/10^{\circ}\text{C}$  a  $900\text{ W/m}^2$ . Esto sugiere que la potencia generada por el módulo A está más influenciada por la temperatura del aire a bajos niveles de radiación que a altos, mientras que para el módulo B se obtiene el resultado contrario, es decir, una mayor influencia de la temperatura del aire a más altas radiaciones.

DNI ( $\text{W/m}^2$ )	$P_{mpp}$ (W)			Pendiente $\frac{\Delta P_{mpp}}{\Delta T}$	$\delta_{10-20}$ ( $\%/10^{\circ}\text{C}$ )
	T = 10-20 °C	T = 20-30 °C	T = 30-40 °C		
500	47,7	46,6	45,1	-1,306	-2,8
600	56,1	55,1	54,1	-1,006	-1,8
700	64,5	63,6	63,1	-0,758	-1,1
800	72,9	72,1	72,1	-0,406	-0,6
900	81,3	80,6	81,1	-0,106	-0,1

**Tabla 4.15:** Valores de  $P_{mpp}$  para el módulo A representados en la figura 4.20 y de los coeficientes de temperatura  $\delta$  normalizados al valor obtenido para el intervalo de temperaturas 20-30 °C. Los coeficientes de temperatura han sido calculados gracias a la pendiente de las relaciones lineales obtenidas en la figura 4.28 y a la ecuación 4.4.

DNI ( $\text{W/m}^2$ )	$P_{mpp}$ (W)			Pendiente $\frac{\Delta P_{mpp}}{\Delta T}$	$\delta_{10-20}$ ( $\%/10^{\circ}\text{C}$ )
	T = 10-20 °C	T = 20-30 °C	T = 30-40 °C		
500	40,2	38,9	39,6	-0,297	-0,8
600	47,0	46,2	46,1	-0,562	-1,2
700	54,0	53,5	52,6	-0,827	-1,5
800	61,0	60,7	59,1	-1,092	-1,8
900	68,0	68,0	65,6	-1,357	-2,0

**Tabla 4.16:** Valores de  $P_{mpp}$  para el módulo A representados en la figura 4.21 y de los coeficientes de temperatura  $\delta$  normalizados al valor obtenido para el intervalo de temperaturas 20-30 °C. Los coeficientes de temperatura han sido calculados gracias a la pendiente de las relaciones lineales obtenidas en la figura 4.29 y a la ecuación 4.4.

La variación de los coeficientes de temperatura con la radiación y los distintos resultados obtenidos puede tener distintas causas. Por un lado, como se demostró en el capítulo 3, el incremento de temperatura en una célula MJ produce una disminución en

la potencia generada por ésta. Esto hace que la refrigeración de un módulo CPV tenga una gran importancia, ya que la temperatura alcanzada por la célula trabajando a unas determinadas condiciones podría diferir dependiendo del tipo de refrigeración que tenga el módulo CPV<sup>6</sup>. Desde este punto de vista, podría decirse que la refrigeración del módulo A es mejor, ya que a altas radiaciones, cuando es lógico esperar una mayor temperatura alcanzada por la célula, la influencia de la temperatura es menor, lo que produciría los menores coeficientes calculados. El módulo B, por el contrario, tendría una peor refrigeración ya que muestra un peor comportamiento a altas radiaciones, mayores coeficientes de temperatura. Sin embargo, con este único factor es difícil de justificar porque a bajos niveles de radiación el módulo A se encuentra más afectado por la temperatura del aire, ya que, cabe esperar que si la refrigeración a altas radiaciones es mejor también lo debería ser a radiaciones más bajas. La diferencia de tendencia encontrada en el comportamiento de ambos módulos por lo tanto, podría explicarse, no sólo por la diferente refrigeración de ambos módulos, sino también por la influencia de otros factores: la eficiencia óptica de las lentes, su influencia en el espectro incidente en la célula MJ, y/o a la expansión térmica de los módulos, que podría provocar que algunas células estén ligeramente fuera de su posición ideal en la focal de la lentes en función de las temperaturas alcanzadas. Estos factores pueden afectar de distinta manera a los módulos bajo estudio, lo que podría explicar el diferente comportamiento entre ambos<sup>11,16,29</sup>.

A la luz de los resultados obtenidos para los coeficientes de temperatura y de su relación con la DNI se puede explicar el comportamiento de la eficiencia, mostrado en las tablas 4.13 y 4.14. Como se vio en la tabla 4.13, el módulo A no se veía influenciado por la temperatura ambiente, por el contrario, el módulo B, tabla 4.14, sí se veía influenciado por ésta. La figura 4.22 indicaba que la DNI era más alta a medida que el AM decrecía. También se puso de manifiesto, como el 50% de la energía incidente recibida se encontraba para valores de  $AM \leq 2$ . Esto quiere decir que para  $AM \leq 2$  los módulos CPV están trabajando en su mayor parte a las más altas radiaciones. Como muestra la tabla 4.15, la influencia de la temperatura a altas radiaciones en el módulo A es muy pequeña, llegando incluso a poder considerarse despreciable, con un coeficiente de temperatura de  $-0,1\%/10^{\circ}\text{C}$  a  $900 \text{ W/m}^2$ . Esto explicaría por qué no se encuentra influencia en las eficiencias calculadas en la tabla 4.13, ya que como se comentó el

sistema se encontraría trabajando a alta radiación. Por el contrario la tabla 4.16 muestra como la influencia de la temperatura para el módulo B a altas radiaciones no se puede considerar despreciable, de hecho la mayor influencia se encuentra a  $900 \text{ W/m}^2$  con un coeficiente de temperatura de  $-2\%/10^\circ\text{C}$ . Esto explicaría porque la eficiencia, calculada en la tabla 4.14, para el módulo B si se ve influenciada por la temperatura, ya que éste se encuentra trabajando a altas radiaciones para los rangos de AM en los que fue estudiada la eficiencia, según lo mostrado en la figura 4.22.

En cualquier caso, a pesar de la diferencia de comportamiento, los módulos muestran influencia con la temperatura en mayor o menor grado. Esto sugiere, que al igual que para el air mass para valores mayores de 2, un modelo matemático que pretenda reproducir la potencia de salida de los módulos CPV del estudio, debe introducir una corrección con la temperatura del aire.

### **4.3. Modelo matemático propuesto**

En esta sección se va a presentar un método matemático, basado en las medidas experimentales realizadas, capaz de predecir la potencia máxima de salida de los módulos estudiados. Como se comentó en el capítulo del estado del arte, existen en la actualidad modelos para la predicción de los parámetros eléctricos de un módulo CPV. Aunque fueron descritos en profundidad<sup>30,31</sup>, antes de plantear el modelo propuesto, se va a realizar un resumen de ambos.

El primero de ellos, realizado por los laboratorios Sandia, ajusta, por medio de medidas en condiciones externas de funcionamiento, una serie de parámetros que permiten predecir la característica I-V de un módulo de concentración. El método incluye correcciones con la irradiancia directa normal recibida por los módulos mediante una función que tiene en cuenta la DNI y correcciones del espectro mediante una función que evalúa la influencia espectral por medio de un polinomio de grado 4 basado en el air mass. Define además, un método para calcular los coeficientes de temperatura de los módulos, por lo que también tiene en cuenta correcciones en temperatura. El método tiene como ventaja que utiliza medidas atmosféricas, fáciles de obtener, para el ajuste de los parámetros necesarios para predecir las características I-V

y que el ajuste de estos parámetros no es complejo. Sin embargo, tiene como inconvenientes que se necesita conocer la temperatura de la célula a la que está trabajando el módulo y esa temperatura, como se recoge en el Anexo II, no es fácil de medir ni estimar, además del importante número de parámetros que se necesitan calcular para el ajuste del modelo. Debido a esto, el método presenta notables dificultades en su aplicación.

El segundo de los métodos descritos fue presentado por el Instituto Fraunhofer. Este método permite la predicción del punto de máxima potencia de un módulo CPV en condiciones reales de funcionamiento. Está basado en medidas realizadas en el exterior y en medidas realizadas en condiciones controladas de funcionamiento por medio de un simulador solar. El método introduce correcciones en DNI, gracias a medidas realizadas con un pirheliómetro, espectrales, basadas en células que monitorizan el espectro que recibe cada una de las uniones, y de temperatura, usando un módulo CPV como sensor de temperatura. El método propuesto muestra muy buenos resultados pero tiene como inconvenientes que necesita equipos de alto coste, como un simulador solar. Además, el procedimiento propuesto es complejo y necesita medidas directas, como las de las células que monitorizan el espectro, y no se basa en parámetros atmosféricos que son más fáciles de obtener.

El objetivo de este estudio es encontrar un método que permita estimar la potencia máxima de un módulo CPV basándose en parámetros atmosféricos fáciles de obtener o medir, de forma que su aplicación sea lo más versátil posible. El modelo puede tener diversas aplicaciones y ser útil para distintos propósitos, por ejemplo, ayudar al diseño y optimización de una instalación CPV o predecir la energía generada por un sistema en una localización determinada. También puede servir para la optimización de módulos CPV, ya que ayudaría a comprender como influyen los parámetros atmosféricos en el comportamiento de este tipo de módulos. Esto pondría de manifiesto bajo qué condiciones los módulos van a trabajar mejor o peor y qué cantidad de energía están dejando de producir, debido a un diseño no suficientemente optimizado para algunas de las condiciones atmosféricas en las que se verían obligados a trabajar. Además, se trata también de encontrar un modelo basado en relaciones matemáticas poco complejas para que su aplicación sea sencilla, manteniendo al máximo la precisión

del modelo. Se tratará por lo tanto de encontrar una relación óptima entre precisión y sencillez.

#### 4.3.1. Introducción del modelo

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, las células MJ están influenciadas por la DNI, la temperatura de la célula y el espectro incidente (S). Esto significa que la potencia máxima de salida de una célula MJ ( $P_{\text{célula}}$ ) va a ser función de las esas variables:

$$P_{\text{mpp,célula}} = (DNI, T_{\text{célula}}, S) \text{ Ecuación 4.5}$$

Ya que un módulo CPV está formado por células MJ además de otros elementos, un módulo CPV también va a estar influenciado, entre otros, por estos parámetros. Pero, uno de los problemas de la CPV es que la temperatura de la célula no se puede medir directamente de forma sencilla y la forma de calcularla basándose en parámetros atmosféricos como la DNI y la temperatura del aire, o la forma de estimar su influencia en los módulos CPV, está todavía bajo estudio y no es fácil de cuantificar, Anexo II<sup>32</sup>. Diversos autores han tratado de buscar relaciones entre los parámetros atmosféricos y la temperatura de la célula, sin embargo, debido a que estas relaciones dependen de las características internas de cada módulo hace que el problema sea complejo<sup>15,33,34</sup>.

Para solucionar estos problemas, diversos métodos tratan de predecir la potencia de salida o la energía de un módulo por medio de la temperatura del aire para simplificar el problema, ver Anexo II. Así, siguiendo el estándar americano, ASTM E2527<sup>35</sup>, la potencia máxima de salida de un módulo CPV ( $P_{\text{módulo}}$ ) dependería de los factores indicados en la ecuación 4.6, es decir, de la radiación directa, de la temperatura del aire y de la velocidad del viento:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = (DNI, T_{\text{aire}}, VV) \text{ Ecuación 4.6}$$

Tal y como se indicó en la ecuación 4.5, una célula MJ está influenciada por el espectro incidente y la ecuación anterior no introduce correcciones espectrales, por lo que el sistema, de forma más completa, debería estar descrito de la siguiente forma:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = (\text{DNI}, T_{\text{aire}}, \text{VV}, S) \text{ Ecuación 4.7}$$

La introducción de una corrección espectral estaría en consonancia con otros métodos destinados a estimar la potencia de salida de un módulo o sistema CPV y que intentan evaluar la influencia del espectro de distintas formas<sup>36,37,38</sup>.

La ecuación 4.7 considera las variables a tener en cuenta para predecir la potencia de un módulo CPV de una forma precisa. Sin embargo, a lo largo de este estudio, se han analizado las distintas variables de las que depende la salida de un módulo CPV y las conclusiones obtenidas de este análisis van a permitir fijar los parámetros en los que se basará el modelo matemático. De esta forma, como se comentó en el apartado 4.2.1, se han tomado velocidades de viento inferiores a 2m/s, de manera que este parámetro no influya en la salida del módulo. Además, en el apartado 4.2.4 se estudió y justificó que las variaciones espectrales pueden ser descritas basándose en el AM como única corrección, a pesar de la influencia de otros parámetros atmosféricos. Con todo esto, las variables en las que se va a basar el modelo matemático propuesto son:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = (\text{DNI}, T_{\text{aire}}, \text{AM}) \text{ Ecuación 4.8}$$

Esta expresión de la potencia de un módulo CPV en función de la DNI, la temperatura del aire y el AM, está en consonancia con resultados obtenidos a lo largo del capítulo, donde se mostró como es la DNI el principal factor que influye en la potencia de un módulo CPV. También se demostró que la temperatura del aire influye en la potencia máxima por lo que debe ser contemplada por el modelo. Respecto al air mass se obtuvieron dos conclusiones principales: que no influye en la eficiencia o potencia de salida, en primera aproximación, para  $\text{AM} \leq 2$ , y que si lo hace para  $\text{AM} > 2$ , donde decrece a medida que aumenta el AM. Debido a todo esto, un modelo

matemático que sea capaz de predecir la potencia de salida de los módulos estudiados debe tener en cuenta que:

- Es necesaria una corrección para DNI.
- Es necesario introducir una corrección para la temperatura del aire.
- La corrección espectral:
  - No es necesaria para  $AM \leq 2$ .
  - Es necesaria para  $AM > 2$ .

Según esto, el modelo propuesto para obtener la potencia de salida de los módulos estudiados va a estar descrito por dos ecuaciones:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = (DNI, T_{\text{aire}}); \text{ para } AM \leq 2 \text{ Ecuación 4.9}$$

$$P_{\text{mpp,módulo}} = (DNI, T_{\text{aire}}, AM); \text{ para } AM > 2 \text{ Ecuación 4.10}$$

La ecuación 4.9 expresa la potencia de salida de un módulo CPV para  $AM \leq 2$  en función sólo de la DNI y la temperatura del aire, mientras que la ecuación 4.10 expresa la potencia de salida de un módulo CPV para  $AM > 2$ , en este caso además de los parámetros anteriores la ecuación también va a ser función del AM.

El objetivo es tratar de encontrar un método sencillo para predecir la potencia de salida de los módulos CPV. Siguiendo la metodología planteada por numerosos métodos, referenciados a lo largo de este apartado, se tratará de reproducir los resultados experimentales por medio de ecuaciones lineales, de esta forma, la potencia de salida del modelo viene descrita por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$P_{\text{mpp,módulo}} = a_1 DNI + a_2 T_{\text{aire}} \text{ para } AM < 2 \text{ Ecuación 4.11}$$

$$P_{\text{mpp,módulo}} = b_1 DNI + b_2 T_{\text{aire}} + b_3 AM \text{ para } AM > 2 \text{ Ecuación 4.12}$$

Donde  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  representan los coeficientes lineales de las ecuaciones 4.11 y 4.12.

4.3.2. Resultados del modelo

Los coeficientes lineales del modelo propuesto, ecuaciones 4.11 y 4.12, son calculados gracias a las medidas realizadas de los módulos CPV. Las tablas 4.16, 4.17 y 4.18 muestran los valores de estos coeficientes para cada uno de los módulos.

Rango AM	Coeficientes de regresión				
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>
AM < 2	0,090	-0,003	-	-	-
AM > 2	-	-	0,089	0,098	-1,362

**Tabla 4.16:** Coeficientes de regresión lineal de las ecuaciones 4.11 y 4.12 del módulo A.

Rango de AM	Coeficientes de regresión				
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>
AM < 2	0,076	-0,019	-	-	-
AM > 2	-	-	0,077	-0,006	-0,946

**Tabla 4.17:** Coeficientes de regresión lineal de las ecuaciones 4.11 y 4.12 del módulo B.

Rango de AM	Coeficientes de regresión				
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>
AM < 2	0,084	-0,089	-	-	-
AM > 2	-	-	0,086	-0,156	-0,729

**Tabla 4.18:** Coeficientes de regresión lineal de las ecuaciones 4.11 y 4.12 del módulo C.

Se va a comenzar analizando los resultados del modelo obtenidos para  $AM \leq 2$ . En este caso los coeficientes lineales obtenidos para la DNI son: 0,090, 0,076 y 0,084, para los módulos A, B y C respectivamente. El módulo que presenta una mayor pendiente con la DNI es el A, seguido del C y del B, lo cual ya había sido puesto de manifiesto en la figura 4.14.

Los coeficientes lineales obtenidos para la temperatura del aire son negativos. Esto indica que al aumentar la temperatura del aire los módulos pierden potencia, en mayor o menor grado. Los coeficientes de temperatura son, para el módulo A -0,003, para el módulo B -0,019 y para el módulo C -0,089. De los resultados obtenidos en el apartado anterior, apartado 4.2.5, se comprobó que el módulo B tenía una dependencia con la temperatura del aire mayor que el módulo A para  $AM \leq 2$ . Los coeficientes de temperatura obtenidos en este apartado están en consonancia con este resultado. El módulo C, del que no se tenían datos previos, es el que muestra una mayor influencia con la temperatura del aire.

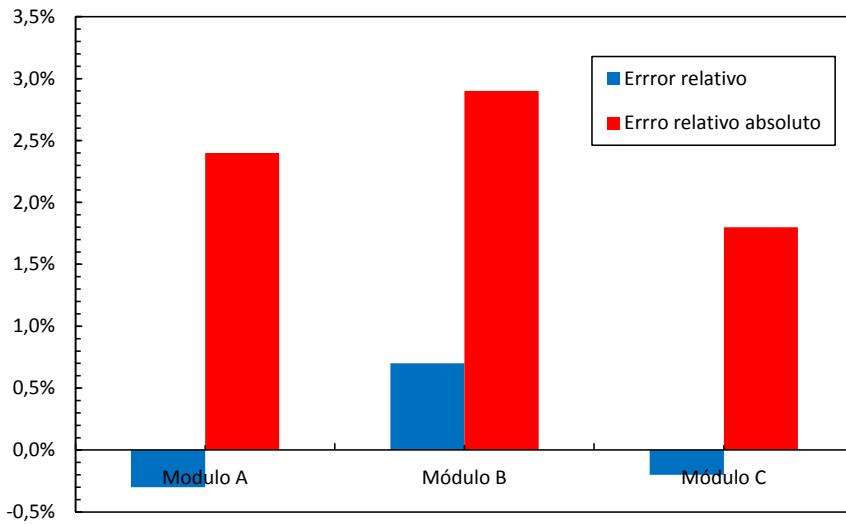
Para valores de  $AM > 2$  los coeficientes obtenidos para la DNI muestran el mismo comportamiento que para  $AM \leq 2$ , con unos valores similares a los anteriores. Los coeficientes obtenidos para el AM muestran un comportamiento similar para los tres módulos estudiados, los tres módulos pierden potencia a medida que aumenta AM con coeficientes que van de -1,362 para el módulo A, a -0,729 para el módulo C. Los coeficientes de la temperatura muestran, sin embargo, para  $AM > 2$  un comportamiento difícil de interpretar. Lo primero que llama la atención es que para el módulo A el coeficiente de temperatura es positivo: 0,098, esto indica un aumento de la potencia a medida que aumenta la temperatura. Para el módulo B se obtiene un coeficiente de temperatura menor que el calculado para  $AM \leq 2$ , mientras que para el módulo C el coeficiente de temperatura calculado es mayor que el calculado para  $AM \leq 2$ . El diferente comportamiento frente a la temperatura mostrado por los módulos puede ser explicado por la influencia de otros factores, como la eficiencia óptica de las lentes, su influencia en el espectro incidente y/o a la expansión térmica de los módulos, que podría provocar que algunas células estén ligeramente fuera de su posición ideal en la focal de las lentes en función de las temperaturas alcanzadas como ya se ha comentado anteriormente. Además, la temperatura del aire, y por tanto del módulo y de las células MJ, produce cambios en la respuesta espectral de las células lo que puede provocar comportamientos distintos en función del espectro incidente influido por la temperatura de la lente<sup>39</sup>. Otra posible explicación pueden ser factores espectrales de segundo orden, no tenidos en cuenta por el modelo, tales como la humedad relativa o los aerosoles. Estos factores podrían producir efectos no cuantificados usando únicamente el air mass y pueden llevar a resultados contradictorios.

No obstante, y a pesar de estos resultados, las relaciones lineales obtenidas muestran buenos resultados cuando se comparan los resultados experimentales con los datos modelados. Para  $AM \leq 2$  el valor de  $R^2$  es de 0,99 para los tres módulos, mientras que para  $AM > 2$  se obtiene un valor de  $R^2$  de 0,98, 0,99 y 0,99 para los módulos A, B y C respectivamente. Como puede verse el nivel de correlación de todos ellos es prácticamente 1, lo que indica un alto grado de correlación entre los datos experimentales y los modelados.

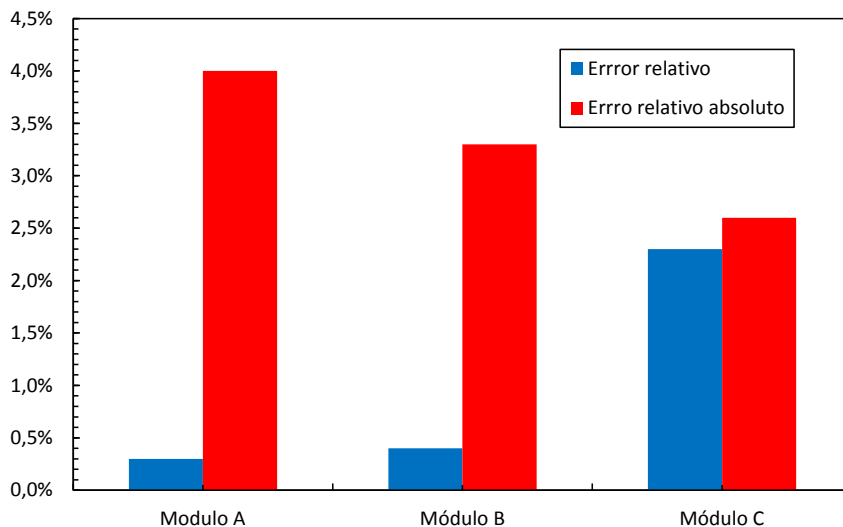
A continuación se realiza un análisis de los errores del modelo propuesto. Primero se realiza un análisis de los errores para  $AM \leq 2$ , tras esto, un análisis de los errores cometidos para  $AM > 2$ , y finalmente se estudian los errores cometidos por el modelos propuesto independientemente del valor de AM. Para el análisis se utiliza el error relativo (ER) y el error relativo absoluto (|ER|) que vienen definidos de la siguiente forma:

$$ER(\%) = \frac{(P_{mppmedida} - P_{mppcalculada})}{P_{mppmedida}} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$|ER|(\%) = \left| \frac{(P_{mppmedida} - P_{mppcalculada})}{P_{mppmedida}} \right| \quad \text{Ecuación 4.14}$$



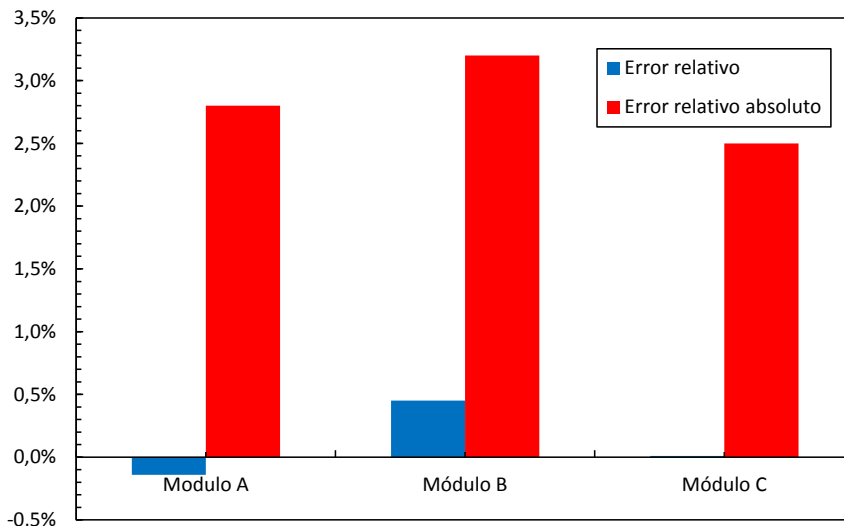
**Figura 4.30:** Error relativo y relativo absoluto obtenidos por el modelo propuesto para los módulos A, B y C para  $AM \leq 2$ .



**Figura 4.31:** Error relativo y relativo absoluto obtenidos por el modelo propuesto para los módulos A, B y C para  $AM > 2$ .

La figura 4.30 muestra los errores obtenidos para  $AM \leq 2$ . Tal y como se puede ver, los errores relativos son de -0,3%, 0,7% y de -0,2% para los módulos A, B y C respectivamente. Esto indica que el modelo no está subestimando ni sobreestimando la potencia producida por los módulos CPV al encontrarse los errores centrados en cero. Si se analiza el error relativo en valor absoluto, se obtienen valores de 2,4%, 2,9% y de 1,8% para los módulos A, B y C respectivamente, lo que indica el adecuado ajuste del modelo.

La figura 4.31 muestra los errores obtenidos para  $AM > 2$ . Como se puede ver, los errores relativos son de 0,3%, 0,4% y de 2,3 % para los módulos A, B y C respectivamente. Es decir, el error relativo se encuentra centrado en 0%, con la excepción del módulo C que llega a tener un valor de 2,3%. A pesar del valor obtenido para el módulo C, se puede considerar nuevamente que el modelo propuesto no está sobreestimando ni subestimando la potencia para  $AM > 2$  al ser este valor suficientemente pequeño. Si se analiza el error relativo en valor absoluto se obtienen valores de 4,0%, 3,3% y 2,6% para los módulos A, B y C respectivamente. El bajo error absoluto que presenta el modelo para los tres módulos estudiados indica de nuevo el buen ajuste del mismo.



**Figura 4.32:** Error relativo y relativo absoluto obtenidos por el modelo propuesto para los módulos A, B y C para todos los niveles de AM.

Hasta ahora se han estudiado los errores para  $AM \leq 2$  y  $AM > 2$  por separado, sin embargo, es interesante estudiar el error total obtenido para cada uno de los módulos para de esta forma evaluar el comportamiento completo del modelo. Respecto al error relativo, nuevamente, como se puede ver en la figura 4.32 los errores se encuentran centrados en cero, obteniéndose los valores de -0,14%, 0,45% y 0,01% para los módulos A, B y C respectivamente. Esto sugiere que el error cometido por el modelo propuesto viene dado por los valores medidos, que tienen una oscilación alrededor del valor real, propio de los errores asociados al proceso de medida. En este caso, por ejemplo, podrían deberse al propio sistema de seguimiento sobre el que van montados los módulos, que podría estar en ocasiones fuera del alineamiento perfecto. Interesa también dar nuevamente el valor del error relativo absoluto que da una idea de los picos de error que se pueden estar cometiendo. Es decir, aunque los valores del error relativo estén centrados en cero, sus valores absolutos pueden ser elevados. Sin embargo, tal y como se muestra en la figura 4.32 los errores absolutos para cada uno de los módulos son siempre menores del 3,5%. En concreto se obtienen valores de 2,8%, 3,2% y 2,5% para los módulos A, B y C respectivamente, lo que demuestra el buen comportamiento del modelo.

- <sup>1</sup> ASTM G173-Edition 1, "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface", American Society for Testing and Materials.
- <sup>2</sup> Araki K. et al, (2008), "A Simple Rating Method for CPV Modules and systems", 33<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.
- <sup>3</sup> Kasten F. and Young A. T., (1989), "Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula", *Applied Optics* 28(22) 4735– 4738.
- <sup>4</sup> Osterwald C. R., (1986), "Translation of Device Performance Measurement to Reference Conditions", *Solar cells* 18:269-279.
- <sup>5</sup> Šuri M., Remund J., Cebeauer T., Hoyer-Klick C., Dumortier D., Huld T., P. W., Stackhouse, Ineichen P., (2009), "Comparison of Direct Normal Irradiation Spatial Products for Europe", *SolarPaces*, Berlin, Germany.
- <sup>6</sup> Luque A. L., Andreev V. M. (2007), "Concentrator Photovoltaics", Springer-Verlag 2, New York.
- <sup>7</sup> Gombert, A. , Heile, I., Gomez, M., Gerstmaier, T., Röttger, M., Wüllner, J., (2011), "Field Experience of Concentrix Solar's CPV Systems in Different Climatic Conditions", 7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
- <sup>8</sup> Muller M. , Marion B., Rodriguez J., Kurtz S, (2011), "Minimizing Variation in Outdoor CPV Power Ratings", 7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
- <sup>9</sup> Wu, J. C. , Lin, K. H. , Lin, C. K., (2010), "Wind Load Analysis of a Solar Tracker for Concentrator Photovoltaics", 6<sup>th</sup> International Conference of CPV Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.
- <sup>10</sup> Kemmoku Y., Egami T., Hiramatsu M., Miyazaki Y., Araki K., Ekins-Daukes N. J., Sakakibara T., (2004), "Modelling of Module Temperature of a Concentrator PV System". 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June.
- <sup>11</sup> Hornung T., Steiner M. and Nitz P., (2011), "Estimation of the Influence of Fresnel Lens Temperature on Energy Generation of a Concentrator Photovoltaic System", 7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
- <sup>12</sup> Rubio F., Martínez M., Perea J., Sánchez D., and Banda P., (2009) "Field Tests on CPV ISFOC Plants", High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications IV, Lori E. Greene, San Diego, USA, 3 August.
- <sup>13</sup> Castro M., (2010), "Developing CPV Standards", 3<sup>rd</sup> Concentrated Photovoltaics Summit EU, Seville, Spain, 18-19 November.
- <sup>14</sup> Muller, M. , Marion, B., Rodriguez, J., Kurtz, S, (2011), "Minimizing Variation in Outdoor CPV Power Ratings", 7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
- <sup>15</sup> Aronova E. S., Shvarts M. Z., Soluyanov A. A., (2009), "The Effect of Temperature on the Efficiency of Concentrator PV Modules with MJ SC", 34<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.
- <sup>16</sup> Peharz G., Ferrer Rodríguez J. P., Siefer G. and Bett A. W., (2010), "Investigation on the Temperature Dependence of CPV Modules Equipped with Triple-Junction Solar Cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:54–60.
- <sup>17</sup> Bett A. W., Jaus J., Peharz G., Siefer G., (2008), "Outdoor Evaluation of Flatcon Modules and Systems", 33<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vol. 1, San Diego, USA, CA, 11–16 May.

- <sup>18</sup> Jaus J., Peharz G., Gombert A., Ferrer Rodriguez J. P., Dimroth F., Eltermann F., Wolf O., Passig M., Siefer G., Hakenjos A., Riesen S. V., Bett A.W., (2009), "Development of FLATCON® Modules Using Secondary Optics", 34<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.
- <sup>19</sup> Fernández E. F., Pérez-Higueras P., Garcia Loureiro A. J. and Vidal P. G., (2012), "Outdoor Evaluation of Concentrator Photovoltaic Systems Modules from Different Manufacturers: First Results and Steps", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, DOI: 10.1002/pip.1262.
- <sup>20</sup> Philipps S. P., Peharz G., et al., (2010), "Energy Harvesting Efficiency of III-V Multi-Junction Concentrator Solar Cells under Realistic Spectral Conditions", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 869–877.
- <sup>21</sup> Meusel M., Adelhelm R., Dimroth F., Bett A. W. et al., (2002), "Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 10:243-255.
- <sup>22</sup> Kurtz S. R., Olson J.M., Faine P., (1991), "The Difference Between Standard and Average Efficiencies of Multi-Junction Compared with Single-Junction Concentrator Cells", *Solar Cells* 30 (1–4) 501–513.
- <sup>23</sup> Gombert A., Gerstmaier T., I., Riesen Van S., Röttger M., Wüllner J., (2010), "Analysis of Long Term Operation Data of FLATCON CPV Systems", 25<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain 6-10 September.
- <sup>24</sup> Araki K., Yamaguchi M., (2003), "Influences of Spectrum Change to 3-Junction Concentrator Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 75 707–714.
- <sup>25</sup> Faine P., Kurtz S. R., Riordan C. and Olson J. M., (1991), "The Influence of Spectral Solar Irradiance Variations on the Performance of Selected Single-Junction and Multi-Junction Solar Cells", *Solar Cells*, 31 259-278.
- <sup>26</sup> Emery K. and Del Cueto J., (2002), "Spectral Correction Based on Optical Air Mass", 29<sup>th</sup> IEEE PV Specialists Conference, New Orleans, USA, 20-24 May.
- <sup>27</sup> Verlinden P. J and Lasich J. B., (2008) "Energy Rating For CPV Systems Using III-V Solar Cells", ICSC5, Palm Desert, USA, 18 November.
- <sup>28</sup> Aronova, E. S. Grilikhes, V. A. Shvarts, M. Z. Timoshina, N.H., "On Correct Estimation of Hourly Power Output of Solar Photovoltaic Installations with MJ SCs and Sunlight Concentrators", 33<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.
- <sup>29</sup> W. E. McMahon et al, (2008), "Fill Factor as a Probe of Current Matching for GaInP/GaAs Tandem Cells in a Concentrator System During Outdoor Operation", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:213-224.
- <sup>30</sup> King D. L., Boyson W.E., Kratochvil J.A., (2004), "Photovoltaic Array Performance Model, Sandia National Laboratories", SAND 2004-3535.
- <sup>31</sup> Peharz G., Ferrer Rodriguez J. P., Siefer G., Bett A.W., (2011), "A Method for Using CPV Modules as Temperature Sensors and its Application to Rating Procedures", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 2734–2744.
- <sup>32</sup> Fernández E. F et al., (2011), "Influence of Air Mass, DNI and Air Temperature in CPV Modules: Study of Different Technologies", 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September.
- <sup>33</sup> Kemmoku Y., Egami T., Hiramatsu M., Miyazaki Y., Araki K., Ekins-Daukes N. J., Sakakibara T., (2004), "Modelling of Module Temperature of a Concentrator PV System". 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June.

<sup>34</sup> Aronova E. S., Shvarts M. Z., Soluyanov A. A., (2009), “The Effect of Temperature on the Efficiency of Concentrator PV Modules with MJ SC”, 34<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.

<sup>35</sup> ASTM standard E2527-09, (2009), “Standard Test Method for Electrical Performance of Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Systems Under Natural Sunlight”.

<sup>36</sup> Peharz G. , Siefer G., Bett A.W., (2009), “A Simple Method for Quantifying Spectral Impactson Multi-Junction Solar Cells”, Solar Energy 83 1588–1598.

<sup>37</sup> Kinsey G. S., Stone K., Brown J. and Garboushian V., (2011), “Energy Prediction of Amonix CPV Solar Power Plants”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 19:794-796.

<sup>38</sup> García-Domingo B., Aguilera J., Fuentes M., Muñoz J. V., Nofuentes G., “Analysis and Characterization of an Outdoor CPV System. Comparative with Other PV Technologies”, 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September.

<sup>39</sup> Fernández E. F., García Loureiro A. J., Pérez Higuera P. J., Siefer G., (2011), “Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells under different Temperatures and Spectra”, 8<sup>th</sup> IEEE CDE, Palma de Mallorca, Spain.

## **Capítulo 5: Conclusiones y líneas de futuro**

En este capítulo se van a detallar las principales conclusiones derivadas de esta tesis, así como algunas propuestas de futuros trabajos, continuando con la línea de investigación que se ha iniciado en el campo de la CPV.

El capítulo se dividirá en dos secciones. En la primera sección se detallan las principales conclusiones obtenidas de la tesis y en la segunda sección se abordan las líneas de investigación futuras generadas a partir de la investigación realizada.

### **5.1. Conclusiones**

Debido a que en esta tesis se han abordado dos líneas de investigación, una para la caracterización y modelado de células III-V de triple unión de concentración, y otra para la caracterización y modelado de módulos de alta concentración fotovoltaica, esta sección se va a dividir en dos apartados.

*5.1.1. Principales conclusiones obtenidas de la caracterización y modelado de células III-V de triple unión de concentración*

El estudio del comportamiento de diversas células III-V de triple unión bajo condiciones controladas de funcionamiento, realizado en el capítulo 3, llevó a las siguientes conclusiones:

- La EQE de las subcélulas de las células estudiadas aumenta su rango para mayores longitudes de onda a medida que aumenta la temperatura a la que están trabajando estas subcélulas.
- Para las distintas temperaturas estudiadas, los parámetros característicos de las células bajo estudio muestran distinto comportamiento. Mientras que la intensidad de cortocircuito aumenta con la temperatura, el resto de parámetros (tensión de circuito abierto, punto de máxima potencia, eficiencia y factor de forma) disminuyen al aumentar ésta, tanto a distintos espectros a un sol como a distintas concentraciones.
- Todos los parámetros estudiados se ven fuertemente influenciados por el espectro incidente excepto la tensión de circuito abierto.
- Los parámetros eléctricos de las células para distintas concentraciones aumentan con la radiación, excepto la eficiencia y el factor de forma que disminuyen a partir de un valor de concentración determinado.
- Los coeficientes de temperatura de los parámetros eléctricos estudiados, calculados a un sol, se ven influenciados con el espectro incidente, excepto el coeficiente de temperatura del punto de máxima potencia, y en consecuencia el de la eficiencia, y el coeficiente de temperatura de la tensión de circuito abierto.
- Los coeficientes de temperatura calculados para los distintos parámetros eléctricos, estudiados a distintas concentraciones, muestran una tendencia decreciente excepto el factor de forma (FF) que presenta un comportamiento aleatorio.
- La subcélula de germanio puede considerarse como una fuente de tensión que nunca limita la corriente ante los espectros estudiados y su influencia bajo variaciones espectrales puede ser considerada despreciable.

El análisis de los resultados obtenidos ha permitido plantear el modelo para la predicción del punto de máxima potencia de una célula LM III-V de triple unión a distintos espectros y temperaturas. El modelo propuesto está basado en la ecuación de un diodo, que describe el funcionamiento de una célula solar. En el modelo se ha eliminado la célula de germanio de forma que, se puede predecir el punto de máxima potencia de una célula LM de triple unión basándose solo en dos subcélulas equivalentes. Cada una de estas subcélulas equivalentes es descrita con el modelo de un diodo. Se cumple que las intensidades de cortocircuito de las dos subcélulas equivalentes son iguales a las de las subcélulas superior y media siendo además, la suma de las tensiones de circuito abierto de ambas subcélulas equivalentes igual a la tensión de circuito abierto de la célula LM. Como se demostró en el capítulo 3, el modelo propuesto presenta buenos resultados para la predicción del punto de máxima potencia de la célula bajo estudio, a distintos espectros y temperaturas, siendo éste uno de los objetivos planteados al principio de la tesis.

#### *5.1.2. Principales conclusiones obtenidas de la caracterización y modelado de módulos de alta concentración*

El estudio del comportamiento de diversos módulos de alta concentración fotovoltaica bajo condiciones reales de funcionamiento llevó a las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de un módulo de concentración se ve influenciado por la velocidad del viento, la DNI, la temperatura del aire y del espectro.
- La DNI es el principal factor atmosférico que afecta al comportamiento de los módulos, presentando el punto de máxima potencia un comportamiento casi lineal respecto a ésta.
- El aumento de la temperatura del aire provoca una disminución en la potencia de salida de los módulos CPV estudiados.
- A efectos del análisis del comportamiento de los módulos CPV el espectro solar puede ser cuantificado por medio del AM.

- Para  $AM \leq 2$  la potencia generada por los módulos CPV estudiados no muestra influencia espectral apreciable, mientras que para  $AM > 2$  la potencia disminuye de forma más o menos lineal al aumentar AM.

A partir de este análisis se ha planteado un modelo que permite predecir el punto de máxima potencia de los módulos bajo estudio basado en la influencia de los parámetros atmosféricos comentados: DNI, temperatura del aire y AM. El modelo propuesto está basado en dos ecuaciones lineales: una para  $AM \leq 2$  que sólo depende de la DNI y de la temperatura del aire, y otra para  $AM > 2$  que depende de la DNI, la temperatura del aire y del AM. Como se demostró en el capítulo 4, el modelo muestra muy buenos resultados en la predicción del punto de máxima potencia bajo condiciones de funcionamiento a sol real para los módulos estudiados, siendo este el otro objetivo planteado en la tesis.

Como se ha visto, se ha llevado a cabo la caracterización y modelado tanto de células III-V de triple unión, como de módulos de alta concentración. Aparte de presentar buenos resultados para la caracterización de estos dispositivos, los modelos propuestos presentan una serie de ventajas. En cuanto al modelo para la caracterización de células LM III-V de triple unión presenta la ventaja de ser un método fácil de implementar, además de no necesitar parámetros inherentes del dispositivo, los cuáles no son fáciles de conseguir. La principal ventaja del método propuesto para la predicción de la potencia de un módulo CPV es que está basado en parámetros atmosféricos fáciles de obtener o medir en el lugar donde se quiera emplazar la instalación CPV.

## **5.2. Líneas de futuro**

A pesar de las ventajas comentadas en la sección anterior, los modelos propuestos para la caracterización de una célula y de un módulo CPV presentan una serie de limitaciones. El estudio de estas limitaciones serán futuros trabajos a desarrollar. Además, como se visto a lo largo de la tesis, los datos obtenidos durante la caracterización de ambos dispositivos son, en ocasiones, difíciles de interpretar y deberán ser analizados en mayor profundidad.

En esta sección se van a plantear algunas propuestas de futuros trabajos a realizar continuando con la línea de investigación iniciada tanto en la caracterización y modelado de células III-V de triple unión como de módulos de alta concentración. Siguiendo la línea de la anterior sección, las líneas de futuro de cada una de las dos líneas de investigación llevadas cabo se presentarán en dos apartados.

#### *5.2.1. Futuros trabajos en la caracterización y modelado de células III-V de triple unión de concentración*

Entre los principales trabajos a realizar en este apartado estarían:

- Estudiar con mayor detalle el comportamiento del coeficiente de temperatura del factor de forma a distintas concentraciones. Como se vio en capítulo 3, este coeficiente presentaba un comportamiento distinto al esperado de forma teórica, ya que no se apreció tendencia alguna con la concentración.
- Estudiar la posible influencia de la subcélula de germanio en las células MM III-V de triple unión de concentración, de forma que permita extender y adaptar el modelo a la predicción de la potencia máxima de una célula MM. Como se comentó, no fue posible realizar el estudio de la influencia de la célula de germanio en las células MM.
- Extender el modelo a distintas concentraciones. Las medidas a distintas concentraciones no permitieron variar el espectro incidente con lo que el modelo propuesto no pudo ser ajustado ni probado a alta concentración.
- Extender el modelo para predecir la potencia de un módulo. El modelo propuesto podría predecir la potencia de un módulo o sistema CPV aplicando el mismo procedimiento de ajuste y las mismas ecuaciones que para una célula MJ.
- Obtener la corriente de cortocircuito de las subcélulas superior y media a sol real. Esto permitiría que el modelo fuera capaz de predecir el comportamiento de una célula, módulo o sistema en condiciones reales de funcionamiento.

5.2.2. *Futuros trabajos en la caracterización y modelado de módulos CPV de alta concentración*

Entre los principales trabajos a realizar en este apartado estarían:

- Analizar los coeficientes de temperatura obtenidos para el punto de máxima potencia que permita interpretar su significado. Como se vio en el capítulo 4, los coeficientes de temperatura obtenidos para el punto de máxima potencia de los módulos bajo estudio presentaban comportamientos distintos dependiendo del módulo.
- Como se ha comentado en el capítulo 4, el viento influye en la potencia de salida de los módulos, por lo que será necesario realizar un estudio exhaustivo de su influencia para introducirlo en el modelo.
- Estudiar el posible efecto en la potencia de salida de un módulo CPV de otros parámetros atmosféricos como pueden ser la humedad relativa o los aerosoles. El estudio de estos parámetros no se ha realizado en esta tesis aunque distintos autores indiquen la posible influencia en éstos en el comportamiento de un módulo CPV<sup>1,2</sup>.
- Estudiar la posible influencia de las lentes en el comportamiento de los módulos CPV. Como han demostrado distintos autores la potencia de salida de un módulo CPV depende del tipo de óptica utilizado<sup>3,4</sup>.
- Universalizar el modelo midiendo diferentes tipos de módulos en diferentes lugares. El modelo propuesto ha sido ajustado y validado para un tipo de módulos CPV en particular y en un único emplazamiento, Jaén.

---

<sup>1</sup> Faine P., Kurtz S. R., Riordan C. and Olson J. M., (1991), “The Influence of Spectral Solar Irradiance Variations on the Performance of Selected Single-Junction and Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Cells*, 31 259-278.

<sup>2</sup> Muller M. , Marion B., Rodriguez J., Kurtz S, (2011), “Minimizing Variation in Outdoor CPV Power Ratings”, *7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*, Las Vegas, USA, 4-6 April.

<sup>3</sup> Hornung T., Steiner M. and Nitz P., (2011), “Estimation of the Influence of Fresnel Lens Temperature on Energy Generation of a Concentrator Photovoltaic System”, *7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*, Las Vegas, USA, 4-6 April.

---

<sup>4</sup> Peharz G., Ferrer Rodríguez J. P., Siefer G. and Bett A. W., (2010), “Investigation on the Temperature Dependence of CPV Modules Equipped with Triple-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:54–60.



## Bibliografía

- Abella M. A., (2005), “Sistemas Fotovoltaicos”, S.A.P.T. Publicaciones Técnicas, S.L. segunda edición.
- Aguilera J., Almonacid G., Hontoria L., Muñoz E., Pérez P. J., Terrados J., Vidal P.G., (2009), “The CPV Challenge (Part I): Achieving Grid Parity”, CPV Today First Conferences Ltd, UK.
- Apicella F., et al., (2008), “Fixed and Two-Axis Tracking PV System: Potential Solar Electricity from Conventional and CPV Modules Technology”, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September.
- Araki K. et al, (2008), “A Simple Rating Method for CPV Modules and systems”, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.
- Araki K., Yamaguchi M., (2003), “Influences of Spectrum Change to 3-Junction Concentrator Cells”, Solar Energy Materials & Solar Cells 75 707–714.
- Aronova E. S. et al., (2008), “On Correct Estimation of Hourly Power Output of Solar Photovoltaic Installations with MJ SCs and Sunlight Concentrators”, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.
- Aronova E. S., Shvarts M. Z., Soluyanov A. A., (2009), “The Effect of Temperature on the Efficiency of Concentrator PV Modules with MJ SC”, 34th Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.
- Askins S., Taylor S., Domínguez C., Antón I., (2007), “Realization of a Solar Simulator for Production Testing of HCPV Modules”, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano, Italy.
- ASTM E973, “Determination of the spectral mismatch parameter between a photovoltaic device and a photovoltaic reference cell”.
- ASTM G173-Edition 1, (2003), "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface", American Society for Testing and Materials.
- ASTM standard E2527-09, (2009), “Standard Test Method for Electrical Performance of Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Systems Under Natural Sunlight”.

- Baur C. and Bett A. W., (2005), “Modelling of III-V Multi-Junction Cells Based on Spectrometric Characterization”, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 6-10 June.
- Bett A. W., Jaus J., Peharz G., Siefert G., (2008), “Outdoor Evaluation of Flatcon Modules and Systems”, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vol. 1, San Diego, USA, CA, 11–16 May.
- Castro M., (2010), “Developing CPV Standards”, 3rd Concentrated Photovoltaics Summit EU, Seville, Spain, 18-19 November.
- CPV Market Forecast 2011, (2010), CPV Consortium Report.
- Daniels A., Marquez C., (2010), “The CPV Challenge (Part 2): CPV Industry Growth Forecast & Strategic landscape”, CPV Today First Conferences Ltd, UK.
- Dimroth F., (2006), “High-efficiency Solar Cells from III-V Compound Semiconductors”, *Physica Status Solidi (c)* 3, No. 3, 373-379.
- Díaz V., López Villanueva J. A., Rodríguez Bolívar S., Jiménez Tejada J. A. And Rodríguez E., (2007), “ISOSIM: A Multi-Junction Solar Cell Simulation Program”, 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo de El Escorial, Spain, 12 – 16 March.
- Domínguez C., Antón I. and Sala G., (2010), “Multijunction Solar Cell Model for Translating I-V Characteristics as a Function of Irradiance, Spectrum, and Cell Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18:272-284.
- Domínguez C., Antón I., Sala G., (2008), "Solar Simulator for Concentrator Photovoltaic Systems," *Optics Express*, 16, pp. 14894-14901.
- Domínguez C., Askins S., Antón I., and Sala G., (2009), “Indoor Characterization of CPV Modules using the Helios 3198 Solar Simulator”, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 1-25 September.
- Emery K. and Del Cueto J., (2002), “Spectral Correction Based on Optical Air Mass”, 29th IEEE PV Specialists Conference, New Orleans, USA, 20-24 May.
- Faine P., Kurtz S. R., Riordan C. and Olson J. M., (1991), “The Influence of Spectral Solar Irradiance Variations on the Performance of Selected Single-Junction and Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Cells*, 31 259-278.
- Fernández E. F et al., (2011), “Influence of Air Mass, DNI and Air Temperature in CPV Modules: Study of Different Technologies”, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September.
- Fernández E. F., García Loureiro A. J., Pérez Higuera P. J., Siefert G., (2011), “Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells under different Temperatures and Spectra”, 8th IEEE CDE, Palma de Mallorca, Spain.
- Fernández E. F., Pérez-Higuera P., Garcia Loureiro A. J. and Vidal P. G., (2012), “Outdoor Evaluation of Concentrator Photovoltaic Systems Modules from Different Manufacturers: First Results and Steps”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, DOI: 10.1002/pip.1262.
- Fraas L. and Partain L., (2010), “Solar Cells and their Applications”, Wiley-Interscience, second edition, New Jersey.
- Galiana B., Algorta C., Rey-Stolle I., and García Vara Ivan, (2005), “A 3-D Model for Concentrator Solar Cells based on Distributed Circuit Units”, *IEEE transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 12, December.

- 
- García-Domingo B., Aguilera J., Fuentes M., Muñoz J. V., Nofuentes G., “Analysis and Characterization of an Outdoor CPV System. Comparative with Other PV Technologies”, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September.
  - Gombert A., Gerstmaier T., I., Riesen Van S., Röttger M., Wüllner J., (2010), “Analysis of Long Term Operation Data of FLATCON CPV Systems”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain 6-10 September.
  - Gombert, A. , Heile, I., Gomez, M., Gerstmaier, T., Röttger, M., Wüllner, J., (2011), “Field Experience of Concentrix Solar's CPV Systems in Different Climatic Conditions”, 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
  - Gonzalez M. et al., (2011), “Modeling and Analysis of Multijunction Solar Cells”, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIX, Witzigmann, B., Henneberger F., Arakawa Y., Freundlich, A., San Francisco, USA.
  - Green M. A. et al., (1982), “Silicon Solar Cells with Reduced Temperature Sensitivity”. *Electronic Letters* 2:97-98.
  - Green M. A. et al., (2009), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 33)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:85-94.
  - Green M. A. et al., (2009), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 34)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:320-326.
  - Green M. A. et al., (2010), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 35)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18:144-150.
  - Green M. A. et al., (2011), “Solar Cell Efficiency Tables (Version 37)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:84-92.
  - Green M. A. et al., (2011), “Solar cell efficiency tables (Version 38)”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:565–572.
  - Green M. A., (1986), “Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Application”, University of New South Wales, Sydney, Australia.
  - Gueymard C., (2001), “Parameterized Transmittance Model for Direct Beam and Circumsolar Spectral Irradiance”, *Solar Energy* 71(5); 325-346.
  - Gueymard C., (2005), ”SMARTS, “A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment”, Professional Paper FSEC-PF-270-95.
  - Henry C.H., Logan R.A., and Merritt F.R., (1978), “The Effect of Surface Recombination on Current in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Heterojunctions”, *Journal of Applied Physics* 49, p3530
  - Hornung T., Steiner M. and Nitz P., (2011), “Estimation of the Influence of Fresnel Lens Temperature on Energy Generation of a Concentrator Photovoltaic System”, 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
  - Hovel H. J., (1975), “Semiconductor and Semimetals. Vol II: Solar Cells ”, Academic Press, New York.
  - <http://www.spectrolab.com/DataSheets/illumination/solarSim/T-HIPSS%20RevF.pdf>
  - IEC 62108, (2007), “Concentrator Photovoltaic (CPV) Modules and Assemblies – Design Qualification and Type Approval”, Edition 1.0, Geneve.

- ISFOC, (2007) “Specifications of General Conditions for the Call for Tenders for Concentration Photovoltaic Solar Plants for the Institute of Concentration Photovoltaic Systems (ISFOC)”.
- Jaus J., Peharz G., Gombert A., Ferrer Rodriguez J. P., Dimroth F., Eltermann F., Wolf O., Passig M., Siefer G., Hakenjos A., Riesen S. V., Bett A.W., (2009), “Development of FLATCON® Modules Using Secondary Optics”, 34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.
- Kasten F. and Young A. T., (1989), “Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula”, *Applied Optics* 28(22) 4735–4738.
- Kemmoku Y., Egami T., Hiramatsu M., Miyazaki Y., Araki K., Ekins-Daukes N. J., Sakakibara T., (2004), “Modelling of Module Temperature of a Concentrator PV System”. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June.
- King D. L., Boyson W.E., Kratochvil J.A., (2004), “Photovoltaic Array Performance Model, Sandia National Laboratories”, SAND 2004-3535.
- King R. R. et al., (2004), “Metamorphic III-V Materials, Sublattice Disorder, and Multijunction Solar Cell Approaches with Over 37% Efficiency”, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7-11 June.
- King R. R., Bhusari D., Boca A., Larrabee D., Liu X.-Q., Hong W., Fetzer C. M., Law D. C. and Karam N. H., (2011), “Band Gap-Voltage Offset and Energy Production in Next-Generation Multi-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:797–812.
- Kinsey G. S. et al., (2009), “Spectral Response and Energy Output of Concentrator Multijunction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17:279-288.
- Kinsey G. S., Hebert P., Barbour K. E., Krut D. D., Cotal H. L. and Sherifm R. A., (2008), “Concentrator Multi-Junction Solar Cell Characteristics Under Variable Intensity and Temperature”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:503–508.
- Kinsey G. S., Pien P., Hebert P., Sherif R. A., (2009), “Operating Characteristics of Multi-Junction Solar Cells”. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93:950–1.
- Kinsey G. S., Stone K., Brown J. and Garboushian V., (2011), “Energy Prediction of Amonix CPV Solar Power Plants”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:794-796.
- Kurtz S. et al., (2008), “A Comparison of Theoretical Efficiencies of Multi-Junction Concentrator Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: research and applications* 16;537–546.
- Kurtz S. R., Olson J.M., Faine P., (1991), “The Difference Between Standard and Average Efficiencies of Multi-Junction Compared with Single-Junction Concentrator Cells”, *Solar Cells* 30 (1–4) 501–513.
- Kurtz S., (2011), “Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry”, Technical Report NREL/TP-5200-43208, June.
- Lasich J. B., Verlinden P. J., (2007), “Opportunities for Widespread Implementation of Concentrator Photovoltaic (CPV) Systems”, 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo del Escorial, Spain, 12-16 March, p. 65–70.

- 
- Law D. C. et al., (2010), “Future Technology Pathways of Terrestrial III-V Multijunctions Solar Cells for Concentrator Photovoltaics Systems”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 1314-1318.
  - Lecoufle D., Kuhn F., (2009), “A Place for PV, Tracked-PV and CPV”, 2nd International Workshop on Concentrating Photovoltaic Power Plants, Darmstadt, Germany, 9-10 March.
  - Leloux J., Pachón D. and Sala G., (2010), “Spectral Solar Radiation Measurements and Models for CPV Module Production Estimation”, 6th International Conference on Concentrating Photovoltaics Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.
  - Luque A. L., Andreev V. M. (2007), “Concentrator Photovoltaics”, Springer-Verlag 2, New York.
  - Luque A. and Martí A., (1997), “Entropy Production in Photovoltaic Conversion”, *Physical Review*, vol.55, p.6994.
  - Luque A., Hegedus S., (2003), “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
  - Marion B. et al., (2004), “Current-Voltage Curve Translation by Bilinear Interpolation”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12:593-607.
  - Marisa C., (2010), “Developing CPV Standards”, 3rd Concentrated Photovoltaics Summit EU, Seville, Spain, 18-19 November.
  - Markvart T. and Castañer L., (2005), “Solar Cells”, Elsevier Limited, first edition, Amsterdam.
  - Martínez M, et al., (2008), “Concentrator Photovoltaics Connected to the Grid and System Rating”, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, p. 146–50.
  - Meusel M., Adelhelm R., Dimroth F., Bett A. W. et al., (2002), “Spectral Mismatch Correction and Spectrometric Characterization of Monolithic III-V Multi-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 10:243-255.
  - Meusel M., Baur C., G. Létay, Bett A. W. et al., (2003), “Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurements Artifacts and their Explanation”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11:449-514.
  - Muller, M. , Marion, B., Rodriguez, J., Kurtz, S, (2011), “Minimizing Variation in Outdoor CPV Power Ratings”, 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.
  - Nishikawa W., Horne S., (2008), “Key Advantages of Concentrating Photovoltaics (CPV) for Lowering Levelized Cost of Electricity (LCOE)”, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, p. 3765–7.
  - Osterwald C. R., (1986), “Translation of Device Performance Measurement to Reference Conditions”, *Solar cells* 18:269-279.
  - Overtraeten R. J., Mertens R. P., (1986), “Physics, Technology, and Use of Photovoltaics”. Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston.
  - Peharz G., Siefer G., Bett A.W., (2009), “A Simple Method for Quantifying Spectral Impacts on Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Energy* 83 1588–1598.
  - Peharz G., Ferrer Rodríguez J. P., Siefer G. and Bett A. W., (2010), “Investigation on the Temperature Dependence of CPV Modules Equipped with

- Triple-Junction Solar Cells”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19:54–60.
- Peharz G., Ferrer Rodriguez J. P., Siefer G., Bett A.W., (2011), “A Method for Using CPV Modules as Temperature Sensors and its Application to Rating Procedures”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 2734–2744.
  - Pérez Higuera P. et al., (2010), “Propuesta para un Marco Regulatorio para la Concentración Fotovoltaica en España (2010-2020)”, ISBN: 978-84-692-9987-6.
  - Perez-Higuera P., Muñoz E., Almonacid G., Vidal, P. G., (2011), “High Concentrator Photovoltaics Efficiencies: Present Status and Forecast”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 1810–1815.
  - Philipps S. P., Peharz G., et al., (2010), “Energy Harvesting Efficiency of III-V Multi-Junction Concentrator Solar Cells under Realistic Spectral Conditions”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 869–877.
  - Pierret R. F. (1994), “Fundamentos de Semiconductores”, Addison-Wesley Iberoamericana, S.A, segunda edición.
  - Prior B, Seshan C. *Concentrating Photovoltaics 2011: Technology, Costs and Markets*. GTM Research. 2011
  - Pujol L., Perona A., Bouriel J. R., Landart E. and Dollet Dollet A., (2010), “Outdoor Characterization and Performance Evaluation of Integra-Sun Prototype CPV Module”, 6th International Conference of CPV Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.
  - PV Insider CPV World Map 2011, (2011), 3rd Annual Concentrated Photovoltaic Summit, USA, November.
  - Rey-Stolle I., Algora C., Garcia I., Baudrit M., Espinet P., Galiana B. And Barrigón E., (2009) “Simulating III-V Concentrator Solar cells: a Comparison of Advantages and Limitations of Lumped Analytical Models; Distributed Analytical Models and Numerical Simulation”, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.
  - Rubio F., Martínez M., Coronado R., Pachón J.L., Banda P., (2008), “Deploying CPV Power Plant: ISFOC Experiences”, 33rd IEEE PVSC, San Diego, USA, 11-16 May.
  - Rubio F., Martínez M., Perea J., Sánchez D., and Banda P., (2009) “Field Tests on CPV ISFOC Plants”, High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications IV, Lori E. Greene, San Diego, USA, 3 August.
  - Sala G., Pachón D., Antón I., (1999), “C-Rating Project. Book1. Classification of PV Concentrators”, Contract: NNE-1999-00588.
  - Schultz O., Glunz S. W., Willeke G. P., (2004), “Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12: 553–558.
  - Siefer G., Baur C., Meusel M., Dimroth F., Bett A.W., Warta W., (2002), “Influence of the Simulator Spectrum on the Calibration of Multi-junction Solar Cells under Concentration”, 29th IEEE PVSC New Orleans, Paper No 302.6, 20-24 May.
  - Siefer G. et al., (2005) “Determination of the Temperature Coefficients of Various III-V Solar Cells”, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 6-10 June.

- 
- Slade A., Garboushian V., (2005), “ 27.6% Efficient Silicon Concentrator Cell for Mass Production”, Technical Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Shanghai, October, 701.
  - Šúri M., Remund J., Cebecauer T., Hoyer-Klick C., Dumortiert D., Huld T., P. W., Stackhouse, Ineichen P., (2009), “Comparison of Direct Normal Irradiation Spatial Products for Europe”, SolarPaces, Berlin, Germany.
  - Varshni Y. P., (1967) “Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors”, *Physica* 34, pp. 149-154.
  - Verlinden P. J and Lasich J. B, (2008) “Energy Rating For CPV Systems Using III-V Solar Cells”, ICSC5, Palm Desert, USA, 18 November.
  - W. E. McMahon et al, (2008), “Fill Factor as a Probe of Current Matching for GaInP/GaAs Tandem Cells in a Concentrator System During Outdoor Operation”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16:213-224.
  - Wu, J. C. , Lin, K. H. , Lin, C. K., (2010), “Wind Load Analysis of a Solar Tracker for Concentrator Photovoltaics”, 6th International Conference of CPV Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.
  - Yamaguchi M. and Luque A., (1999), “High Efficiency and High Concentration in Photovoltaics”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, No. 10, October.
  - Yamaguchi M. et al., (2008), “Novel Materials for High-Efficiency III-V Multi-Junction Solar Cells”, *Solar Energy* 82 173-180.
  - Yamaguchi M., Takamoto T., Araki K., Ekins-Daukes N., (2005), “Multi-Junction III-V Solar Cells: Current Status and Future Potential”, *Solar Energy* 79 78-85.
  - Yoon S. and Garboushian V., (1994), "Reduced Temperature Dependence of High-Concentration Photovoltaic Solar Cell Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ) at high Concentration Levels", 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 1500-1504.



**Anexo I: Traslación de las características  
eléctricas de un módulo CPV a las mismas  
condiciones atmosféricas**



## **I.1. Introducción**

Uno de los principales problemas que se encuentran en el estudio de la energía de concentración fotovoltaica (CPV) es que no es fácil obtener datos de los fabricantes sobre las características de los módulos CPV a unas condiciones dadas. Esto puede ser debido a que las compañías todavía están en fase de aprendizaje y porque estos datos se pueden considerar confidenciales y estratégicos para su interés comercial. En otras ocasiones la información proporcionada está incompleta, o a distintas condiciones de medida, no se indica el laboratorio de medida, ni como se ha llevado a cabo el procedimiento para la obtención de dichas características.

En nuestro caso, tal y como se muestra en la tabla 4.2, los datos que proporcionan los fabricantes de los módulos utilizados en esta tesis, no están medidos bajo las mismas condiciones y además no se proporcionan algunos parámetros importantes, necesarios para conocer el comportamiento eléctrico de los módulos. Es el caso del módulo B, que está medido bajo condiciones de DNI diferentes al resto y además no se especifican ni la temperatura de la célula ni el espectro incidente. Esto hace la tarea de comparar la eficiencia de los tres módulos bajo las mismas condiciones imposible. Por otro lado, debido a que nuestro estudio se centrará en el análisis bajo condiciones externas de funcionamiento, va a ser más útil para nuestro propósito saber los parámetros característicos de un módulo CPV a unas determinadas condiciones atmosféricas exteriores. Como recoge la tabla 4.2, los fabricantes de los módulos A y C indican que éstos han sido medidos a una temperatura de célula de 20°C, sin embargo, los fabricantes de los módulos no proporcionan ninguna relación que indique a que temperatura del aire equivale esa temperatura de célula, y que sería la temperatura bajo la cual se pretende realizar el estudio. Por lo tanto, es difícil saber, con estos datos, cuáles serían las características I-V de los módulos a unas determinadas condiciones externas de funcionamiento.

Todo lo anterior pone de manifiesto la necesidad de realizar, por medio de alguno de los métodos que se detallarán más adelante, la traslación a unas condiciones de operación determinadas, para poder comparar los módulos y al mismo tiempo saber cuáles serían, en condiciones reales de funcionamiento sus características I-V.

Actualmente no existe un método estándar para poder calcular o trasladar las características I-V de un módulo CPV a unas condiciones de funcionamiento determinadas. El grupo 7 de la comisión internacional de electrónica (IEC) TC82 está trabajando en una norma destinada a los módulos e instalaciones CPV. Se trabaja en distintas líneas: establecer un estándar de calidad para los módulos, las características que debe cumplir una instalación CPV para ser aceptada o definir las especificaciones para los seguidores solares, por poner algunos ejemplos. Algunas de estas normas ya han sido publicadas y otras están en desarrollo. La norma destinada a saber la potencia generada por un módulo o instalación CPV a unas condiciones estándar, IEC 62670-Power-Rating, aún no ha sido establecida<sup>1,2</sup>, sin embargo, se han avanzado documentos donde se plantea en que va a consistir la norma y se detallan las posibles condiciones estándar de operación<sup>3</sup>. Esto puede servir de guía a la hora de elegir un método que permita evaluar la potencia generada por módulos utilizados en esta tesis. Las posibles condiciones estándar de operación son:

- Radiación directa  $DNI = 900 \text{ W/m}^2$ .
- Temperatura del aire  $T_{\text{aire}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Velocidad del viento  $VV < 2 \text{ m/s}$ .

Debido a la falta de una norma específica, se ha realizado una revisión de distintos artículos en los que se utilizan métodos para calcular las características I-V de un módulo CPV a unas condiciones determinadas de funcionamiento, para tratar de buscar el que más se adecue a nuestros propósitos. Por otro lado, nuestra intención no es certificar la potencia generada por los módulos sino el estudio del comportamiento de un módulo de CPV en condiciones reales de funcionamiento, de este modo, se trata de encontrar un método que proporcione buenos resultados experimentales y que además se ajuste a nuestro objetivo.

## **I.2. Estudio de los distintos métodos para pasar a condiciones estándar**

Tal y como se ha comentado, se ha realizado un estudio de los diferentes métodos que se suelen usar actualmente para pasar a unas determinadas condiciones externas de funcionamiento, detallando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, para de esta forma poder elegir el método que más se adecue a nuestros requisitos.

El objetivo final será conocer el punto de máxima potencia ( $P_{mpp}$ ) y la eficiencia ( $\eta$ ) de los tres módulos estudiados a unas condiciones exteriores determinadas.

A continuación se detallan los métodos que han sido contemplados.

- *Método basado en el estándar IEC 61853-1 para módulos fotovoltaicos planos*

El método define como parámetros de entrada la radiación y la temperatura del módulo. Para poder llevar a cabo la traslación a condiciones estándar deben realizarse unas determinadas medidas que se detallan en la tabla I.1.

Radiación	Air Mass	Temperatura del módulo			
		15 °C	25 °C	50 °C	75 °C
1100	1,5				
1000	1,5				
800	1,5				
600	1,5				
400	1,5				
200	1,5				

**Tabla I.1:** Parámetros establecidos por la IEC 61853-1.

El método propuesto permite completar la tabla I.1 con medidas exteriores, o interiores gracias a un simulador solar. Para realizar las medidas exteriores, necesarias para poder completar la tabla anteriormente definida, la norma plantea un método basado en el uso de filtros. Aplicado a CPV esto introduce una gran complejidad ya que este método basado en filtros está definido para energía fotovoltaica plana, por lo que tendría que ser modificado y estudiado en profundidad para su aplicación en CPV. Si se prescindiera del uso de filtros, las condiciones de radiación y temperatura, definidas en la tabla anterior, son en la práctica imposibles de reproducir en Jaén teniendo en cuenta sus condiciones climatológicas. Durante el desarrollo de este proyecto tampoco se contaba con un simulador solar. Debido a todo esto y que además el método utiliza la temperatura del módulo, y no la del aire, que es a la que se desea definir las características I-V de los módulos CPV estudiados anteriormente, ha hecho declinar la utilización de este método.

- *Método de interpolación lineal*<sup>4</sup>

Este método al igual que el anterior ha sido desarrollado para módulos solares planos. El esquema que sigue este método para poder llevar a cabo la interpolación a unas determinadas condiciones de radiación y temperatura viene definido en tres puntos:

1) Medir cuatro curvas I-V con las siguientes características:

- A. Baja temperatura y baja radiación.
- B. Baja temperatura y alta radiación.
- C. Alta temperatura y baja radiación.
- D. Alta temperatura y alta radiación.

Además de esto, la  $I_{sc}$  de las curvas A y C, y las de B y D debe de ser la misma. Una vez definidas las condiciones a las que se desea trasladar la curva I-V, conocidas como condiciones de calibración, debe cumplirse también que la temperatura de A y B sea menor que la de calibración y la de C y D sea mayor. Respecto a la radiación debe cumplirse también que la de A y C debe ser menor que la de calibración mientras que la de B y D debe de ser mayor.

2) Interpolación lineal de la temperatura para las curvas a baja y alta radiación gracias a una ecuación definida en el método.

3) Interpolación lineal directa para la radiación de las curvas calibradas en temperatura del punto 2.

Este método muestra muy buenos resultados en módulos FV. Además, el conjunto de datos necesario para su aplicación se podría obtener de las medidas de que se disponen. Sin embargo, tal y como ha comentado a lo largo de la tesis, las células MJ tienen una fuerte dependencia con el espectro y este método no plantea ningún tipo de corrección espectral por lo que fue desestimado.

- *Método de interpolación bilineal*<sup>4</sup>

Este método es muy similar al anterior y su descripción se detalla en la misma referencia. El conjunto de curvas necesario para poder aplicar este método es el mismo que el anterior, pero las ecuaciones aplicadas y la metodología difieren ligeramente. La principal diferencia radica en que se definen unas ecuaciones que permiten trasladar tanto en temperatura como en radiación, por lo que la  $I_{sc}$  de las curvas A y C, y las de B y C no tiene por qué ser la misma. Al igual que el otro método, este método ha sido desestimado por no incluir correcciones espectrales.

- *Método de regresión lineal, ASTM E 257-06*<sup>5</sup>

Se trata del estándar americano para evaluar la potencia generada por un módulo o una determinada instalación CPV en condiciones externas de funcionamiento. Las variables que se consideran en el sistema son la DNI, la temperatura del aire ( $T_{aire}$ ) y la velocidad del viento (VV). Se debe medir el módulo o instalación en condiciones externas de funcionamiento y calcular unos coeficientes de regresión lineal  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$ . La fórmula seguida viene dada por:

$$P = DNI (a_1 + a_2 DNI + a_3 T_{aire} + a_4 VV) \text{ Ecuación I.1}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de regresión lineal basta con introducir las condiciones de viento, temperatura del aire y DNI a las que se quiere conocer la potencia. A pesar de ser un estándar usado en América, tal y como ya se ha comentado anteriormente, el hecho de que no defina un procedimiento para corregir el espectro ha hecho desestimar este método.

- *Método ISFOC*<sup>6</sup>

Debido a la falta de estándar para evaluar la potencia de los módulos e instalaciones CPV a unas determinadas condiciones de operación, el Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (ISFOC) define un procedimiento y unas condiciones determinadas para la evaluación de éstos. Este método es el más completo de los vistos hasta ahora, ya que permite correcciones en temperatura, radiación y

espectro. Sin embargo es también el más complejo de aplicar ya que, para llevarlo a cabo de forma precisa se necesita conocer una serie de parámetros difíciles de obtener, como son: la energía del *gap* de cada unión de las células MJ, la corriente fotogenerada por cada unión bajo un espectro determinado o la resistencia térmica entre la célula MJ y la parte posterior del módulo. En caso de no conocer estas características y otras necesarias para su aplicación, el ISFOC proporciona unos valores de las mismas por defecto. Sin embargo, esto introduce errores difíciles de cuantificar, ya que estos valores difieren entre unos módulos y otros. En nuestro caso no se conocen los valores de las características necesarias para poder aplicar este método, por lo que no parece a priori un método recomendable. Además, las condiciones estándar que el ISFOC define son a una determinada temperatura de célula y no a temperatura del aire, lo que ha llevado de nuevo a desestimar este método.

- *Stratified method*<sup>7</sup>

El *Stratified method* o método de estratificación fue presentado por K. Araki et al. Este método fue desarrollado con el objetivo de mejorar el método de interpolación lineal comentado anteriormente, por lo que tiene similitudes con éste. Los principales pasos a seguir por el método se detallan a continuación:

- 1) Fijar un valor de DNI determinado.
- 2) Buscar dos o más factores no lineales y definir los valores estándar. Para la corrección en temperatura del aire y AM el método queda definido con las siguientes curvas.
  - A. Alto AM (AAM) y alta temperatura (AT)
  - B. Alto AM (AAM) y baja temperatura (BT)
  - C. Bajo AM (BAM) y alta temperatura (AT)
  - D. Bajo AM (BAM) y baja temperatura (BT)

Los valores de AM de A y B deben ser más bajos que los valores estándar definidos, mientras que los de C y D deben ser más altos. Al mismo tiempo, la

temperaturas de A y C deben de ser más altas que la estándar y las de B y D más bajas. Cabe destacar que, mientras más cercanos estén los valores de AM y temperatura a los valores estándar, más precisión se tendrá en el procedimiento.

- 3) Tomar cuatro curvas o valores de  $P_{mpp}$  que cumplan los requisitos del punto 1 y 2, es decir, tomar las cuatro curvas definidas en el punto 2 a una radiación determinada, fija para las cuatro curvas.
- 4) Calcular el valor medio de las curvas o de la  $P_{mpp}$  medida.

El método, que destaca por su simplicidad, tiene el inconveniente de que se deben tener un buen número de medidas que permitan definir el conjunto de curvas o valores de  $P_{mpp}$  del punto 2. Gracias a que los módulos bajo estudio han sido medidos a lo largo de un año completo, se tenía un conjunto de medidas suficiente que hacía posible la aplicación de este método. Las ventajas de este método son que introduce correcciones de radiación, ya que ésta está fijada en un valor determinado, de temperatura, y espectrales por medio del uso de la masa del aire.

### **I.3. Descripción del procedimiento final para pasar a condiciones estándar**

Debido a que el *Stratified method* será el método finalmente utilizado para trasladar la característica I-V de un módulo CPV a unas determinadas condiciones externas, en esta sección, se detallará con más profundidad el procedimiento completo seguido.

Una vez escogido el método de estudio, se deben definir las condiciones atmosféricas a las que se quiere conocer las características I-V de cada uno de los módulos del estudio. Las condiciones estándar elegidas fueron: masa de aire de 1,5 (AM1,5) y temperatura ambiente de 20°C. En cuanto a la DNI, se decidió realizar el estudio para diversos niveles de radiación para de esta forma poder comparar los módulos de una forma más completa. Esto va a permitir extraer conclusiones sobre la influencia de la DNI en los módulos y de su comportamiento frente a ésta. En concreto se aplicó el método de estratificación para los siguientes niveles de DNI: 750, 800, 850 y 900 W/m<sup>2</sup>. Además, todos los valores utilizados para trasladar a las condiciones

estándar definidas se tomaron con una velocidad del viento inferior a 2 m/s. Recordemos que la norma IEC 62670-Power Rating, aún en desarrollo, para pasar a condiciones estándar permite una velocidad de hasta 2 m/s. Debido a esto se ha tomado esta condición para eliminar cualquier influencia del viento.

A modo de ejemplo, a continuación se presenta el procedimiento completo seguido para trasladar la característica I-V de uno de los módulos estudiados a unas determinadas condiciones externas, el módulo A. Para los otros dos módulos analizados simplemente se presentaron los resultados obtenidos, ya que el procedimiento es análogo y no aporta información importante.

La tabla I.2 muestra el conjunto total de medidas tomadas para poder evaluar el módulo a las condiciones de temperatura de aire y de AM definidas como estándar, a distintos niveles de radiación. Para llevar a cabo este procedimiento fue necesario tomar datos de verano a invierno y tener, de esa forma, la combinación entre AM y temperatura deseada a los distintos niveles de DNI definidos.

DNI = 750 W/m <sup>2</sup>			Promedio P <sub>mpp</sub> (W)
<b>AAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	68,0
1,73	21,6	67,9	
<b>AAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,68	19,8	68,1	
<b>BAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,42	20,4	67,4	
<b>BAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,40	18,9	68,5	
DNI = 800 W/m <sup>2</sup>			Promedio P <sub>mpp</sub> (W)
<b>AAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	72,7
1,80	31,2	71,9	
<b>AAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,82	14,9	73,7	
<b>BAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,06	25,3	72,1	
<b>BAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,35	19,1	73,8	
DNI = 850 W/m <sup>2</sup>			Promedio P <sub>mpp</sub> (W)
<b>AAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	77,0
1,82	21,3	76,2	
<b>AAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,72	16,6	78,2	
<b>BAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,12	31,2	76,4	
<b>BAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,47	19,3	77,2	
DNI = 900 W/m <sup>2</sup>			Promedio P <sub>mpp</sub> (W)
<b>AAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	81,5
1,61	21,2	81,2	
<b>AAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,52	16,2	82,0	
<b>BAM</b>	<b>AT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,32	27,3	81,2	
<b>BAM</b>	<b>BT</b>	<b>Potencia máxima (W)</b>	
1,46	16,9	81,7	

**Tabla I.2:** Potencia máxima y promedio del valor de las cuatro curvas definidas por el método de estratificación para DNI de 750, 800, 850 y 900 W/m<sup>2</sup> para el módulo A y VV < 2 m/s.

Las tablas I.3, I.4 y I.5 muestran los valores obtenidos tras aplicar el método de estratificación para los tres módulos. De esta forma se va a poder comparar los módulos y conocer cuáles son los que desde un principio muestran un mejor comportamiento y eficiencia. Para el cálculo de la eficiencia se toma el área total del módulo y no el área

activa (área de la lente que concentra la luz) que es la que se suele usar por los fabricantes y laboratorios de calibración<sup>8</sup>. Esto hace que las eficiencias sean un poco menores que las proporcionadas por los laboratorios, al ser el área considerada mayor.

Módulo A		
DNI	$P_{mpp}$ (W)	Eficiencia (%)
750	68,0	20,6
800	72,7	20,6
850	77,0	20,5
900	81,5	20,5

**Tabla I.3:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo A para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

Módulo B		
DNI	$P_{mpp}$ (W)	Eficiencia (%)
750	57,2	19,7
800	61,2	19,8
850	64,5	19,7
900	68,1	19,6

**Tabla I.4:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo B para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

Módulo C		
DNI	$P_{mpp}$ (W)	Eficiencia (%)
750	61,3	17,5
800	66,4	17,8
850	69,8	17,6
900	72,7	17,3

**Tabla I.5:** Resultados obtenidos por el método de estratificación para la potencia máxima y eficiencia para el módulo C para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

Las figuras I.1 y I.2 muestran gráficamente los resultados obtenidos y permiten comparar éstos resultados de una forma más visual. La figura I.1 muestra el buen comportamiento lineal que tiene la  $P_{mpp}$  tras hacer las correcciones en temperatura y masa del aire, habiendo tomado velocidades del viento tales que no influyan en el sistema. Esto parece indicar, en principio, que un modelo matemático basado en la DNI, la temperatura del aire y la masa del aire podría reproducir con suficiente precisión la potencia generada por un módulo CPV. La figura también muestra como el módulo A es el que más potencia tiene, seguido del módulo C y del B, lo cual ya había sido reflejado en los datos aportados por los fabricantes en la tabla 4.2. De la figura I.2 se pueden obtener también algunas conclusiones: el módulo A tiene la mayor eficiencia

para todas las DNI estudiadas, el módulo B muestra la segunda mejor eficiencia, mientras que el C presenta los peores resultados. También se observa como la eficiencia, en los módulos estudiados, es constante prácticamente a lo largo de las radiaciones estudiadas.

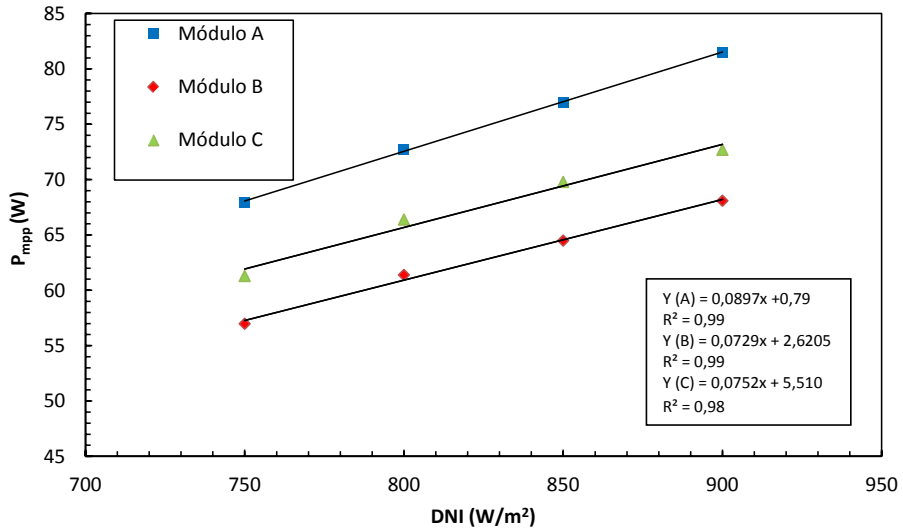


Figura 1.1.  $P_{mpp}$  a distintos niveles de radiación para los módulos A, B y C para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

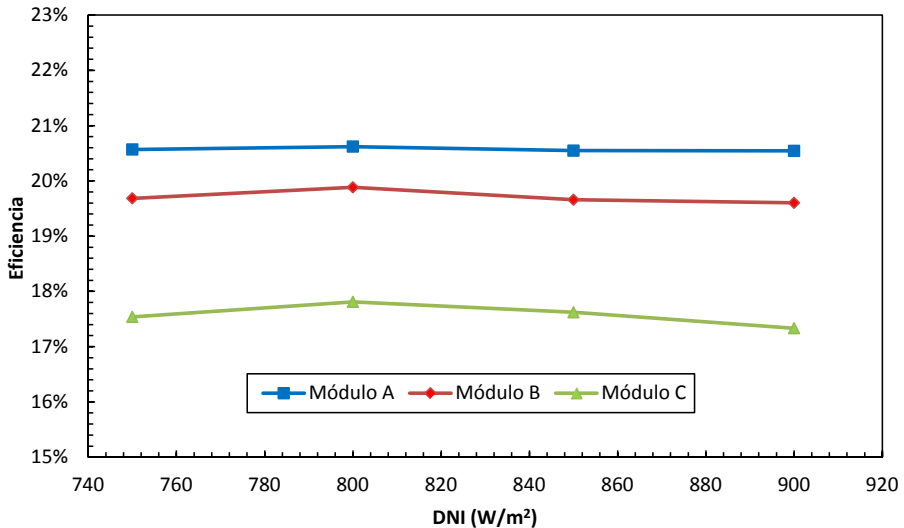


Figura 1.2. Eficiencias a distintos niveles de radiación para los módulos A, B y C para una temperatura de 20 °C, AM1,5 y VV < 2 m/s.

<sup>1</sup>Rubio F., Martínez M., Perea J., Sánchez D., and Banda P., (2009), “Field Tests on CPV ISFOC Plants”, High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications IV, Lori E. Greene.

<sup>2</sup> Castro M., (2010), “Developing CPV Standards”, 3<sup>rd</sup> Concentrated Photovoltaics Summit EU, Seville, Spain, 18-19 November.

<sup>3</sup> Muller M. , Marion B., Rodriguez J., Kurtz S, (2011), “Minimizing Variation in Outdoor CPV Power Ratings”, 7<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, 4-6 April.

<sup>4</sup> Marion B. et al., (2004), “Current-Voltage Curve Translation by Bilinear Interpolation”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 12:593-607.

<sup>5</sup> ASTM standard E2527-09, (2009), “Standard Test Method for Electrical Performance of Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Systems Under Natural Sunlight”.

<sup>6</sup> ISFOC, (2007) “Specifications of General Conditions for the Call for Tenders for Concentration Photovoltaic Solar Plants for the Institute of Concentration Photovoltaic Systems (ISFOC)”.

<sup>7</sup> Araki K. et al, (2008), “A Simple Rating Method for CPV Modules and systems”, 33<sup>rd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, 11-16 May.

<sup>8</sup> Pujol L., Perona A., Bouriel J. R., Landart E. and Dollet Dollet A., (2010), “Outdoor Characterization and Performance Evaluation of Integra-Sun Prototype CPV Module”, 6<sup>th</sup> International Conference of CPV Systems, Freiburg, Germany, 7-9 April.

**Anexo II: Cálculo de la temperatura  
de célula en un módulo CPV**



## **II.1. Introducción**

Como se ha visto a lo largo de esta tesis, conocer la temperatura a la que está trabajando las células de un módulo CPV es un parámetro crítico, ya que su característica I-V va a depender de la temperatura a la que está trabajando. Sin embargo, la medida de la temperatura de las células en los módulos de CPV, por las características especiales de este tipo de módulos, en los cuáles las células están montadas sobre un sustrato rodeado de otros elementos periféricos, es una tarea muy compleja. Debido a esto, va a ser útil encontrar una relación entre la temperatura de las células ( $T_{\text{célula}}$ ) y parámetros meteorológicos como la temperatura del aire ( $T_{\text{aire}}$ ) o la irradiancia normal directa (DNI).

Existen diversos métodos que calculan la temperatura de un módulo CPV en función de algunos de los parámetros mencionados anteriormente, sin embargo, como se verá en la siguiente sección, los procedimientos empleados suelen ser complejos, necesitando en ocasiones caracterizar el módulo CPV bajo estudio en condiciones controladas mediante un simulador solar o conocer parámetros intrínsecos del módulo, a los que no se tiene acceso fácilmente. Todos estos inconvenientes han llevado a plantear el objetivo de este trabajo: encontrar una expresión que permita calcular fácilmente la temperatura de las células de un módulo CPV a partir de parámetros meteorológicos.

## **II.1. Expresiones para obtener la temperatura de célula en los módulos de CPV**

El aumento de la temperatura de las células en sistemas CPV es un gran problema, ya que, como se vio en el capítulo 3, la eficiencia de la célula solar fotovoltaica, y en particular de una célula MJ, disminuye con el aumento de temperatura de la célula. Así que, conocer la temperatura de la célula, a la que un módulo CPV está trabajando va a ser un dato necesario para evaluar de forma adecuada el rendimiento energético del sistema.

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la medida de la temperatura de las células en los módulos de CPV es una tarea muy compleja, por las características especiales de este tipo de dispositivos. Por otro lado, cuando se quiere evaluar la producción energética de un sistema CPV, por lo general, los únicos datos disponibles

son los parámetros meteorológicos del lugar donde se encuentra emplazado, proporcionados por estaciones meteorológicas. Por lo tanto, va a ser útil encontrar una relación que permita conocer la temperatura a la que se encuentran las células de un módulo CPV a partir de los parámetros meteorológicos del lugar donde se encuentre ubicado el sistema CPV.

Con el fin de resolver el problema de la influencia de la temperatura en los módulos de CPV varios autores han tratado de encontrar métodos que permita obtener la temperatura a la que están trabajando las células de un módulo CPV ( $T_{\text{célula}}$ )<sup>1,2,3</sup>. El Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (ISFOC), en colaboración con el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid (IES-UPM), han desarrollado un método<sup>1,2</sup> que permite el cálculo de la temperatura de funcionamiento de una célula solar de concentración mediante la medición de la temperatura de la superficie posterior del módulo CPV, teniendo en cuenta la resistencia térmica entre la célula solar y la parte posterior del módulo CPV. Sin embargo, el cálculo de esta resistencia térmica requiere un conocimiento detallado acerca de los materiales que se utilizaron y el montaje del módulo, información que suele estar sujeta a la confidencialidad y no es un dato que los fabricantes de módulos CPV proporcionen. Esto hace que el método sea, en la práctica, difícil de implementar. En<sup>3</sup> G. Peharz et. al., presentan un método que permite la determinación de la temperatura media de células solares en un módulo CPV. El módulo se mide de forma sistemática en un simulador solar, mientras que se varía la temperatura media del módulo y la irradiancia. A partir de las medidas, se obtiene una función que permite calcular la temperatura promedio de las células solares de un módulo CPV a partir de la medida de su característica I-V. El módulo CPV actúa como un sensor de temperatura, de forma que, cuando el módulo está funcionando al aire libre, la temperatura media de las células solares en el módulo se puede obtener sin tener que medir la temperatura directamente. Sin embargo, el módulo debe ser caracterizado previamente en condiciones controladas con un simulador, para poder variar de forma sistemáticamente la temperatura y obtener los parámetros del modelo. Esto hace que el método, al igual que el anterior, sea difícil de aplicar en la práctica.

La dificultad a la hora de medir la temperatura de las células en un módulo CPV ha llevado a otros autores a definir un nuevo parámetro: la temperatura de módulo, y a

tratar de encontrar una relación entre esta temperatura y los parámetros meteorológicos<sup>4,5</sup>: Así, J. Jaus<sup>4</sup> et. al. investigaron el comportamiento de un módulo CPV bajo la luz solar real. Para ello midieron el módulo en condiciones controladas, mediante el uso de un simulador solar, y en condiciones de funcionamiento a sol real. En<sup>5</sup> Y. Kemmoku et. al., plantearon un modelo de cálculo de la temperatura del módulo de un sistema CPV, con el fin de estimar la generación de energía con un sistema de estas características y el coste de ésta generación. Sin embargo, estos métodos plantean una serie de cuestiones difíciles de resolver ya que no definen que es la temperatura de módulo, dónde se mide, cómo se mide, ni qué relación existe entre este parámetro y la temperatura a la que están trabajando las células. Además en el primer caso es necesario el uso de un simulador solar, mientras que en el segundo método es necesario conocer los parámetros intrínsecos del módulo objeto de estudio, parámetros que no son fáciles de conseguir. Todo lo anterior hace que ambos métodos sean, igual que los métodos anteriores, difíciles de aplicar.

### II.3. Medidas experimentales

Como se ha visto en el apartado anterior, obtener la temperatura a la que están trabajando las células en un módulo CPV ( $T_{\text{célula}}$ ) es una tarea compleja.

El objetivo de este trabajo es obtener una expresión que permita relacionar la  $T_{\text{célula}}$  con los parámetros meteorológicos del lugar en el que se encuentre situado el sistema CPV:  $T_{\text{air}}$ , DNI, VV, etc., sin necesidad de conocer la estructura interna de módulo, ni medir sus parámetros eléctricos mediante complejos sistemas de medida. Para conseguir este objetivo, se han realizado medidas de la temperatura de una célula de un módulo CPV trabajando en condiciones de funcionamiento a sol real.

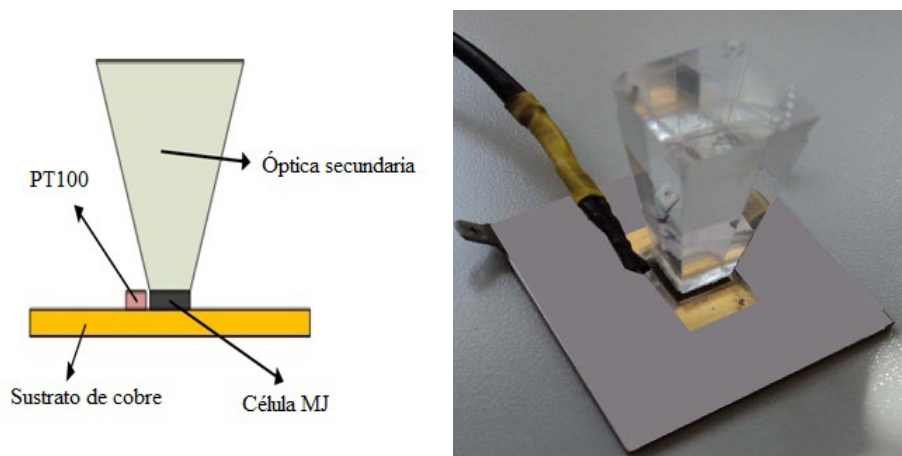
Para medir la temperatura de la célula, se ha colocado un sensor de temperatura PT100 de cuatro hilos lo más cerca posible a la célula solar, en el receptor de concentración en el interior del módulo, figura II.1. Esta temperatura se define como la temperatura de la célula. Para este estudio, el módulo se colocó en un seguidor solar. Se utilizó un sistema de adquisición de datos para registrar la temperatura de la célula. Además, junto con estas medidas, se han recogido también los principales parámetros atmosféricos que van a influir en el comportamiento de un módulo CPV, como por

ejemplo: la radiación normal directa, la velocidad y dirección del viento, la temperatura del aire o la humedad relativa. Estos parámetros han sido medidos con una estación meteorológica. El esquema del montaje experimental fue descrito con detalle en el capítulo 4. Todos los parámetros fueron grabados diariamente a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Como se comentó en el capítulo 4, el módulo dotado de sondas de temperatura era el módulo B. Las principales características de este módulo se muestran en la Tabla II.1.

Concentración	Óptica	Tipo de células solares	Número de células solares	Refrigeración	Área del módulo (m <sup>2</sup> )
500	Lentes Fresnel con óptica secundaria	Lattice-matched GaInP/GaInAs/Ge	6 células en serie	Pasiva	0,39

**Tabla II.1:** Características del módulo B medido. Todas las células están protegidas con diodos bypass.



**Figura II.1:** Esquema (izquierda) y fotografía (derecha) del montaje experimental para medir la temperatura de la célula. La PT100 de cuatro hilos se coloca lo más cerca posible a la célula solar, en los receptores de concentración en el interior del módulo. La distancia entre la célula solar y la PT100 es de 5 mm.

Como se vio en este capítulo, las medidas llevadas a cabo durante el año de medida pueden considerarse representativas de Jaén, de modo que pueden ser utilizadas para este estudio. La relación que se obtenga para la temperatura de la célula puede ser

considerada válida para las diferentes condiciones de operación en las que puede encontrarse un módulo CPV situado en Jaén a lo largo de un año.

La Tabla II.2 muestra, a modo de resumen, los valores máximos y mínimos de los parámetros meteorológicos medidos durante el año utilizado en el estudio.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo
DNI	W/m <sup>2</sup>	0	974
Temperatura del aire	°C	3,6	42
Temperatura de la célula	°C	2,7	85
Velocidad del viento	m/s	0	8,4

**Tabla II.2:** Valores máximos y mínimos de la DNI, temperatura del aire, temperatura de la célula y velocidad del viento, medidos en Jaén durante el año utilizado en el estudio.

#### II.4. Método para el cálculo de la temperatura de la célula de un módulo CPV a partir de parámetros atmosféricos

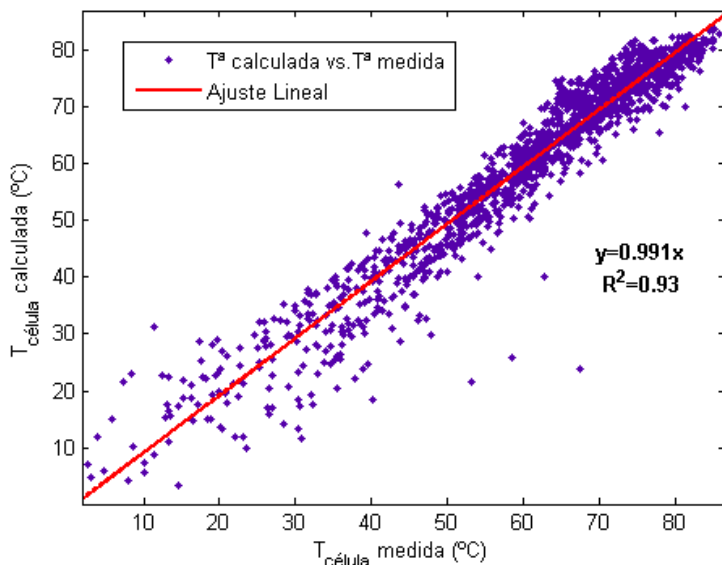
Después de verificar la validez de las mediciones realizadas, se va a tratar de establecer la relación entre los parámetros atmosféricos: temperatura del aire ( $T_{\text{aire}}$ ), irradiancia normal directa (DNI) y velocidad del viento (VV), y la temperatura de las células ( $T_{\text{célula}}$ ) de un módulo CPV.

A partir de los datos medidos en el módulo y usando una estimación lineal, se obtiene la siguiente relación:

$$T_{\text{célula}}(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{aire}}(^{\circ}\text{C}) + 60,12 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kW m}^{-2}} \right) \text{DNI} \left( \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) - 1,46 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m s}^{-1}} \right) \text{VV}(\text{m/s})$$

**Ecuación II.1**

En la figura II.2 se representan los valores medidos de temperatura de célula frente a los calculados utilizando la expresión anterior. Como se puede observar en esta figura, los valores calculados de la temperatura de célula, utilizando la expresión anterior tiene un  $R^2$  de 0,93. Esto indica un buen ajuste entre la temperatura de la célula medida y la temperatura calculada mediante la ecuación II.1.



**Figura II.2:** Temperatura de la célula medida frente a la temperatura de la célula calculada usando la ecuación I.1.  $R^2$  es 0,93, lo que indica un buen ajuste entre la temperatura de la célula medida y la calculada.

Para llevar a cabo un análisis más exhaustivo se calcula el error relativo (ER):

$$\text{Error relativo(\%)} = \frac{(T_{\text{célula medida}} - T_{\text{célula calculada}})}{T_{\text{célula medida}}} \quad \text{Ecuación II.2}$$

Las figuras II.3, II.4 y II.5, muestran el error en el cálculo de la temperatura de célula en función de diferentes parámetros meteorológicos.

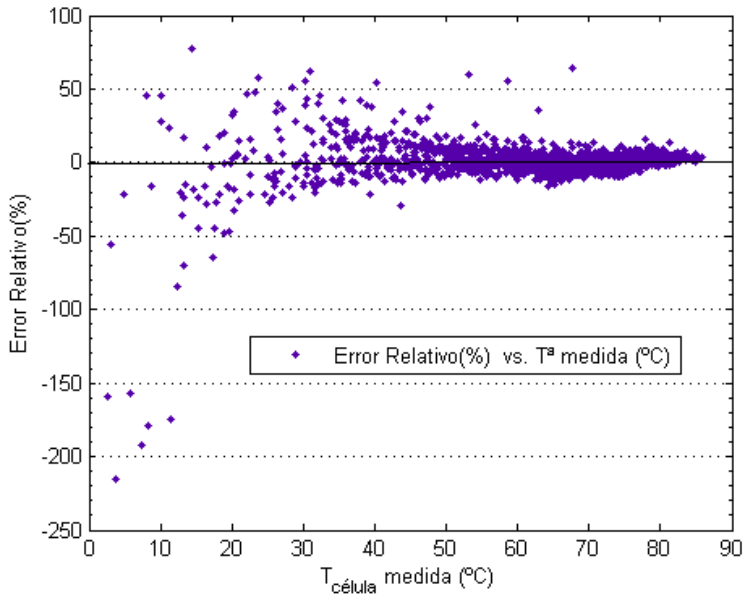
La figura II.3 muestra el error relativo en el cálculo de la temperatura de célula en comparación con la temperatura de célula medida. Como se puede observar:

- El error es mayor para temperaturas inferiores a 30 ° C, con un valor promedio de -16,23%. El mayor número de errores es negativo, es decir, el valor calculado es mayor que el medido.
- Para temperaturas medias, temperaturas en el rango de 30 ° C a 60 ° C, los errores están en torno a cero, pero la mayoría son positivos, esto significa que el

valor calculado es menor que el medido. En este caso, el error medio es del 4,20%.

- Para temperaturas superiores a 60 ° C es cuando los errores son menores, siendo el valor promedio del error del 0,07%.

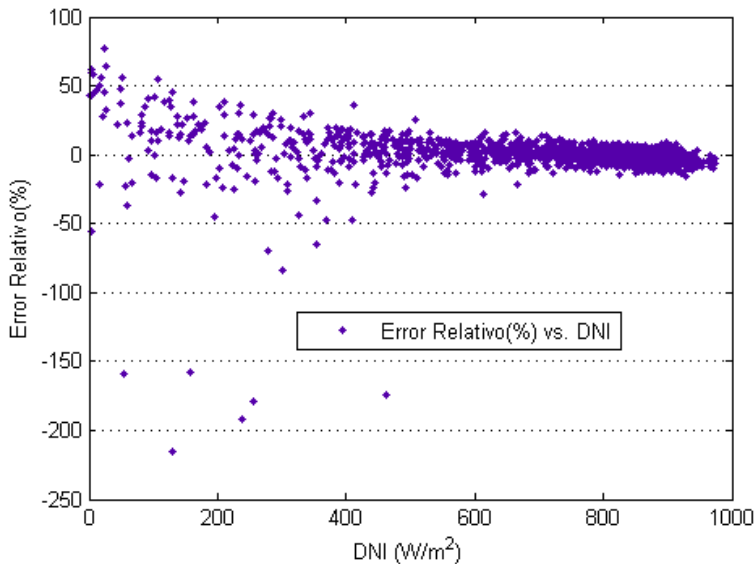
En conclusión, parece que la fórmula propuesta para calcular la temperatura de la célula, sobrestima el valor de la temperatura de las células a bajas temperaturas, subestima el valor para temperaturas medias y tiene el menor error para altas temperaturas, es decir, es para altas temperaturas ( $T > 60^{\circ}\text{C}$ ) donde la fórmula propuesta mejor se ajusta.



**Figura II.3:** Error relativo (%) frente a la temperatura de la célula medida. Para altas temperaturas los errores están en torno a cero.

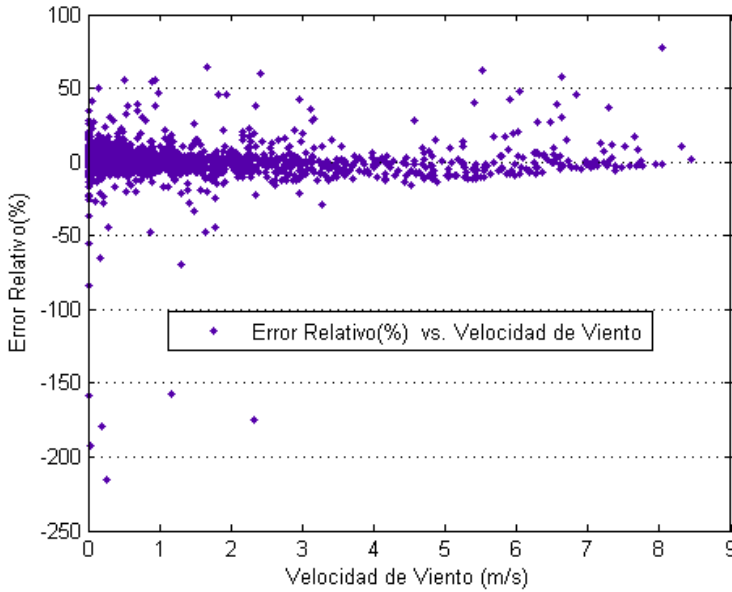
A partir de las medidas realizadas, se comprueba que el 90% de estas medidas son para temperaturas de la célula mayores de 30 °C. Esto indica, que se podría utilizar esta expresión para calcular la energía producida por un sistema de CPV situado en Jaén, ya que la mayor parte de la energía producida por un sistema CPV se obtiene a altas temperaturas, donde el error cometido en el cálculo de temperatura de la célula es menor.

La Figura II.4 muestra el error relativo en el cálculo de la temperatura de célula en comparación con la DNI. En este caso los mayores errores se producen para DNI menores de  $400\text{W/m}^2$ , con un valor promedio de  $4,80\%$ . Para valores de DNI mayores de  $400\text{W/m}^2$  los errores se encuentran en torno a cero, siendo en este caso, el valor medio de  $-0,17\%$ . Pero, como se comentó en el capítulo 4, la mayor contribución de la energía directa recibida en Jaén para todo el año se encuentra para radiaciones mayores de  $400\text{W/m}^2$ , en concreto un  $95\%$  de la energía recibida. Como en el caso anterior, la mayor parte de la energía de un sistema CPV se obtiene para altos niveles de DNI, de modo que la expresión se puede utilizar para estimar la energía sin que se cometan grandes errores.



**Figura II.4:** Error relativo (%) en el cálculo de la temperatura de célula en comparación con DNI. Para DNI mayores de  $400\text{W/m}^2$  los errores están alrededor de cero.

La figura II.5 muestra el error en el cálculo de la temperatura de célula, utilizando la ecuación II.1, en comparación con la velocidad del viento. En este caso, el error está en la mayoría de las ocasiones alrededor de cero, siendo su valor promedio de  $0,45\%$ . Esto indica que la influencia de la velocidad del viento en el cálculo de la temperatura de la célula es baja.

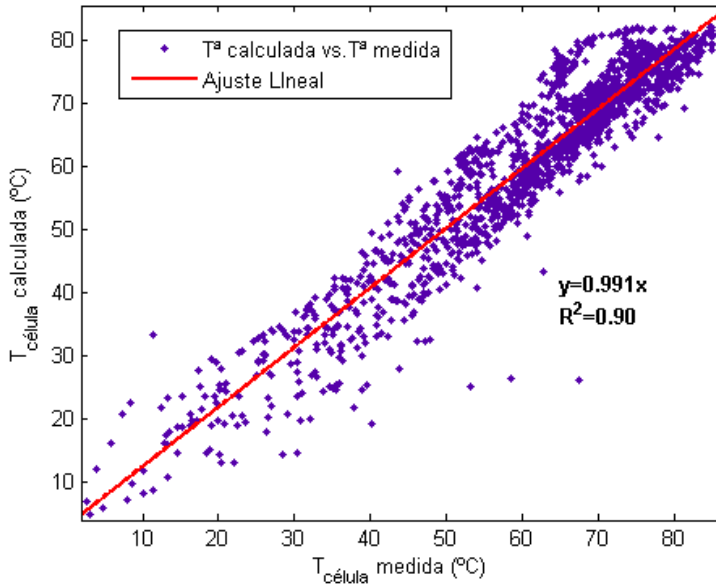


**Figura II.5:** Error relativo (%) en el cálculo de la temperatura de célula en comparación con la velocidad del viento. El error está en la mayoría de los casos alrededor de cero.

Como ha se visto anteriormente, la ecuación propuesta, ecuación II.1, podría ser una buena expresión para calcular la temperatura de la célula del módulo bajo estudio en Jaén. Si en la ecuación anterior no consideran los efectos del viento, ya que como se ha visto en la figura II.5, la influencia del viento en el cálculo de la temperatura de la célula de un módulo CPV es baja, sigue existiendo una buena relación entre la temperatura de la célula y la temperatura ambiente y la DNI. Al igual que en el caso anterior, a partir de los datos medidos y usando la estimación lineal, se obtiene la siguiente relación:

$$T_{\text{célula}}(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{aire}}(^{\circ}\text{C}) + 57,09 \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kW m}^{-2}} \right) \text{DNI}(\text{kW m}^{-2}) \quad \text{Ecuación II.3}$$

En este caso, se tiene una  $R^2$  de 0,90 en lugar de una  $R^2$  de 0,93, figura II.6.



**Figura II.6:** La temperatura de la célula medida frente a la temperatura de la celda calcula utilizando la ecuación 8. El R2 es 0,90, lo que indica un buen ajuste entre la temperatura de la célula mide y calcula la temperatura de células.

Como se ha visto, se ha obtenido una expresión para calcular la temperatura de las células de un módulo CPV ubicado en Jaén a partir de la temperatura del aire, la DNI y la velocidad del viento. Esta expresión se podría extender a otros módulos y en otros lugares, siguiendo la estructura propuesta. Además se ha obtenido también una expresión simplificada considerando sólo la temperatura del aire y la DNI. Siendo los errores obtenidos con ambas expresión pequeños.

<sup>1</sup> ISFOC, (2007), “Specifications of General Conditions for the Call for Tenders for Concentration Photovoltaic Solar Plants for the Institute of Concentration Photovoltaic Systems (ISFOC)”.

<sup>2</sup> Rubio F., Martínez M., Coronado R., Pachón J.L., Banda P., (2008), “Deploying CPV Power Plant: ISFOC Experiences”, 33<sup>rd</sup> IEEE PVSC, San Diego, USA, 11-16 May.

<sup>3</sup> Peharz G., Ferrer Rodriguez J. P., Siefer G., Bett A.W., (2011), “A Method for Using CPV Modules as Temperature Sensors and its Application to Rating Procedures”, Solar Energy Materials & Solar Cells 95 2734–2744.

<sup>4</sup> Jaus J., Peharz G., Gombert A., Ferrer Rodriguez J. P., Dimroth F., Eltermann F., Wolf O., Passig M., Siefer G., Hakenjos A., Riesen S. V., Bett A.W., (2009), “Development of FLATCON® Modules Using Secondary Optics”, 34<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Philadelphia, USA, 7-12 June.

---

<sup>5</sup> Kemmoku Y., Egami T., Hiramatsu M., Miyazaki Y., Araki K., Ekins-Daukes N. J., Sakakibara T., (2004), “Modelling of Module Temperature of a Concentrator PV System”. 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June.



## Publicaciones generadas en el marco de la tesis

- **Publicaciones en revistas internacionales**
  - ✓ Fernández E. F., Fernández, Pérez-Higueras P., Garcia Loureiro A. J. and Vidal P. G., (2012), “Outdoor Evaluation of Concentrator Photovoltaic Systems Modules from different Manufacturers: First Results and Steps”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, DOI: 10.1002/pip.1262.
  - ✓ Fernández E. F., Almonacid F., Rodrigo P., Pérez-Higueras P., Garcia Loureiro A. J., (2012), “A New Method for Estimating the Maximum Power Point of a CPV Module under Real Conditions”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, (*Under review*).
  - ✓ Pérez-Higueras P. J., Rodrigo P., Fernández E. F., Almonacid F., Hontoria L., (2012), “A Simplified Method for Estimating Direct Normal Solar Irradiation from Global Horizontal Irradiation useful for CPV Applications”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, (*Under review*).
- **Aportaciones a congresos**
  - ✓ Fernández E. F., Pérez-Higueras P., Almonacid F., Garcia Loureiro A. J., Fernández J. I., Rodrigo P., Vidal P. G., Almonacid G., (2012), “Quantifying the Effect of Air Temperature in CPV Modules under Outdoor Conditions”, 8<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Toledo, Spain, 16-18 April, (*Accepted, In press*).
  - ✓ Fernández E. F., Siefer G., Schachtner M., Garcia Loureiro A. J., Pérez-Higueras P., (2012), “Temperature Coefficients of Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells under different Spectra and Irradiance Levels”, 8<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Toledo, Spain, 16-18 April, (*Accepted, In press*).

- ✓ Rodrigo P., Pérez-Higueras P. J., Almonacid F., L. Hontoria, Fernández E. F., Rus C., Fernández J. I., Gómez P. and Almonacid G., (2012), “Calculation of Direct Normal Irradiation from Global Horizontal Irradiation”, 8<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Toledo, Spain, 16-18 April, (*Accepted, In press*).
- ✓ Rodrigo P., Almonacid F., Pérez-Higueras P. J., Fernández E. F., Rus C., Fernández J. I., Aguilar J. D., Hontoria L., Gómez P. and Almonacid G., (2012), “A Model for the Electrical Characterization of Partially Shadowed Concentration Solar Cells”, 8<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Toledo, Spain, 16-18 April, (*Accepted, In press*).
- ✓ Fernández E. F., Pérez-Higueras P., Fernández J. I., Almonacid F., Rodrigo P. M., García Loureiro A. J., Hontoria L., P. Vidal G., Almonacid G., (2011), “Influence of Air Mass, DNI and Air Temperature in CPV Modules: Study of different Technologies”, 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 September, p.644-646.
- ✓ Fernández E. F., García Loureiro A. J., Pérez Higuera P. J., Siefer G., (2011) “Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells under different Temperatures and Spectra”, 8<sup>th</sup> IEEE CED 2011, Palma de Mallorca.
- ✓ Fernández E. F., Garcia Loureiro A., Perez Higuera P. J., Almonacid F. and Siefer G., (2011), “Study of Ga<sub>0.50</sub>In<sub>0.50</sub>P/Ga<sub>0.99</sub>In<sub>0.01</sub>As/Ge Solar Cell using a Mathematical Model”, 8<sup>th</sup> IEEE CED, Palma de Mallorca, Spain, p.105.
- ✓ Fernández E. F., García Loureiro A. J., Pérez Higuera P. J., Siefer G., (2011), “Temperature Dependence of Monolithic III-V Triple-Junction Solar Cells”, 8<sup>th</sup> IEEE CED, Palma de Mallorca, Spain, p.225.