



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS
DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON
DEFECTOS**

~~~~~

**AUTOR: DIEGO CAPILLA ROMO**

**DEPARTAMENTO: CIENCIAS AGROFORESTALES**

**TUTOR/ES: VICTOR ALONSO GÓMEZ  
LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO**

**SORIA, SEPTIEMBRE DE 2022**



Universidad de Valladolid



## ***AUTORIZACIÓN de los TUTORES del TRABAJO FIN DE MÁSTER***

D. VÍCTOR ALONSO GÓMEZ, profesor del departamento de Física Aplicada y D. LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO, profesor del departamento de ingeniería Agrícola y Forestal como tutores del TFM titulado; "**Caracterización Térmica y Eléctrica de los modos de funcionamiento de un módulo fotovoltaico con defectos**" presentado por el alumno D. DIEGO CAPILLA ROMO, da el Vº. Bº. y autoriza la presentación del mismo, considerando que el alumno ha desarrollado un TFM acorde con las expectativas del mismo, cumpliendo las condiciones exigibles para su presentación y defensa ante un tribunal.

Soria, 5 de Septiembre de 2022

Los tutores del TFM

Fdo.: Víctor Alonso Gómez

Fdo.: Luis Hernández Callejo

|                                      |                                                                                                                                                               |               |                     |  |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|--|
| <b>Código Seguro De Verificación</b> | BvK11fpr0zUmmsRqtKya6w==                                                                                                                                      | <b>Estado</b> | <b>Fecha y hora</b> |  |
| <b>Firmado Por</b>                   | Victor Alonso Gomez                                                                                                                                           | Firmado       | 13/09/2022 12:22:41 |  |
|                                      | Luis Hernandez Callejo                                                                                                                                        | Firmado       | 13/09/2022 10:31:26 |  |
| <b>Observaciones</b>                 |                                                                                                                                                               | <b>Página</b> | 1/1                 |  |
| <b>Url De Verificación</b>           | <a href="https://sede.uva.es/Validacion_Documentos?code=BvK11fpr0zUmmsRqtKya6w==">https://sede.uva.es/Validacion_Documentos?code=BvK11fpr0zUmmsRqtKya6w==</a> |               |                     |  |
| <b>Normativa</b>                     | Este informe tiene carácter de copia electrónica auténtica con validez y eficacia administrativa de ORIGINAL (art. 27 Ley 39/2015).                           |               |                     |  |

## ***DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD***

D. DIEGO CAPILLA ROMO, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el Trabajo Fin de Máster que presento para su exposición y defensa titulado **Caracterización Térmica y Eléctrica de los modos de funcionamiento de un módulo fotovoltaico con defectos**, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Soria, 5 de Septiembre de 2022

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Fdo.: Diego Capilla Romo

# **RESUMEN del TRABAJO FÍN DE MÁSTER**

**TÍTULO: "CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS"**

DEPARTAMENTO: CIENCIAS AGROFORESTALES

TUTOR: VICTOR ALONSO GÓMEZ; LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO

AUTOR: DIEGO CAPILLA ROMO

Este Trabajo de Fin de Máster consiste en la caracterización térmica y eléctrica de un módulo fotovoltaico con defectos, mediante la utilización de un prototipo trazador I-V. Se ha fabricado el módulo específicamente para este trabajo a partir de seis células pequeñas y tres diodos de bypass para poder trabajar con un prototipo controlable a nivel laboratorio. A partir de los datos que se obtienen en las curvas I-V y P-V realizadas en laboratorio, han sido comparados con las simulaciones realizadas en LTspice, bajo un sistema de iluminación de LEDs infrarrojo para verificar el correcto funcionamiento del prototipo trazador I-V. Y si el módulo se comportaba como la teoría decía. Para poder verificar el prototipo se han realizado 23 casos diferentes sobre el módulo fotovoltaico estudiado.

Adicionalmente se ha caracterizado térmicamente el módulo mediante la colocación de 6 sensores que han permitido observar cómo se comportan los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico con el aumento de temperatura. Los resultados que se han obtenido en el laboratorio se han comparado con la teoría para verificar si esta se cumplía y en caso de que no se cumpliera, establecer cuales podían ser las causas.

Por último se han explicado los diferentes materiales y métodos necesarios para poder ejecutar la caracterización de los parámetros del módulo. Además de exponer de forma teórica las formulas y simulaciones con las que se han comparado los resultados obtenidos en laboratorio.

# ÍNDICES

## **ÍNDICE**

|                                                                                                  |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Introducción.....                                                                             | 1      |
| 1.1.- Antecedentes.....                                                                          | 4      |
| 1.2.- Objetivos.....                                                                             | 5      |
| 1.3.- Motivación.....                                                                            | 5      |
| 2.- Materiales y Métodos.....                                                                    | 6      |
| 2.1.- Programas Utilizados.....                                                                  | 6      |
| 2.2.- Equipos Empleados en el Trabajo.....                                                       | 7      |
| 2.3.- Métodos utilizados.....                                                                    | 15     |
| 3.- Resultados y Discusión.....                                                                  | 17     |
| 3.1.- Dependencia de los parámetros del módulo<br>fotovoltaico en función de la temperatura..... | 21     |
| 4.- Conclusiones y Trabajos Futuros.....                                                         | 28     |
| 5.- Bibliografía.....                                                                            | 29     |
| <br>ANEXO Nº 1: CASOS SIMULADOS EN LTSPICE VS MEDIDAS REALES<br>LABORATORIO.....                 | <br>31 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Funcionamiento de una célula Solar.....                                                                       | 2  |
| Figura 2. Componentes absorbible y disipada de la irradiancia espectral solar a nivel terrestre.....                    | 2  |
| Figura 3. Captura Programa LTspice XVII.....                                                                            | 5  |
| Figura 4. Programa Python, lenguaje de programación.....                                                                | 6  |
| Figura 5. Esquema del trazador I-V propuesto.....                                                                       | 6  |
| Figura 6. Circuito equivalente trazador I-V y trayectoria medida de la curva I-V del módulo PV.....                     | 7  |
| Figura 7. Prototipo Trazador I-V, con sus elementos electrónicos .....                                                  | 8  |
| Figura 8. Prototipo trazador I-V y chasis modular utilizado.....                                                        | 8  |
| Figura 9. Chasis modular diseñada para la medida de curvas I-V, electroluminiscencia, termografía y otras técnicas..... | 9  |
| Figura 10. Chasis modular con el complemento para soportar la placa de iluminación LED.....                             | 9  |
| Figura 11. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.....                                                         | 10 |
| Figura 12. Célula fotovoltaica (78mm*52mm).....                                                                         | 10 |
| Figura 13. Módulo fotovoltaico utilizado.....                                                                           | 11 |
| Figura 14. Parámetros módulo fotovoltaico analizado.....                                                                | 11 |
| Figura 15. Circuito equivalente del módulo fotovoltaico.....                                                            | 12 |
| Figura 16. Eficiencia cuántica externa de una célula fotovoltaica de silicio .....                                      | 12 |
| Figura 17. Sistema de iluminación LED utilizado.....                                                                    | 13 |
| Figura 18. Fuentes de alimentación utilizadas para la medición del módulo PV.....                                       | 13 |
| Figura 19. Representación, Fórmulas y Parámetros principales de la Curva I-V .....                                      | 15 |
| Figura 20. Gráficas Curvas I-V modulo fotovoltaico con defectos (izq) y sin defectos (dcha).....                        | 15 |
| Figura 21. Graficas Curvas P-V módulo fotovoltaico sin defectos (izq) y con defectos (dcha).....                        | 16 |
| Figura 22. Comparación de una Curva I-V del módulo fotovoltaico medida Real laboratorio Vs simulada en LTspice.....     | 17 |
| Figura 23. Curva I-V del módulo fotovoltaico ensayado, datos en bruto (dcha) y datos filtrados (izq).....               | 18 |
| Figura 24. Esquema circuito eléctrico del módulo fotovoltaico utilizado.....                                            | 18 |
| Figura 25. Configuración módulo fotovoltaico Caso 1 (izq) y Caso 2 (dcha).....                                          | 19 |
| Figura 26. Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes temperaturas.....                                            | 24 |
| Figura 27. Curvas P-V de un módulo fotovoltaico a diferentes temperaturas.....                                          | 25 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Características técnicas del Prototipo trazador I-V.....                                                                                                                  | 8  |
| Tabla 2. Características técnicas de las células fotovoltaicas utilizadas en el módulo fotovoltaico en condiciones estándar (1000 W/m <sup>2</sup> de espectro solar y 25 °C)..... | 10 |
| Tabla 3. Características técnicas del módulo fotovoltaico en condiciones estándar (1000 W/m <sup>2</sup> de espectro solar y 25 °C).....                                           | 11 |
| Tabla 4. Irradiación Foco LED.....                                                                                                                                                 | 14 |
| Tabla 5. Variación de los coeficientes de temperatura $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ .....                                                                                          | 24 |

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 1. Evolución de la irradiación de Foco LED en función de la corriente (A)..... | 14 |
| Gráfica 2. Curvas I-V Trazador y LTspice (Caso N° 1 y Caso N° 2).....                  | 19 |
| Gráfica 3. Curvas P-V Trazador y LTspice (Caso N° 1 y Caso N° 2).....                  | 19 |
| Gráfica 4. Variación de la tensión y la intensidad con respecto a la temperatura... .. | 22 |
| Gráfica 5. Evolución del Coeficiente de temperatura de intensidad ( $\alpha$ ).....    | 22 |
| Gráfica 6. Evolución del Coeficiente de temperatura de tensión ( $\beta$ ).....        | 23 |
| Gráfica 7. Evolución del Coeficiente de temperatura de potencia ( $\gamma$ ).....      | 23 |
| Gráfica 8. Variación Curva I-V variando la Irradiancia.....                            | 26 |

## **1.- Introducción**

La energía fotovoltaica es una de las energías renovables que está teniendo una mayor implantación y desarrollo, siendo en la actualidad una de las principales renovables en generación de energía eléctrica. Esto hace que exista una constante investigación acerca de cómo puede ser cada vez más eficiente y más rentables en términos económicos, aumentando la rentabilidad de la inversión. Otra de las áreas de la energía fotovoltaica que está en constante investigación es la de la medición y detección de defectos en las células y módulos fotovoltaicos, sobre todo para que los operadores y mantenedores de las plantas puedan detectar los paneles rotos y decidir si se deben sustituir o no para producir más. Esto no es tan sencillo de decidir porque hay que tener en cuenta el importe económico que supone cambiar el panel (mano de obra, material, etc.) y el importe perdido por dejar de producir menos electricidad.

Para ello se han desarrollado muchas técnicas que ayudan a determinar el comportamiento del módulo fotovoltaico, para optimizar la operación y mantenimiento. Pero, para llegar a desarrollar nuevas técnicas de medición que nos permitan detectar fallos o tecnologías que ayudan a mejorar estas detecciones en el módulo fotovoltaico, hace falta detectar donde se producen fallos a la hora de medir la generación de energía fotovoltaica, que tiene gran importancia a día de hoy.

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que se da en determinados materiales, mediante el cual dicho material es capaz de absorber radiación solar y gracias a ello, emitir electrones o pasarlos a un estado energético en el que puedan moverse con mayor libertad por dicho material semiconductor. El efecto fotoeléctrico, es el aprovechamiento de estas propiedades mediante un dispositivo que transforma parte de la energía lumínica incidente en energía eléctrica. A este dispositivo, se le denomina célula fotovoltaica y el conjunto de estas forman los módulos fotovoltaicos.[1-2]

Es decir, dentro del material que se utiliza para fabricar las células, algunos electrones atrapan un fotón y aumentan su propia energía con la energía de fotón con el que han interactuado. Al aumentar su energía, si esta es suficiente, pasan de la banda de valencia a la banda de conducción y se pueden mover "libremente" por el material.

Pero esto en un material de una sola composición no serviría de nada porque, igual que esos electrones han subido a la banda de conducción por tener más energía, otros electrones caerían a los huecos dejados en la banda de valencia por estos, emitiendo un fotón con esa energía que tenían de más por estar en la banda de conducción. De este modo, no se podría aprovechar esa ganancia de energía en el material porque duraría muy poco y no se podría sacar esos electrones de ese material a través de unos cables como una corriente que pueda realizar un trabajo eléctrico.

Por eso hay que poner una unión P-N, para que pueda haber una diferencia de potencial mantenida en el tiempo mientras haya una irradiación adecuada sobre la célula.[3-4]

El semiconductor es el alma de una célula fotovoltaica, en nuestro caso es de silicio (*Si*), el cual ha sido sometido a altas temperaturas y a varios procesos de purificación hasta llegar a ser una delgada lámina cristalina de silicio. Se necesita modificar la estructura atómica del *Si* que tiene 4 electrones de valencia, para que se comporte como un semiconductor de tipo N, este debe ser dopado con otros elementos como el fósforo (*P*) que poseen exceso de electrones en la banda de valencia y así poder moverse libremente al ser inducido por los fotones de la

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

radiación solar. Un semiconductor tipo N por sí solo no es capaz de generar corriente, para ello es necesario unirlo con un semiconductor tipo P, que al combinar el cristal de *Si* con un elemento como el Boro (*B*) con defecto de electrones de valencia, provoca un hueco en la estructura atómica del *Si*, al juntar ambos semiconductores se forma una unión del tipo P-N. En la región donde se forma esta unión se genera una zona de vaciamiento y el campo eléctrico. Pero esa diferencia de potencial no se puede aprovechar, porque sólo existe en esa zona central como barrera para que no puedan pasar más electrones de la zona que tiene exceso de electrones en la banda de conducción (material tipo N) al que tiene defecto de electrones en la banda de valencia (material tipo P). Y, precisamente el valor en potencial de esa barrera es el voltaje umbral que necesitas para conseguir que un diodo conduzca cuando se aplica el campo eléctrico externo en sus extremos. Por eso un diodo no conduce por debajo del voltaje umbral.

Cuando la unión P-N está iluminada, se produce el efecto fotoeléctrico en toda la célula, pero sólo puedes aprovechar para producir electricidad los electrones que han pasado a la banda de conducción en la zona de vaciamiento. En la figura 1 se muestra su funcionamiento.

Es decir, sólo los pares electrón-hueco generados en la zona de vaciamiento al absorber fotones pueden ser aprovechados. El electrón se va hacia el lado N, con lo cual el potencial eléctrico de la zona N disminuye. Por su parte, el hueco se va hacia la zona P, por eso el potencial eléctrico de la zona P aumenta. Y, entonces tienes una diferencia de potencial neta entre la parte P y la parte N que puedes aprovechar para realizar trabajo eléctrico cuando las unes externamente con un cable. Esto sólo se produce mientras haya luz en esa unión P-N.

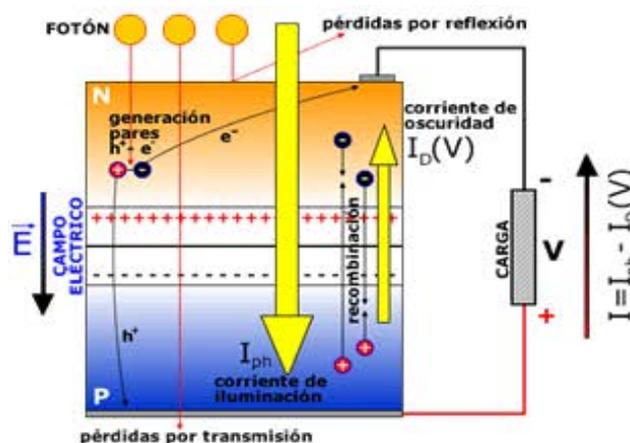


Figura 1. Funcionamiento de una célula Solar

En la industria fotovoltaica en los últimos años ha imperado la utilización de *Si* cristalino para la producción de módulos fotovoltaicos, destacándose dos tipos: monocristalino (*mc-Si*), el cual presenta una estructura uniforme con una misma orientación y el policristalino (*pc-Si*), en el que las estructuras cristalinas están orientadas aleatoriamente. [5-8]

Esta complejidad en la estructura del *Si* hace que surja la necesidad de desarrollar técnicas como la electroluminiscencia, en la cual mediante una fuente de alimentación inyectando una diferencia de potencial en los extremos P y N de la célula fotovoltaica. Dicha corriente se aplica con el positivo (+) en la región del semiconductor P y el negativo (-) en el semiconductor N. Entonces, una vez se supera la tensión umbral del diodo, en este caso es de 0.7 V para el silicio, se produce conducción y la célula pasa a comportarse como un emisor. Los electrones y los huecos que se encuentran cerca de la zona de vaciamiento y al recombinarse, emiten luz cuya

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

longitud de onda depende del GAP del semiconductor, este GAP es diferencia energética entre las bandas de valencia y de conducción.

Mediante la inyección de corriente al módulo, las células del módulo fotovoltaico se comportan como un diodo, emitiendo la radiación necesaria para ser captado por medio de sensores de una cámara especial que sea capaz de captar la longitud de onda del infrarrojo cercano, ya que el ojo humano no es capaz de captar este espectro de radiación o emisión de luz.

Es decir, donde realmente emite más un panel fotovoltaico de silicio al hacerle electroluminiscencia es en la zona del infrarrojo cercano. El infrarrojo comprende una región muy grande del espectro electromagnético, que va desde los 700 nm hasta los 1000  $\mu\text{m}$ . Por eso se divide en la zona del infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano. El silicio mono y policristalino emiten un poco distinto, pero ambos tienen el máximo en torno a los 1000 nm o 1100 nm, que se encuentra dentro del infrarrojo cercano.

El espectro electromagnético muestra que el rango de la luz visible está entre los 400 nm a 700 nm. La electroluminiscencia emite en el límite inferior del infrarrojo cercano en el rango de 800 nm a 1000 nm en el caso del *Si*, es por eso que al someter un módulo fotovoltaico a una corriente cerca de su corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), se puede captar que las células del módulo fotovoltaico se están comportando como un LED.[12]

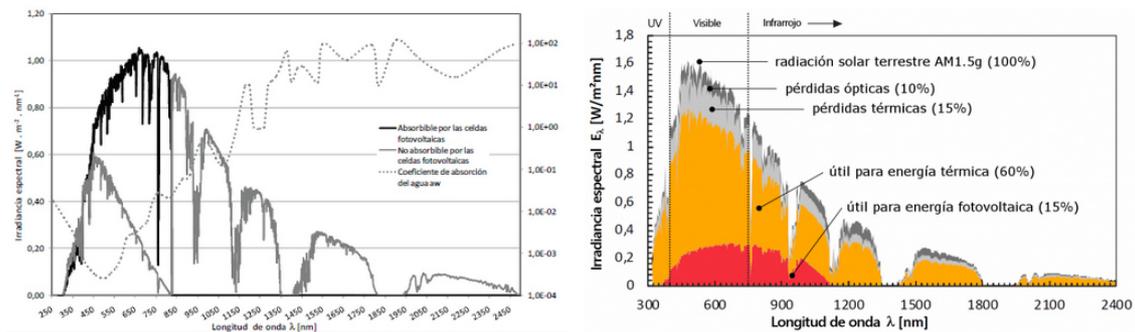


Figura 2. Componentes absorbible y disipada de la irradiación espectral solar a nivel terrestre.

En este trabajo la técnica de la electroluminiscencia complementa muy bien con el análisis de las Curvas I-V y P-V que es el trabajo que se va a desarrollar, en las que a partir de ellas se detectarán posibles defectos en las células medidas en el trabajo de investigación. A continuación se realiza una pequeña introducción del equipo y técnica utilizada para el análisis de las curvas analizadas.

Hay diversas técnicas para caracterizar las células y módulos fotovoltaicas. Unos se centran en la composición microscópica de la célula y la influencia sobre su comportamiento macroscópico y otros directamente en este aspecto macroscópico. Desde el punto de vista práctico, la célula se utiliza para producir electricidad. Es muy importante saber por qué una célula no está funcionando tan bien como debería o qué problemas está experimentando actualmente y cómo pueden evolucionar con el tiempo. Sin embargo, primero debemos poder inspeccionarlos de manera rápida y descubrir si está funcionando como se esperaba o no. Para ello, existen algunas técnicas como la mencionada anteriormente, análisis de la imagen por electroluminiscencia, la imagen térmica o la curva I-V. Este último es en el que nos vamos a centrar, ya que nos permite saber directamente la potencia de salida de la célula fotovoltaica con certeza, porque mide la variación de la corriente que sale de la célula cuando varía el voltaje. Esta curva nos permite conocer la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y la tensión de circuito

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

abierto ( $V_{oc}$ ) de la célula PV. No es posible hacer la curva I-V de una sola célula en un módulo fotovoltaico comercial, solo la curva I-V del módulo completo. No obstante, es posible hacerlo en el laboratorio utilizando células individuales, en lugar de módulos completos. Esta información a nivel de célula se utiliza para que los fabricantes detecten células defectuosas y las desechen antes de la integración en un módulo o para clasificarlas y colocar células similares en un módulo para evitar errores de coincidencia. [9-10]

Hay varias formas utilizadas para medir la curva I-V, basadas en diferentes formas de variar la carga vista por la célula o módulo fotovoltaico. La mayoría de los dispositivos comerciales utilizan una carga electrónica variable o la carga de un capacitor para trazar la curva I-V. Sin embargo, la mayoría de ellos están diseñados para módulos estándar o para una matriz de módulos. La principal dificultad para medir correctamente la curva I-V de una sola célula es el hecho de que los voltajes implicados son muy bajos, mientras que las corrientes pueden ser lo suficientemente altas. Estas corrientes altas se producen con valores cercanos a 0 V. Con estos datos, si aplicamos la Ley de Ohm, se obtiene que es necesario que, el aparato de medida utilizado, tenga una resistencia de  $0.1 \Omega$  o menos, por donde va a circular la corriente para medirla. Esto es complicado porque solo con las conexiones utilizadas para conectar la célula al aparato, pueden ser de ese orden o mayores.

La medición de voltajes se puede hacer fácilmente hoy en día con un convertidor analógico a digital, pero a la hora de medir aparece el ruido del orden de milivoltios que es producido por campos electromagnéticos cercanos, otros componentes del circuito, ruido en el voltaje de suministro del convertidor, etc. Por lo general, esto no es un problema porque el valor medio es lo suficientemente grande en comparación con este ruido. En cuanto a la corriente, para evitar que se produzcan variaciones con respecto a la medida real se pueden reducir las interferencias utilizando cables de sección alta, conexiones soldadas, pistas anchas de cobre en las placas de circuito impreso (PBC), caminos eléctricos más cortos, conectores bañados en oro, etc.[18-20]

Estos problemas, que surgen a la hora de medir se han resuelto en gran medida con el prototipo de trazador I-V, desarrollado por los investigadores de la Escuela de la Ingeniería Forestal, Agronómica y de la Bioenergía (EIFAB) del Campus Duques de Soria de la Universidad de Valladolid (UVA). El trazador I-V que se utiliza para las medidas de este trabajo es un dispositivo, que parte del concepto de ser lo más económico posible en comparación con los dispositivos comerciales profesionales y que nos permita obtener la curva I-V completa del primero, segundo y cuarto cuadrante del módulo fotovoltaico. En nuestro caso nos centramos en la medición del 1º cuadrante. El prototipo de trazador I-V se diseñó en trabajos anteriores con el objetivo de caracterizar una única célula FV. Sin embargo, en el presente trabajo se pretende medir un pequeño módulo fotovoltaico de 6 células en serie, por lo que ha sido necesario modificar el trazador I-V para este nuevo propósito, lo que se consigue con unos cambios menores en la electrónica sustituyendo únicamente algunas resistencias para ajustar los rangos de voltaje y corriente del prototipo trazador I-V.

### **1.1.- Antecedentes**

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los artículos que están relacionados con el trabajo a desarrollar, que consiste en la caracterización térmica y eléctrica de un módulo fotovoltaico con defectos. En trabajos anteriores podemos ver que se han caracterizado células y módulos fotovoltaicos con diferentes técnicas. El trabajo que se va a desarrollar a continuación tiene su base en un trabajo anterior en el que a partir de un prototipo de trazador I-V, basándose en

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

ser lo más económico posible, se realizó la caracterización de una célula fotovoltaica en laboratorio.

## **1.2.- Objetivos**

Este TFM tiene como objetivo general la caracterización térmica y eléctrica de los modos de funcionamiento de un módulo fotovoltaico con distintas condiciones de sombreado.

A lo largo del trabajo se explican las formas de caracterizar un módulo fotovoltaico, en el que serán analizados los resultados de las curvas I-V y P-V, se han graficado estas curvas y también el efecto que tienen sobre ellas la irradiación y la temperatura. También se explica el método utilizado para realizar las simulaciones de LTspice y las mediciones experimentales de los 23 casos que se han ensayado en el laboratorio. Posteriormente, se muestran y discuten los resultados y gráficos obtenidos de las simulaciones y pruebas. Así como un resumen con las conclusiones más importantes de este TFM

Otros de los objetivos específicos de este TFM son:

- Comparación con la modelización teórica de dichos módulos en esas condiciones simuladas.
- Demostración de la validez para la caracterización eléctrica de módulos FV del prototipo de trazador I-V.

A partir de las simulaciones realizadas en LTspice y las medidas realizadas en laboratorio con el prototipo de trazador I-V, estudiar cómo afectan los defectos y cambios de temperatura en el módulo fotovoltaico, para así saber cómo afectan esos defectos y conseguir módulos más eficientes. El objetivo principal es diseñar el modelo del módulo fotovoltaico en LTspice para poder simular su comportamiento cuando se ve afectado por diferentes configuraciones de sombras y comparar esos resultados con las medidas realizadas en laboratorio con el prototipo de trazador I-V. Además, el trabajo pretende demostrar que el prototipo de trazador I-V es capaz, de con unos pequeños cambios en la placa base del equipo, medir módulos pequeños y no solo células. Además de esto, otro objetivo es cómo varían los parámetros del módulo fotovoltaico con la temperatura.

## **1.3.- Motivación**

La energía fotovoltaica en la actualidad es una de las más importantes. Por ello tanto a nivel económico como a nivel medioambiental la energía fotovoltaica ofrece unas buenas perspectivas, ya que reduce el calentamiento global y la contaminación del aire. Desde el punto de vista económico es una energía que tiene un desarrollo importante, ya que su eficiencia y reducción de costes la han convertido en una tecnología de generación de energía eléctrica rentable.

Además la energía fotovoltaica permite llevar energía eléctrica a lugares en los que sin este tipo de tecnología hubiera sido mucho más difícil poder implantarla. Este trabajo de investigación ayudará a demostrar que las medidas simuladas en ordenador se corresponden con las medidas realizadas en el módulo de investigación a nivel laboratorio y que éstas concuerdan con los efectos que afectan a los módulos fotovoltaicos. Además se contribuirá a mejorar los equipos de medida de la tecnología solar fotovoltaica.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

También nos permitirá obtener información de una planta real, que de otra forma sería más difícil de obtener, ya que no está al alcance de la mayoría de las personas por el equipamiento necesario y el enorme coste económico. Este trabajo es un intento de poner un granito de arena en todo esto, reduciendo esas dificultades y permitiendo realizar estudios en un laboratorio con unos medios mucho más asequibles y controlables.

## 2.- Materiales y Métodos

### 2.1.- Programas Utilizados

#### LTspice XVII

LTspice es un software simulador de circuitos electrónicos analógicos basado en SPICE, producido por el fabricante de semiconductores Analog Devices. Es el software SPICE de mayor distribución y uso en la industria. Aunque es un software gratuito, LTspice no está restringido artificialmente para limitar sus capacidades. LTspice nos permite introducir un esquema de un módulo fotovoltaico con los parámetros eléctricos que le queramos establecer. A partir de esos parámetros podemos simular el módulo y visualizarlo en gráficas que nos proporciona el programa. Esos datos que obtenemos de la simulación los exportamos en un archivo de texto, para después tratarlos y a partir de ellos obtener las gráficas con las que se compararán los datos obtenidos en los diferentes casos realizados en el trabajo de investigación. Sobre el módulo fotovoltaico diseñado en el LTspice, se van modificando los parámetros para poder simular los defectos que se producen en los casos estudiados en el trabajo.[18]

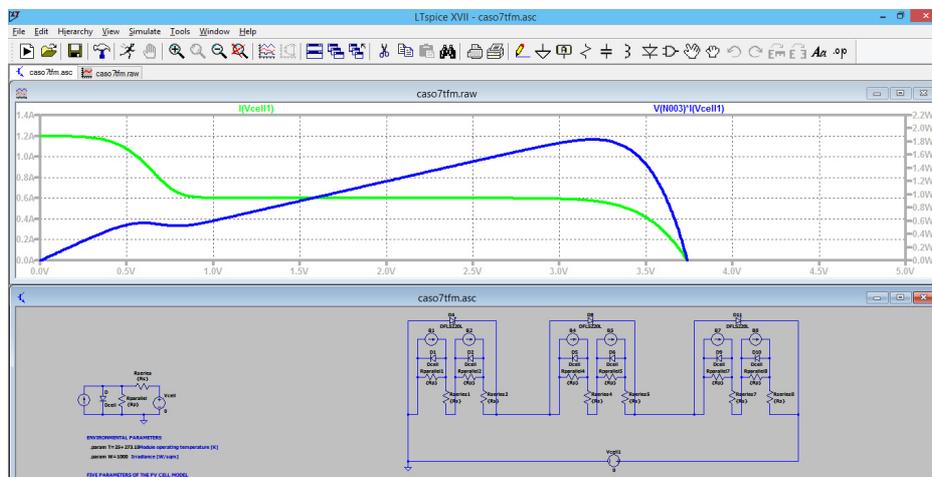


Figura 3. Captura Programa LTspice XVII

#### Python 3.9

Se ha desarrollado un programa basado en Python que utiliza un lenguaje de programación de alto nivel, cuya filosofía hace hincapié en la legibilidad de su código, se utiliza para desarrollar aplicaciones de todo tipo, como Instagram, Netflix y Spotify. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, programación imperativa y funcional. Es un lenguaje interpretado, dinámico y multiplataforma.

Administrado por Python Software Foundation, posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License. Python se clasifica constantemente como uno de los lenguajes de programación más populares.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

El programa utilizado permite registrar los valores medidos por el prototipo trazador I-V, pasarlos al ordenador y ofrecernos unos resultados, que se exportan a un archivo de texto. Posteriormente esos datos se tratarán en un Excel para la obtención de gráficas que se compararán con las gráficas de las simulaciones del módulo fotovoltaico en LTspice y a partir de ahí sacar conclusiones del comportamiento del módulo fotovoltaico en los diferentes casos estudiados en el laboratorio. Además también se captan los valores de temperatura que se van registrando a lo largo de la medición, para así ver cómo afecta la temperatura a los parámetros del módulo fotovoltaico.

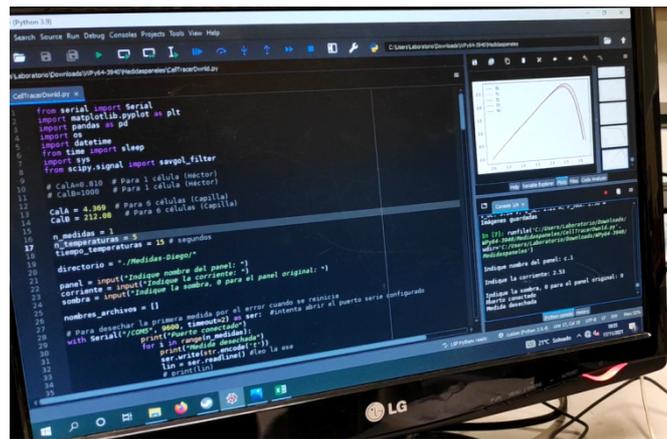


Figura 4. Interfaz utilizado para el control, comunicación y adquisición de datos del trazador I-V, programado en Python.

## 2.2.- Equipos Empleados en el Trabajo

### Prototipo trazador I-V Low Cost:

Trazador I-V propuesto se basa en la carga y descarga de dos condensadores a través de una celda solar. La estrategia de medición también podría llevarse a cabo en asociaciones de células solares en serie de módulos pequeños. Este trazador se designa como Dispositivo bajo Prueba (DUT). El proceso de medida del trazador I-V se realiza de la siguiente manera:

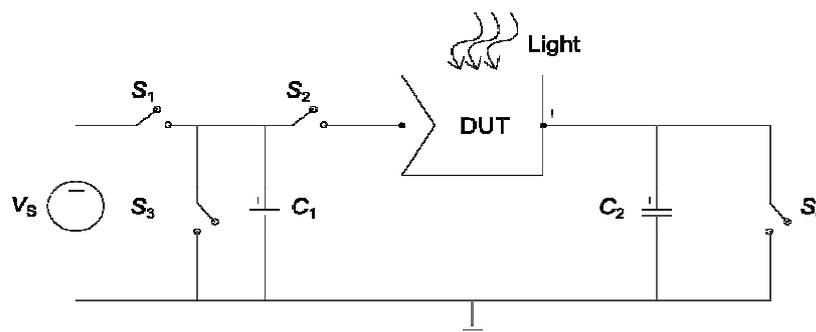


Figura 5. Esquema del trazador I-V propuesto.

Proceso de medida del trazador I-V:

1. En primer lugar, se descargan ambos condensadores ( $C_1$  y  $C_2$ ),  $V(C_1) = V(C_2) = 0$ , y se abren todos los interruptores ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ ).
2. Luego, al cerrar  $S_1$ ,  $C_1$  se carga al voltaje de la fuente ( $V_S$ ).

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

3. A continuación,  $S_1$  se abre de nuevo. Los lados negativos de  $C_1$  y  $C_2$  están entonces a 0 V, el lado positivo de  $C_1$  está a  $V_s$  mientras que el lado positivo de  $C_2$  también está a 0 V. Entonces,  $V(C_1) = V_s$  y  $V(C_2) = 0$  V.
4. Después,  $S_2$  se cierra para que la corriente fluya a través del DUT, cargando  $C_2$  mientras descarga  $C_1$ . Hay que tener en cuenta que el voltaje en los terminales del DUT siempre es el voltaje diferencial entre la placa positiva de  $C_2$  y la placa positiva de  $C_1$ . Erróneamente, uno podría pensar que la corriente se detendrá cuando  $C_1$  y  $C_2$  lleguen al mismo nivel de voltaje. Eso no es cierto porque el DUT es un dispositivo fotovoltaico bajo iluminación, por lo que aumentará el voltaje entre sus terminales hasta que se alcance su voltaje de circuito abierto.
5. A continuación se abre  $S_2$  e inmediatamente se cierra  $S_3$ . Esto descarga  $C_1$ , entonces  $V(C_1) = 0$ .
6.  $S_2$  se vuelve a cerrar manteniendo  $S_3$  también cerrado. Ahora, el lado negativo del DUT permanecerá a nivel del suelo mientras que su lado positivo está en  $V(C_2)$ . En este caso,  $V(\text{DUT}) = V(C_2) - 0$ , que es mucho mayor que  $V(\text{DUT})_{OC}$ . La corriente fluye en este caso de  $C_2$  a tierra hasta que se alcanza  $V(\text{DUT})_{OC}$  bajando de voltajes más altos. En consecuencia, el DUT se ve obligado a recorrer el primer cuadrante de su curva I-V en este paso, como también se explicará más adelante.
7. Una vez que finaliza el proceso y deja de fluir la corriente,  $S_4$  se cierra para descargar completamente  $C_2$ , para dejar el aparato preparado para comenzar una nueva medición.

El trazador I-V nos permite realizar las gráficas del 1º, 2º y 4º cuadrante, aunque la curva I-V que nos interesa para el trabajo de investigación es la del primer cuadrante, que corresponde a la potencia generada por módulo fotovoltaico y cuyos puntos de corte con los ejes definen la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ). En los apartados siguientes se explicará los equipos utilizados para realizar el montaje experimental y los fundamentos teóricos empleados en la realización del trabajo.

El prototipo de trazador de la curva I-V de un módulo fotovoltaico, cuando el capacitor  $C_1$  está cargado al voltaje de la fuente de alimentación y el capacitor  $C_2$  totalmente descargado, estamos aplicando un voltaje positivo en el terminal negativo del módulo PV y cero al terminal positivo, es decir, estamos aplicando un voltaje negativo. En este caso, la corriente fluirá dentro del módulo a través de la fuente de corriente ya que el diodo tiene polarización inversa y la resistencia en paralelo idealmente debería ser muy alta. En consecuencia, el valor actual está determinado por la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) del módulo fotovoltaico. La descarga de  $C_1$  debida a esta corriente producirá la carga de  $C_2$ , se moverá hacia la derecha a lo largo de la curva I-V. Cuando se iguale la tensión de ambos condensadores, la diferencia entre los terminales del módulo será 0 V, por lo que la curva I-V estará en el punto de cruce con el eje de corriente. El módulo fotovoltaico continuará a través de su curva I-V hasta que llegue a  $V_{oc}$ , donde se cumple que,  $V(C_2) - V(C_1) = V_{oc}$ . Para que esto se cumpla, estas suposiciones solo son válidas si todas las células del módulo fotovoltaico son iguales y están en buen estado. Si hay células defectuosas, se producen muchas deformaciones sobre la curva I-V, por lo que se producirán variaciones en la simulación con respecto a la medidas realizadas en laboratorio con el prototipo trazador I-V.[18-20]

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

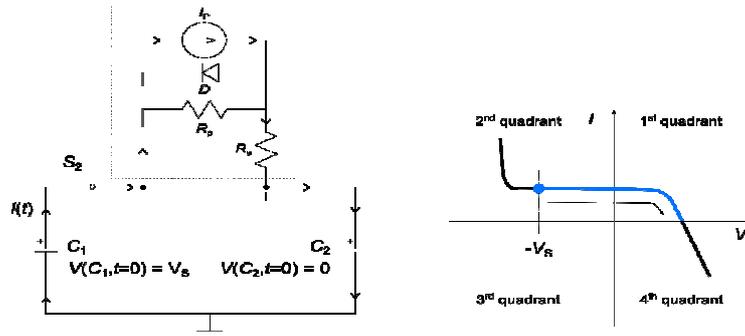


Figura 6. Circuito equivalente trazador I-V y trayectoria medida de la curva I-V del módulo PV

El prototipo trazador I-V utilizado se muestra en la siguiente figura, está formado por los condensadores que se colocan detrás de la PCB, mientras que el resto de los componentes se colocan en la capa superior. Además de los componentes necesarios, se puede ver el cable de comunicación USB, los cables que se utilizan para alimentar el dispositivo y cargar el condensador, y los cables que se utilizan para medir la corriente y el voltaje de forma independiente.

El prototipo de trazador I-V, tiene una memoria interna que es capaz de almacenar hasta 248 pares de valores I-V con la precisión utilizada. Como el circuito impreso utilizado no tiene puerto COM, se utiliza un chip adicional para exportar los datos internos a un ordenador a través de RS232 emulado a través de USB.

Sus características técnicas se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Características técnicas del Prototipo trazador I-V

| Características                                | Valores       |
|------------------------------------------------|---------------|
| Tensión de alimentación                        | 15 V          |
| Capacitancia de C1 y C2                        | 22000 $\mu$ F |
| Valores máximos de medida de corriente         | $\pm 11.5$ A  |
| Valores nominales máximos de medida de voltaje | -15 V, +8,5 V |
| Número de puntos medidos                       | 248           |
| Resolución de corriente                        | 25 mA         |
| Resolución de voltaje                          | 1 mV          |

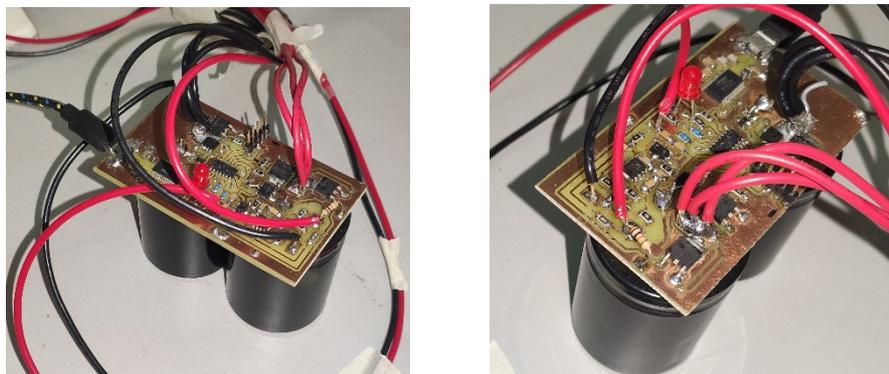


Figura 7. Prototipo Trazador I-V, con sus elementos electrónicos

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

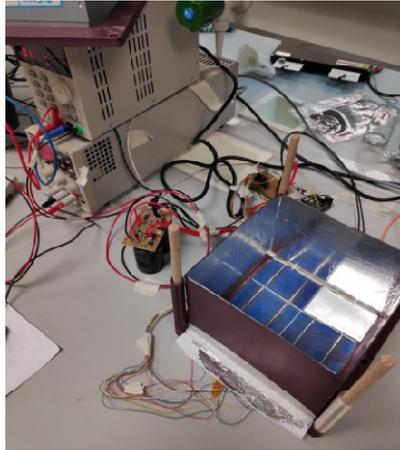


Figura 8. Prototipo trazador I-V y chasis modular utilizado

### **Plataforma Modular utilizada para el módulo fotovoltaico:**

Se diseñó y utilizó una plataforma modular para ayudar a colocar el módulo fotovoltaico, la iluminación LED y otros dispositivos requeridos en el trabajo de investigación. Por ejemplo, un soporte para la cámara térmica, para ver la evolución del calentamiento del módulo con los defectos producidos. El diseño se realizó con Autodesk Fusion 360 y luego se imprimió en 3D con la tecnología FFF (fabricación de filamentos fusionados). En nuestro caso se colocó un módulo fotovoltaico formado por 6 células de 78 mm x 52 mm, que se ajustaban al tamaño de la base del chasis de 156 mm x 156 mm. Si en futuros trabajos se quiere analizar módulos más grandes, será necesario rediseñar la plataforma. El chasis utilizado se puede ver en las siguientes figuras junto con el prototipo trazador I-V. [20]

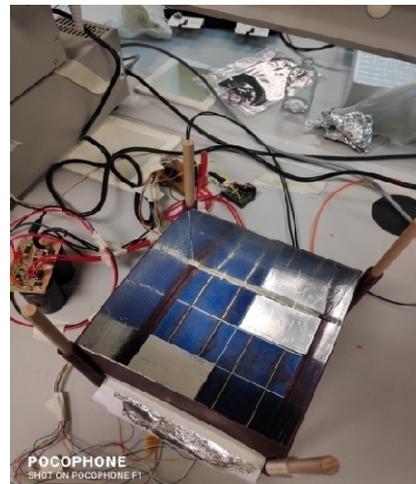
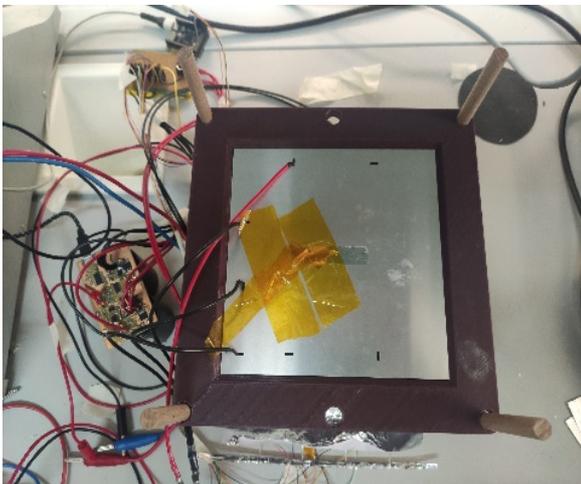


Figura 9. Chasis modular diseñada para la medida de curvas I-V, electroluminiscencia, termografía y otras técnicas.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

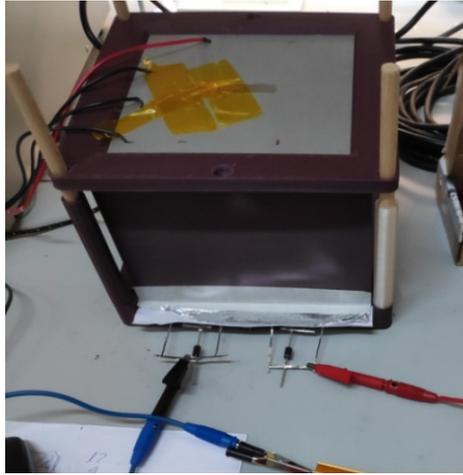


Figura 10. Chasis modular con el complemento para soportar la placa de iluminación LED.

### Células fotovoltaicas y Módulo Fotovoltaico:

Para comprender mejor cómo se desarrolla la curva I-V del prototipo trazador, es importante recordar el modelo eléctrico más simple de una célula fotovoltaica. En este modelo se utiliza una fuente de alimentación para considerar la corriente fotogenerada de la célula solar; un diodo para modelar el hecho de que una celda es, en esencia, una unión P-N entre dos semiconductores. Finalmente, una resistencia en paralelo ( $R_p$ ) y una resistencia en serie ( $R_s$ ) modelan que el diodo y la fuente no son ideales, resistencias de contacto, impurezas, aniquilación entre electrones de conducción y huecos, dispersión y colisiones con la red cristalina, etc.[1]

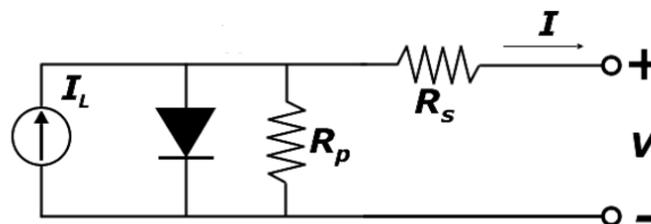


Figura 11. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.

Para formar el módulo fotovoltaico del ensayo se han utilizado 6 células fotovoltaicas cuyas características se encuentran en la siguiente Tabla 2. El módulo fotovoltaico se ha construido soldando las barras colectoras de cada célula a la siguiente, formando un circuito en el que por cada 2 células se ha instalado un diodo de bypass, las conexiones se han soldado a mano usando un soldador con la ayuda de fundente y aire caliente a 150 °C. Las barras colectoras de unión se conectaron utilizando una barra más ancha, que ofrece una ruta de baja resistencia para la corriente y una zona fácil para soldar los cables de tensión y corriente. Se soldaron varios cables en ambos lados del módulo, en el lado positivo y negativo para lograr la menor resistencia posible. A las células que forman el módulo se les colocaron sensores de temperatura PT100 en la parte posterior para obtener una temperatura lo más precisa posible, también se soldaron cables para obtener la medición del voltaje. Las características del módulo fotovoltaico ensayado se encuentran en la Tabla 3.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Tabla 2. Características técnicas de las células fotovoltaicas utilizadas en el módulo fotovoltaico en condiciones estándar (1000 W/m<sup>2</sup> de espectro solar y 25 °C).

| Características Célula | Valores        |
|------------------------|----------------|
| Potencia máxima (MPPT) | 0,568 W        |
| $V_{oc}$               | 0,639 V        |
| $I_{sc}$               | 1,2 A          |
| Eficiencia             | 19%            |
| Número de busbars      | 2              |
| Tamaño                 | (78mm x 52mm)  |
| Espesor                | 200 $\mu$ m    |
| Tecnología             | Policristalino |



Figura 12. Célula fotovoltaica (78mm\*52mm)

Tabla 3. Características técnicas del módulo fotovoltaico en condiciones estándar (1000 W/m<sup>2</sup> de espectro solar y 25 °C).

| Características Modulo | Valores           |
|------------------------|-------------------|
| Potencia máxima (MPPT) | 3,41 W            |
| $V_{oc}$               | 3,83 V            |
| $I_{sc}$               | 1,2 A             |
| Eficiencia             | 19%               |
| Número de busbars      | 12                |
| Tamaño                 | 6 x (78mm x 52mm) |
| Espesor                | 200 $\mu$ m       |
| Tecnología             | Policristalino    |

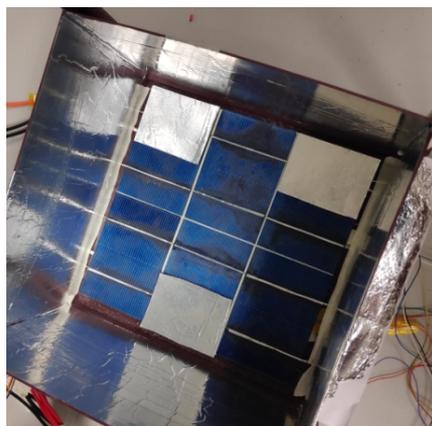


Figura 13. Módulo fotovoltaico utilizado

Por último se va a mostrar el modelo eléctrico del modulo fotovoltaico diseñado en LTspice para el trabajo de investigación y los parámetros introducidos en el programa para que el módulo fotovoltaico represente con mayor exactitud el módulo real medido en laboratorio.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

```
ENVIRONMENTAL PARAMETERS
.param T=25+273.15 Module operating temperature [K]
.param W=1000 Irradiance [W/sqm]

FIVE PARAMETERS OF THE PV CELL MODEL
I=(Isc+dIsc/100*Isc*(T-298.15))* (W/1000) Photocurrent generated in a PV cell [A]
.param Rs=0.0055 Series Resistance [Ohm]
.param Rp=1000 Parallel Shunt Resistance [Ohm]
.param n=1.8 Ideality Factor
.param Is=(Isc*Voc/Rp)/(exp(q*Voc/(n*Kb*298.15))-1) Reverse bias saturation current for the diode [A]
.param VocT=Voc+dVoc/100*Voc*(T-298.15) Open circuit voltage adjusted to the operating temperature [V]
.param Isc=1.2 Short circuit current [A]
.param Voc=0.635 Open circuit voltage [V]
.param dVoc=-0.39 Open circuit voltage temperature coefficient [%/°C]
.param dIsc=0.006 Short circuit current temperature coefficient [%/°C]

DIODE MODEL
.model Dcell D Is={Is} n={n} Diode Definition
.param q=1.602E-19 Charge of the electron [Coulombs]
.param Kb=1.38062E-23 Boltzmann constant [J/K]

LTSPICE SIMULATION COMMAND
.dc Vcell1 0 5 0.005
```

Figura 14. Parámetros módulo fotovoltaico analizado.

El circuito eléctrico del módulo fotovoltaico está formado por 6 células en serie idénticas y por cada 2 células se ha colocado un diodo de bypass modelo DFLS220L, estos diodos simulan perfectamente los diodos de bypass utilizados en la realidad, que tienen una caída de tensión de 0,288 V. Este diodo tiene una pérdida de tensión menor que otro tipo de diodos más comunes. A partir de este diseño del módulo fotovoltaico se simulan los diferentes casos estudiados.[10-13]

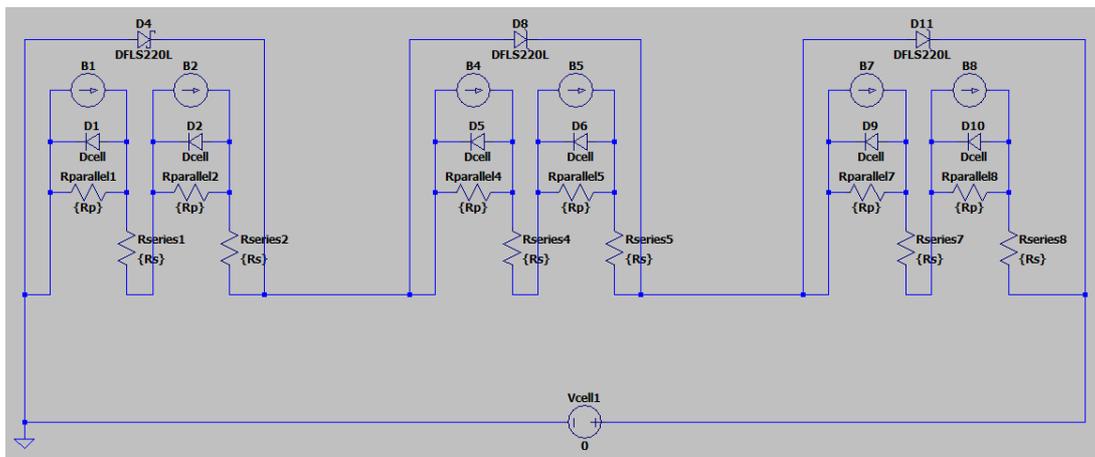


Figura 15. Circuito equivalente del módulo fotovoltaico.

## Foco Iluminación LED:

El sistema de iluminación consta de una PCB de aluminio con 42 LED infrarrojos (IR, 850 nm). Se elige esta longitud de onda porque la curva de absorción de fotones para un módulo fotovoltaico de silicio tiene su máxima eficiencia en la zona cercana al infrarrojo, como se muestra en la Figura 11. Estos fotones que iluminan el módulo fotovoltaico están en la máxima longitud de onda que el módulo puede absorber mejor, por lo que se necesita menos energía para alcanzar las condiciones estándar en el módulo fotovoltaico (1000 W/m<sup>2</sup> con la composición espectral de la irradiación del Sol en la superficie de la Tierra). En estas condiciones de irradiación, el módulo fotovoltaico genera las cargas necesarias para alcanzar su corriente de saturación y recorrer su propia curva I-V. La calibración de la intensidad de corriente necesaria en los LEDs para conseguir la densidad de fotones adecuada, se ha

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

realizado sobre una célula con una irradiación calibrada para conseguir en ella, la misma irradiación que expuesta al Sol en condiciones estándar.[14]

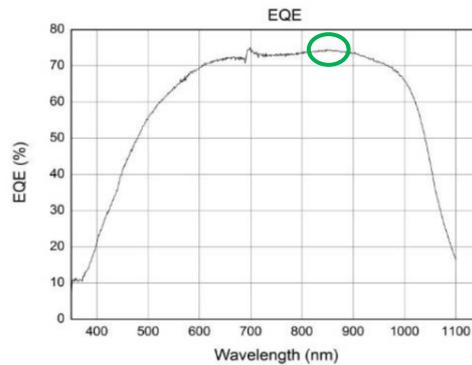


Figura 16. Eficiencia cuántica externa de una célula fotovoltaica de silicio.

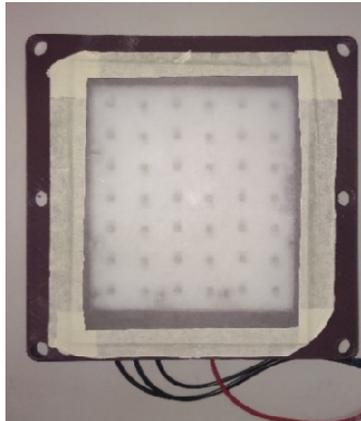


Figura 17. Sistema de iluminación LED utilizado.

### Fuente de alimentación:

Estas Fuentes de alimentación cumplen varias funciones, dentro de ellas la de un inversor, ya que invierte el suministro de energía eléctrica de corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), la cual es necesaria para inyectar corriente al foco de iluminación LED. En trabajos anteriores se hicieron pruebas para que en función de la distancia a la que se encontraba el foco emisor de luz, en la superficie del módulo llegará una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Para conseguir esta irradiancia la fuente de alimentación debe suministrar al foco LED 2,53 A. La otra fuente de alimentación se utiliza para alimentar el prototipo trazador I-V, la fuente suministra una tensión de 15 V al dispositivo.

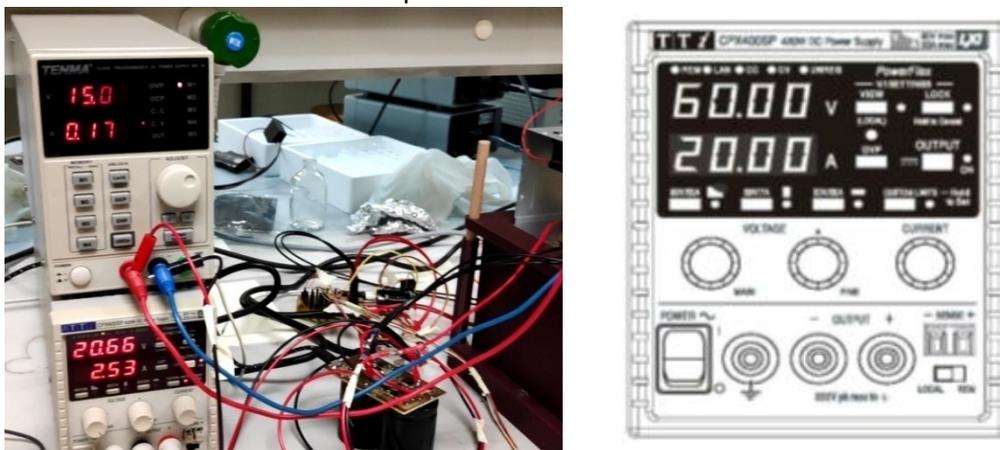


Figura 18. Fuentes de alimentación utilizadas para la medición del módulo PV.

## **2.3.- Métodos utilizados**

### **Curvas I-V**

La Curva I-V es una de las medidas más importantes, ya que esta característica nos proporciona una información fundamental del módulo fotovoltaico. A partir de la Curva I-V, se determinan la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), la tensión del circuito de circuito ( $V_{oc}$ ) y otros parámetros del módulo PV. Para que todas las trazas de curvas I-V se puedan comparar y utilizarse como referencia, se deben establecer una serie de características comunes y mediciones adicionales mediante la colocación de sensores en el módulo, que nos permitan saber el valor de la irradiancia incidente en el módulo, el control de la temperatura del módulo, el dispositivo de monitoreo y un sistema de adquisición de datos del módulo, para así medir la curva I-V cuando el módulo esté captando la radiación.

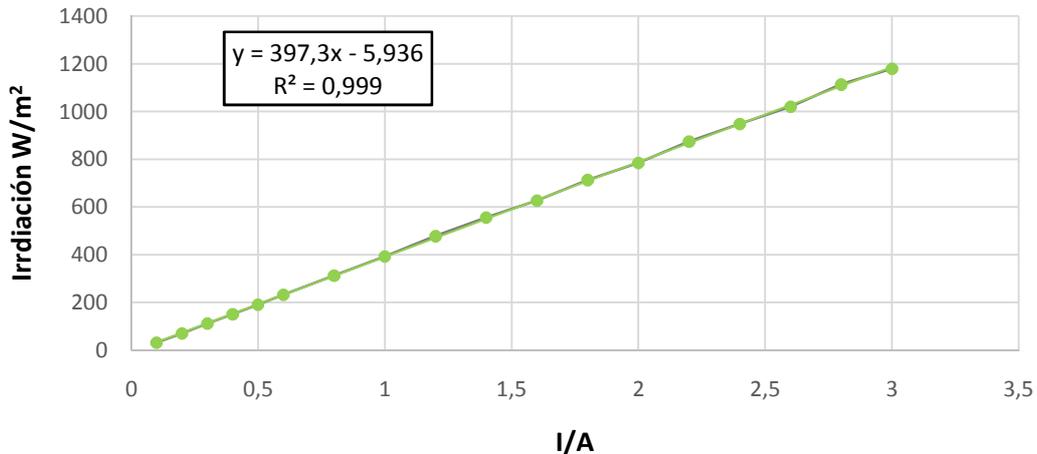
En condiciones normales, las pruebas a las que los fabricantes someten a los módulos fotovoltaicos se suelen medir en condiciones estándar (irradiancia solar  $1000 \text{ W / m}^2$ ,  $25^\circ \text{ C}$ ). En nuestro caso, a partir de un trabajo realizado anteriormente sabemos que en función de la distancia y la corriente que suministremos al foco de iluminación LED, tendremos diferentes irradiancias sobre la superficie del módulo PV.[15-16]

En este trabajo la distancia entre el foco LED y el módulo fotovoltaico va a ser constante, ya que se dispone de un chasis sobre el que se colocan el módulo y el foco LED, siempre a la misma distancia. Es decir lo que determina la irradiancia sobre el módulo fotovoltaico va a ser la corriente que la fuente de alimentación suministre al foco LED. En la siguiente tabla se muestra la corriente que se debe suministrar al Foco LED para obtener la irradiación deseada. En este trabajo se ha determinado que la irradiación a la que se va a someter al módulo PV empleado, será de  $1000 \text{ W/m}^2$ , por lo que la fuente de alimentación tiene que suministrar 2,53A al foco LED para obtener dicha irradiancia.

Tabla 4. Irradiación Foco LED

| Irradiación ( $\text{W/m}^2$ ) | I / A |
|--------------------------------|-------|
| 500                            | 1,27  |
| 600                            | 1,52  |
| 700                            | 1,78  |
| 800                            | 2,03  |
| 900                            | 2,28  |
| 1000                           | 2,53  |
| 1200                           | 3,04  |

### Irradianción Foco LED Sobre el Módulo PV



Gráfica 1. Evolución de la irradiación de Foco LED en función de la corriente (A)

La tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) es la tensión máxima disponible de un módulo fotovoltaico y se produce a corriente 0. La corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) es la corriente a través del módulo cuando la tensión es 0. La potencia máxima ( $P_{max}$ ) se define como un punto en la curva I-V de un módulo fotovoltaico bajo iluminación, donde el producto de corriente ( $I_{mp}$ ) y la tensión ( $V_{mp}$ ) es el máximo. El factor de forma ( $FF$ ) es esencialmente una medida de la calidad del módulo fotovoltaico, que es la relación que compara la potencia máxima del módulo fotovoltaico con la potencia total, que resultaría si  $V_{mp}$  fuera el voltaje de circuito abierto e  $I_{mp}$  la corriente de cortocircuito.

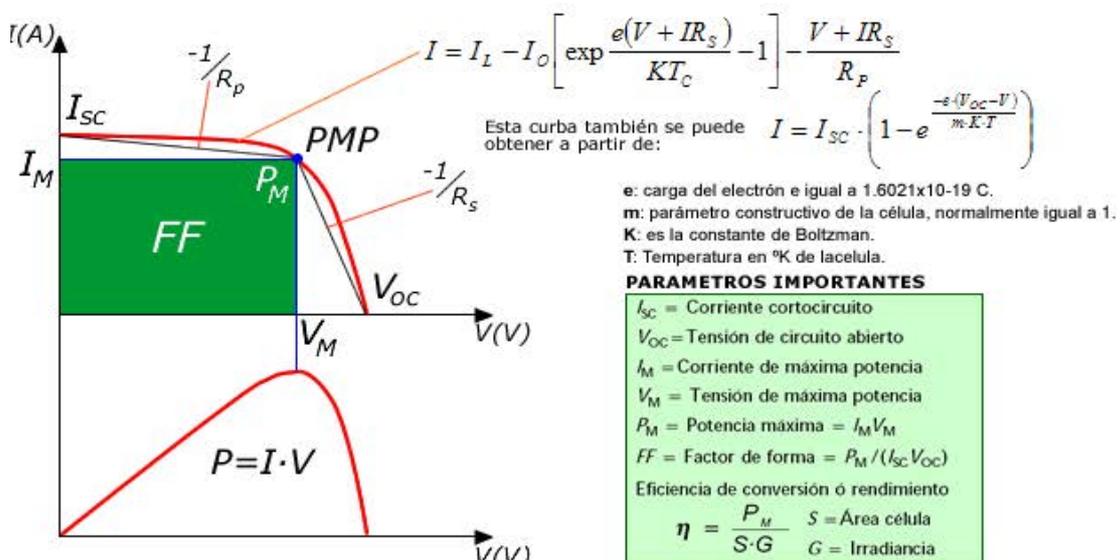


Figura 19. Representación, Fórmulas y Parámetros principales de la Curva I-V

En las curvas I-V del módulo fotovoltaico ensayado, cuando se produce una anomalía en él o una sombra mientras se está efectuando la medición, la curva se verá afectada, y presentará ciertos escalones que servirán de referencia para compararla con otros casos que se realizan en el trabajo. En la Figura 12 se observa la diferencia de una curva I-V con defectos, en la que se producen escalones (izq) y la traza de una curva I-V sin defectos (dcha).

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

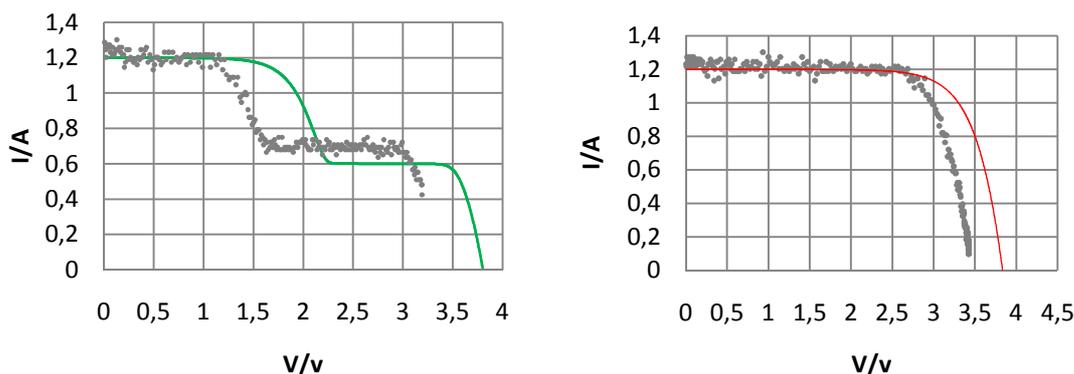


Figura 20. Gráficas Curvas I-V modulo fotovoltaico con defectos (izq) y sin defectos (dcha)

### Curvas P-V

A partir de los valores obtenidos en la medición de las Curvas I-V, se puede obtener la Curva P-V del módulo fotovoltaico ensayado, ya que esta curva viene determinada por el producto de ambas magnitudes, que nos proporciona la potencia suministrada por el panel durante la medición. Esta curva al igual que la Curva I-V, sus valores tienen dependencia de variables como la temperatura y la radiación solar.

Cada curva P-V presenta un punto de máxima potencia ( $V_p$ ), el cual proporciona el punto óptimo de operación del módulo fotovoltaico, para un uso eficiente del panel. Otros dos puntos importantes de esta curva, son la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). La tensión en circuito abierto representa la máxima tensión proporcionada por el módulo PV a corriente 0, mientras que la corriente en cortocircuito representa la máxima corriente extraíble del módulo PV.

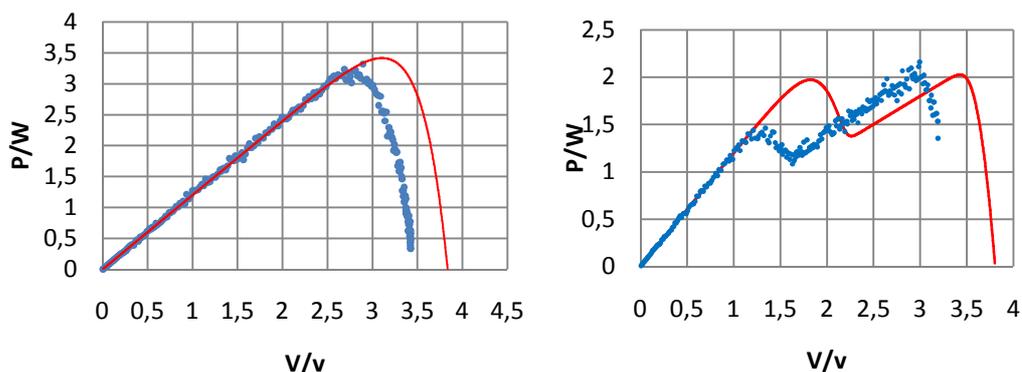


Figura 21. Graficas Curvas P-V módulo fotovoltaico sin defectos (izq) y con defectos (dcha)

## 3.- Resultados y Discusión

En el presente trabajo final de máster se ha conseguido realizar la caracterización térmica y eléctrica del funcionamiento de un módulo fotovoltaico con defectos. Para ello se han realizado mediciones en el laboratorio para caracterizar los diferentes casos que pueden ocurrir en el módulo fotovoltaico. A partir de estas mediciones se han obtenido las Curvas I-V y

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Las Curvas P-V, que nos permiten ver gráficamente cómo afectan los defectos del módulo a su rendimiento. También se han obtenido los resultados de cómo varían la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y la producción de energía de un módulo al variar la temperatura. Y así se ha comprobado que se cumple lo que de forma teórica debería de ocurrir en el módulo y cómo evoluciona al aumentar o disminuir la temperatura.

Las Curvas I-V obtenidas de las simulaciones del módulo fotovoltaico en LTspice y de las mediciones de laboratorio con el prototipo de trazador I-V, se han representado gráficamente con el conjunto de datos adquiridos para una medida del módulo fotovoltaico como se muestra en la Figura siguiente, utilizando el prototipo trazador I-V y la plataforma con la placa LED para iluminación. La curva I-V que se muestra es la curva de un módulo fotovoltaico sin defectos, con una primera zona casi horizontal en tensiones cercanas a 0, es decir sin variaciones en la corriente, está cerca de la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). Después se produce un descenso hasta terminar en una zona recta que corta el eje que determina la tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ). A partir de estos valores se han extraído los valores de  $R_p$  y  $R_s$ , que nos permiten realizar un mejor ajuste entre la curva simulada en LTspice y las medidas realizadas en laboratorio con el prototipo trazador I-V. El Prototipo trazador I-V, se ha configurado para obtener la curva con el máximo número de puntos en la zona del primer cuadrante. Para lograr esto, el prototipo trazador I-V mide constantemente la corriente y el voltaje y calcula el intervalo de tiempo entre las medidas que debe abarcar la mayoría de los 248 puntos sobre el primer cuadrante. El Trazador I-V se ha configurado para que todas las medidas del segundo cuadrante se descarten hasta que el voltaje está cerca de 0 V y es cuando comienza a guardarlas en la memoria, es por eso que hay algunos puntos en valores negativos.

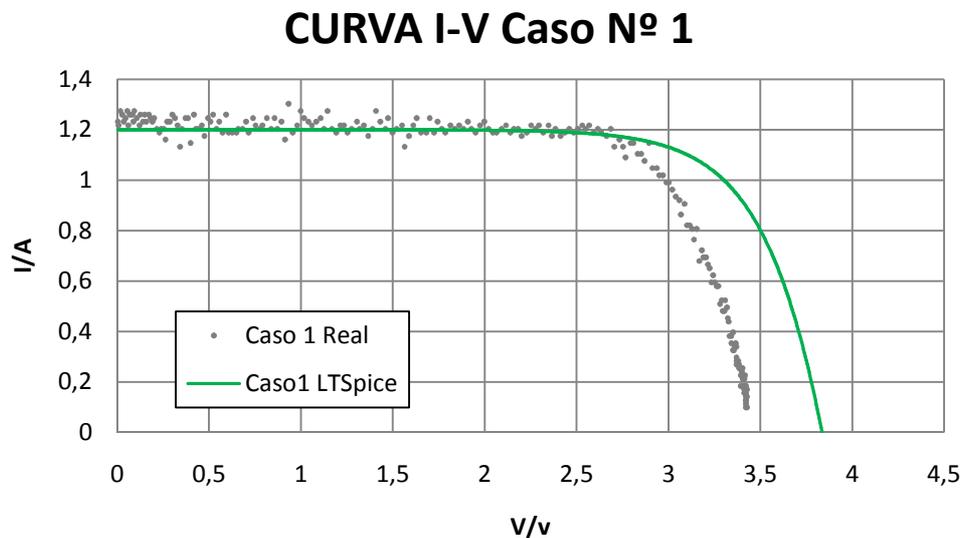


Figura 22. Comparación de una Curva I-V del módulo fotovoltaico medida Real laboratorio Vs simulada en LTspice.

En un principio el prototipo trazador I-V se diseñó para medir una célula fotovoltaica, pero realizando una serie de modificaciones, es posible obtener una curva I-V de un módulo fotovoltaico cambiando el bucle de realimentación de los amplificadores operacionales. El tamaño del módulo que se va a medir está formado por 6 células que son sextos del tamaño de la célula fotovoltaica que se estudió en anteriores trabajos. El módulo fotovoltaico que se va a estudiar tiene prácticamente el mismo tamaño que la célula para la que en un principio se diseñó la plataforma. Por lo tanto, el módulo fotovoltaico de 6 células se puede montar en la plataforma modular y también se puede iluminar con el mismo sistema LED.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

La curva I-V correspondiente al módulo fotovoltaico se puede ver en la figura 16. Al realizar las medidas en laboratorio con el prototipo trazador I-V, aparece ruido (pequeña distorsión) en la medida de corriente donde es más apreciable. En este caso, debido a valores de corriente más pequeños. Por esta razón, se ha utilizado un filtro de software Savitzky-Golay sobre los datos sin procesar. Una vez obtenidos los datos se les aplica un filtro para que se ajusten mejor a las simulaciones realizadas en LTspice, los datos filtrados se muestran en la siguiente figura 16, donde se puede observar como los datos filtrados definen mejor la curva I-V. Aunque el ruido que se puede apreciar en la Curva I-V es muy pequeño por lo que este ruido no nos impide sacar conclusiones de las medidas realizadas en el trabajo. Este ruido puede ser debido a las uniones de los cables, a la resistencia de los elementos empleados en el circuito, a la precisión de medición prototipo trazador I-V, ya que este solo puede coger un determinado Nº de puntos para obtener la curva I-V. Esto se podría solventar aumentando la capacidad del trazador I-V, pudiendo captar un mayor número de puntos y así disminuir el ruido producido en las medidas.

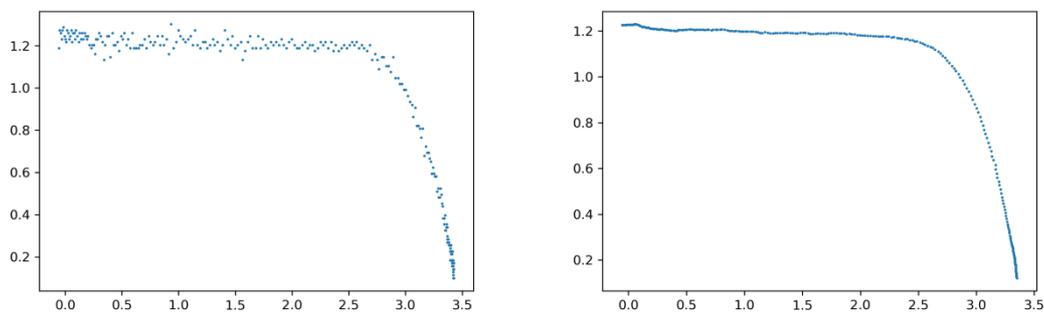


Figura 23. Curva I-V del módulo fotovoltaico ensayado, datos en bruto (dcha) y datos filtrados (izq).

La forma de realizar las mediciones se ha explicado detalladamente en el apartado de métodos utilizados. En los siguientes casos se realizará una simulación en LTspice con el caso concreto que sea de análisis y después se compararán los datos obtenidos en la simulación con la medida obtenida en laboratorio, que es realizada con un dispositivo desarrollado por los investigadores del área de fotovoltaica. A partir de los datos obtenidos se realiza una pequeña conclusión con lo observado.

En este trabajo se han analizado 23 casos distintos de sombreado sobre el módulo fotovoltaico, estos casos se han estudiado en el laboratorio mediante las medidas realizadas con el prototipo trazador I-V y los resultados se han comparado con las simulaciones en LTspice. A continuación se va a mostrar un ejemplo de los casos realizados. El resto de casos se encuentran desarrollados en el Anexo 1; Casos simulados en LTspice Vs medidas reales laboratorio.

Para la realización de la simulación, se ha partido de un módulo fotovoltaico formado por 6 células solares idénticas, que forman un módulo fotovoltaico con una  $I_{SC} = 1,2 A$ ,  $V_{OC} = 3,86 V$  que genera una potencia  $P = 3,44 W$ . Estos datos son obtenidos de la simulación de LTspice con una irradiación fija de  $1000 W/m^2$ . Además los diodos de bypass que forman el módulo son de tipo Sttochki, más concretamente el modelo DFLS220L. Estos diodos tienen una caída de tensión de  $0,288 V$ , éstos tienen una pérdida de tensión menor que otro tipo de diodos más comunes, que se utilizan de forma genérica. Se ha utilizado este diodo para apreciar mejor los cambios que ocurren con el sombreado de las células del módulo fotovoltaico.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

A continuación se muestra el módulo PV utilizado para realizar la simulación en LTspice.

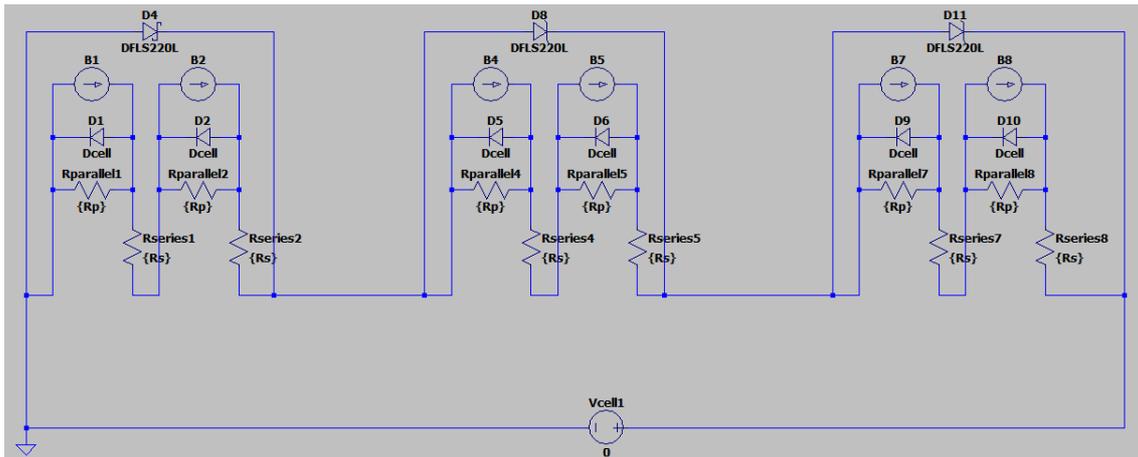


Figura 24. Esquema circuito eléctrico del módulo fotovoltaico utilizado.

El módulo fotovoltaico utilizado en el trabajo está configurado de la siguiente manera.

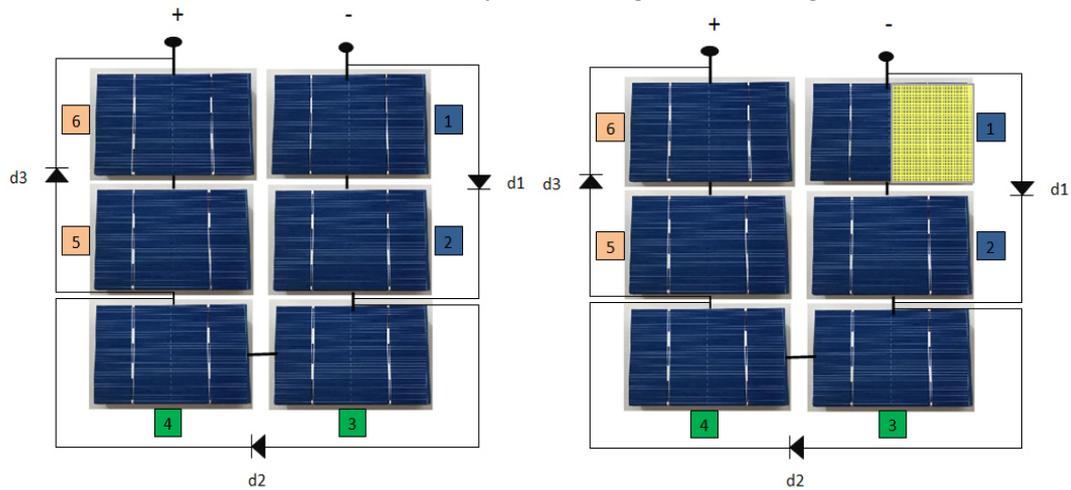
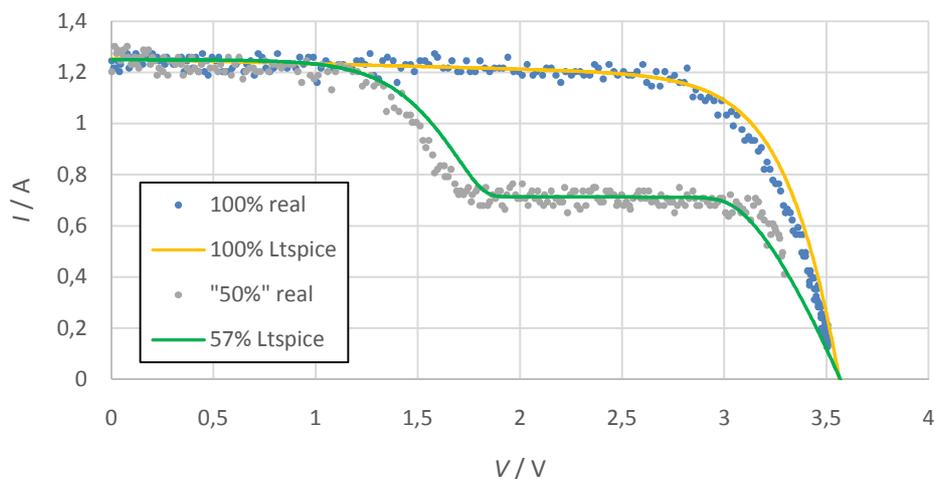
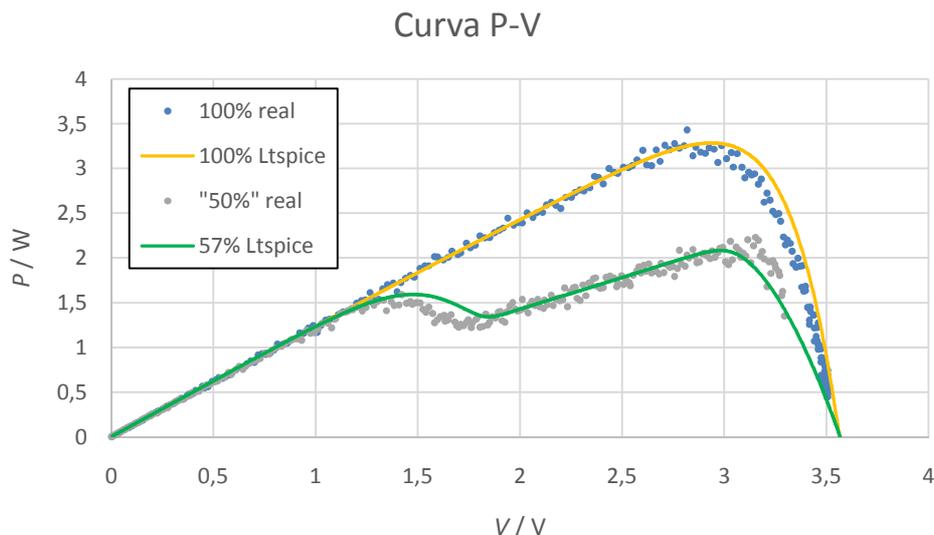


Figura 25. Configuración módulo fotovoltaico Caso 1 (izq) y Caso 2 (dcha).

## Curva I-V



Gráfica 2. Curvas I-V Trazador y LTspice (Caso Nº 1 y Caso Nº 2).



Gráfica 3. Curvas P-V Trazador y LTspice (Caso Nº 1 y Caso Nº 2).

En las gráficas anteriores se observa que en el Caso Nº 1, el módulo formado por 6 células está produciendo 3,42 w, la intensidad de cortocircuito es de 1,2 A, la tensión de circuito abierto del modulo es de 3,86 v. En este caso no se produce ningún tipo de sombra sobre el módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de circuito abierto es de 3,43 V y la  $I_{SC} = 1,26 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación. El equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos y a pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento del 5% de la corriente de cortocircuito y un descenso del 11% respecto a la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. Además, también se ha realizado un ajuste sobre los parámetros del LTspice para que se ajusten lo mejor posible a las medidas realizadas en laboratorio. Este ajuste es necesario ya que es muy complicado asegurar una irradiancia constante y lograr sombrear exactamente el módulo con el % deseado.

En las gráficas del Caso Nº 2, el módulo formado por 6 células está produciendo 2 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de circuito abierto es de 3,86 V. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas. En las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 3,19 V y la  $I_{SC} = 1,24 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación y sombrear exactamente el módulo, por lo que es necesario un pequeño ajuste en los datos del LTspice.

### **3.1.- Dependencia de los parámetros del módulo fotovoltaico en función de la temperatura**

En el presente Trabajo Final de Máster, también se ha realizado la caracterización térmica del módulo fotovoltaico, analizando los datos que nos indican la evolución de la tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito y variación de la potencia generada por el módulo fotovoltaico en función de la temperatura. También es necesaria saber cómo afectan la irradiación a los parámetros del módulo fotovoltaico.

**Dependencia de la temperatura y la irradiancia sobre el módulo fotovoltaico:**

En la parte trasera de un módulo fotovoltaico comercial o en su ficha técnica, podemos comprobar que los principales parámetros eléctricos vienen determinados por lo que se denomina “condiciones estándares de medida (STC)”, que son:

- 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia incidente.
- 25°C de temperatura de ambiente.
- Masa de aire 1.5 (AM1.5) del espectro.

Esto es así para que podamos comparar módulos sabiendo que todos han sido ensayados bajo las mismas condiciones, ya que no tendría sentido comparar la potencia de dos módulos de fabricantes distintos bajo niveles de irradiancia diferentes. Es por ello que se establecen estas condiciones para hacer los ensayos sobre los módulos fotovoltaicos.

Sin embargo, estas condiciones no son representativas de las condiciones reales de funcionamiento del módulo en una instalación, ya que 1000 W/m<sup>2</sup> es un nivel alto de radiación difícil de alcanzar, y la temperatura de las células es bastante superior a los 25 °C de la STC . Los test que determinan las características eléctricas de los módulos se realizan mediante el denominado “flash test” que al ser durante un momento, no incrementa la temperatura de las células. En una instalación real, los paneles están expuestos directamente al sol durante prácticamente todo el día, esto hace que la temperatura de las células sea significativamente superior a la temperatura ambiente.

Para saber la temperatura de las células fotovoltaicas de un módulo se emplea la siguiente ecuación, que depende de la temperatura ambiente en °C y el nivel de radiación en W/m<sup>2</sup>:

$$T_c = T_a + G * \frac{TONC - 20}{800}$$

- T<sub>c</sub>: Temperatura de las células en °C.
- T<sub>a</sub>: Temperatura ambiente en °C.
- G: Irradiancia solar en W/m<sup>2</sup>.
- TONC: Temperatura de operación nominal de la célula. Es un parámetro que nos facilita el fabricante.

Para realizar los cálculos de forma más realista tomamos un valor de radiación de 800 W/m<sup>2</sup> y la temperatura de las células unos 25 °C por encima de la temperatura ambiente.

Es evidente, que la potencia entregada por el módulo irá variando a medida que varía la radiación solar y la temperatura. Se comprobará en qué medida afectan estos factores a las características técnicas del módulo fotovoltaico. A continuación, observaremos el comportamiento por separado de la temperatura, de la irradiancia y de las dos juntas.

**Variación de la temperatura manteniendo la irradiancia CTE:**

En el presente trabajo se han realizado las mediciones sobre el módulo fotovoltaico para observar como varían los parámetros eléctricos con la variación de temperatura que viene indicada por los coeficientes de temperatura obtenidos de la medidas de laboratorio que nos sirven para determinar las características técnicas.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

- $\alpha$ : Coeficiente de temperatura de Intensidad
- $\beta$ : Coeficiente de temperatura de Tensión
- $\gamma$ : Coeficiente de temperatura de Potencia

En los módulos fotovoltaicos comerciales, aparecen en las fichas técnicas los coeficientes de temperatura específicos de cada módulo. De forma teórica los coeficientes de temperatura en la tensión y la potencia son negativos, mientras que el de la intensidad es positivo, esto significa que al aumentar la temperatura, la tensión y la potencia disminuyen, mientras que la intensidad aumenta. Sin embargo el aumento de la intensidad es casi despreciable frente a la reducción del valor de la tensión, de ahí que el resultado sea que la potencia de un módulo fotovoltaico ( $P=V \times I$ ) disminuye al aumentar temperatura.[13-14]

Las fórmulas para obtener los valores de tensión, intensidad y potencia a diferentes temperaturas son las siguientes:

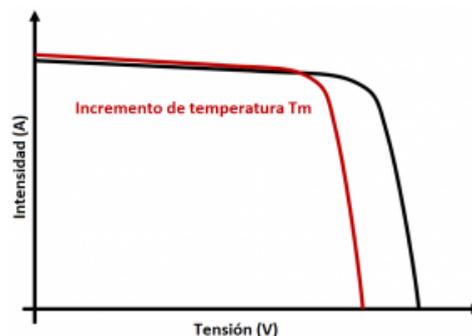
$$V_{OC(T_m)} = V_{OC} * (1 + \beta * (T_m - T_{STC}))$$

$$I_{SC(T_m)} = I_{SC} * (1 + \alpha * (T_m - T_{STC}))$$

$$P_{PMP(T_m)} = P_{PMP} * (1 + \gamma * (T_m - T_{STC}))$$

- $V_{oc(T_m)}$ : Tensión a circuito abierto a una temperatura  $T_m$ .
- $I_{sc(T_m)}$ : Intensidad de cortocircuito a una temperatura  $T_m$ .
- $P_{pmp(T_m)}$ : Potencia en el punto de máxima potencia a una temperatura  $T_m$ .
- $T_{stc}$ : Temperatura en condiciones estándares de medida (25°C)
- $T_m$ : Temperatura del módulo.

En la siguiente gráfica podemos observar en color rojo la curva característica de un módulo fotovoltaico a una temperatura mayor pero manteniendo la irradiación constante. Se puede observar cómo se produce un pequeño aumento en la corriente del módulo, mientras que la tensión disminuye con el aumento de temperatura.

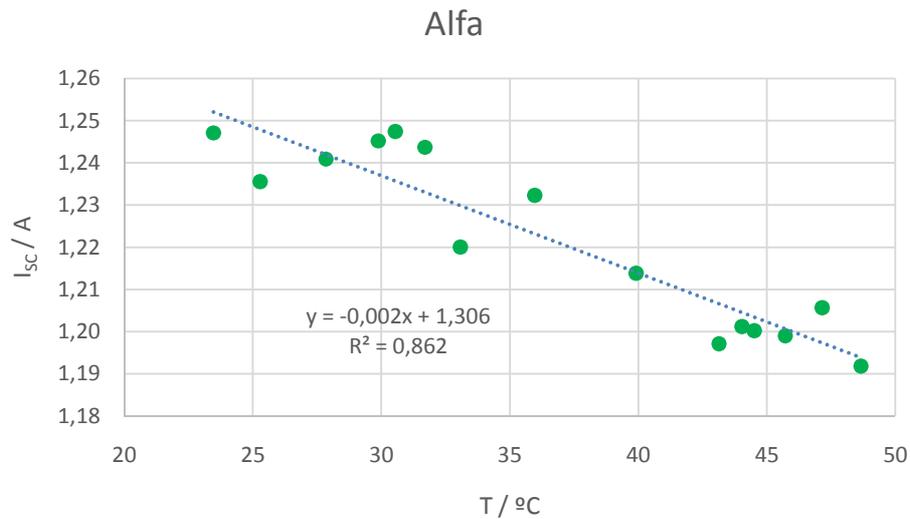


Gráfica 4. Variación de la tensión y la intensidad con respecto a la temperatura.

Por lo tanto podemos concluir que la eficiencia o rendimiento del módulo es inferior cuando aumenta la temperatura.

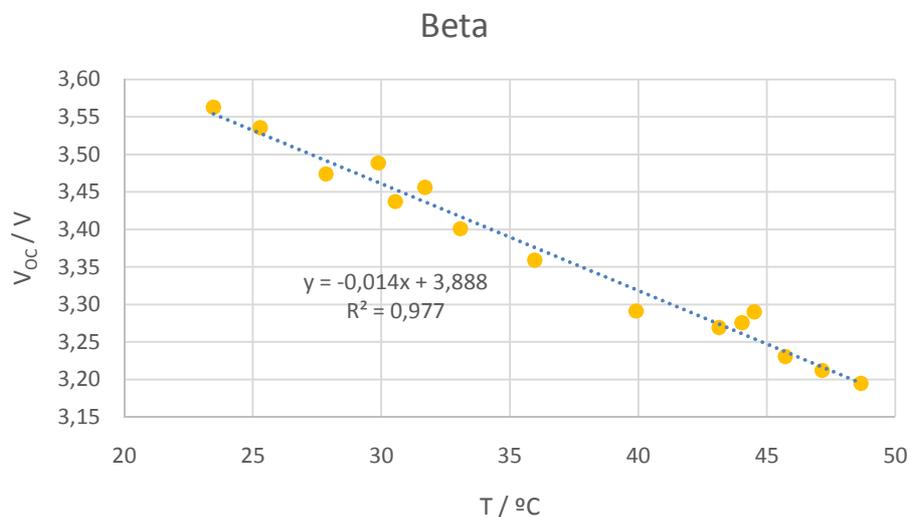
Las gráficas que se muestran a continuación, son las que se han obtenido de los valores de las medidas realizadas en laboratorio. A partir de estos datos se sacan las siguientes gráficas en las que podemos determinar cómo varían los parámetros anteriores.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS



Gráfica 5. Evolución del Coeficiente de temperatura de intensidad ( $\alpha$ ).

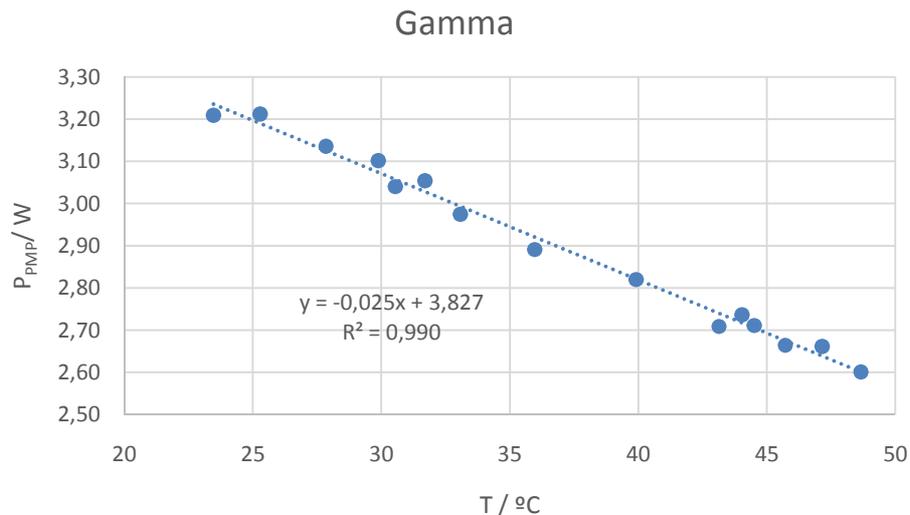
En la gráfica anterior se puede observar como la corriente de cortocircuito disminuye con el aumento de temperatura, el resultado obtenido es contrario a lo que de forma teórica debería de ocurrir ya que al aumentar la temperatura la corriente de cortocircuito del módulo debería aumentar ligeramente. Una de las posibles explicaciones a este resultado puede ser debido a el equipo de medida utilizado, ya que éste solo es capaz de captar 248 pares de valores, por lo que puede producirse un pequeño error en la medida y esto cause dicho resultado.



Gráfica 6. Evolución del Coeficiente de temperatura de tensión ( $\beta$ ).

En la gráfica superior se puede observar como la tensión de circuito abierto disminuye con el aumento de temperatura. El resultado obtenido concuerda con los resultados de forma teórica, ya que al aumentar la temperatura la tensión de circuito abierto disminuye.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS



Gráfica 7. Evolución del Coeficiente de temperatura de potencia ( $\gamma$ ).

En la gráfica anterior se observa como la potencia generada por el módulo PV disminuye con el aumento de temperatura, esto es debido a que el descenso de la tensión es mayor que el aumento de la corriente por lo que disminuye la potencia generada, este resultado refleja lo que de forma teórica ocurre.[7-8]

Como resumen se ha elaborado una tabla con los resultados de cómo varían los diferentes parámetros del módulo fotovoltaico con la variación de la temperatura. Se puede ver como el único de los 3 parámetros que no concuerda con la teoría es el que afecta a la corriente, pero como se ha dicho anteriormente puede ser debido al equipo de medida utilizado. Por el contrario tanto la tensión como la potencia generada por el módulo disminuyen en un 1,42% y un 2,52% por cada °C que aumenta la temperatura sobre el módulo fotovoltaico.

Tabla 5. Variación de los coeficientes de temperatura  $\alpha, \beta, \gamma$

| Alfa / (A/°C) | Beta / (V/°C) | Gamma / (W/°C) |
|---------------|---------------|----------------|
| -0,23%        | -1,42%        | -2,52%         |

La curva I-V de un módulo fotovoltaico no solo depende de la irradiancia, sino también de la temperatura. El módulo eleva su temperatura debido a la absorción de los fotones. Parte de esa energía se evacua del módulo mediante la producción de energía. A este aumento de temperatura hay que sumarle el incremento de temperatura debido al autocalentamiento de la placa LED. Esto no es un problema para la medida de la curva I-V, porque se realiza de forma muy rápida. Pero es un problema entre medidas.

Para poder medir la temperatura del módulo, se han agregado al módulo 6 sensores de temperatura, uno por cada célula. Estos sensores se conectan a una placa tipo Arduino, que nos permite exportar los valores de temperatura a un blog de notas. Estos sensores nos permiten saber qué células están sombreadas gracias a la diferencia de temperatura entre las células que constituyen el módulo. A partir de estas curvas a diferentes temperaturas, se ha calculado la dependencia de  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y la potencia máxima de salida del módulo[11-17]. A continuación se muestran unas gráficas obtenidas en las medidas realizadas en el laboratorio.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

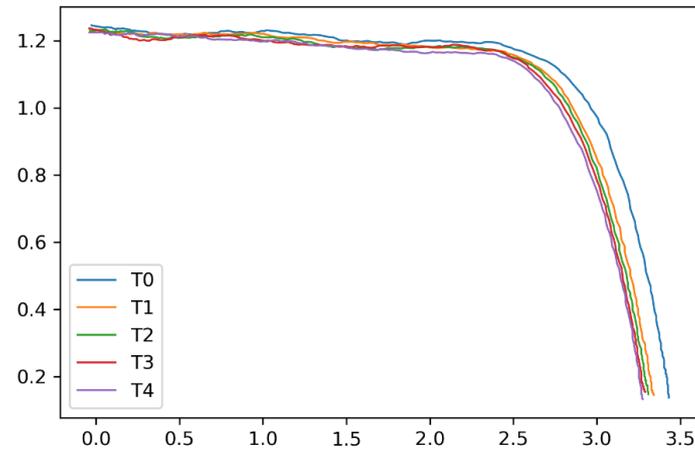


Figura 26. Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes temperaturas.

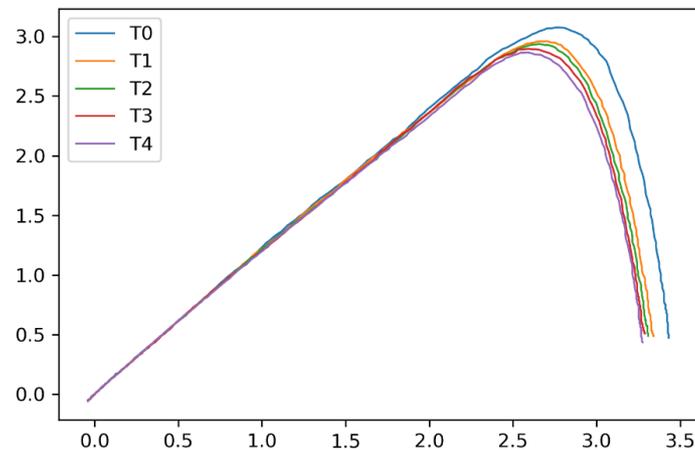


Figura 27. Curvas P-V de un módulo fotovoltaico a diferentes temperaturas.

### **Variación de la irradiación manteniendo la temperatura CTE:**

Aunque en el presente trabajo las mediciones se han realizado con la irradiación CTE, también es necesario saber que la irradiación afecta a los parámetros del módulo. En este caso el análisis es algo más complejo ya que los fabricantes no aportan información para conocer el comportamiento del módulo con diferentes niveles de irradiación.[21-23]

Para obtener esto, nos vamos a fijar:

- La tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) disminuye logarítmicamente al disminuir la irradiación.
- La intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) disminuye linealmente al disminuir la radiación.
- El factor de forma (FF) es constante, no depende de la radiación incidente.

Las fórmulas para obtener los parámetros de tensión, intensidad y potencia a diferentes niveles de radiación son las siguientes:

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

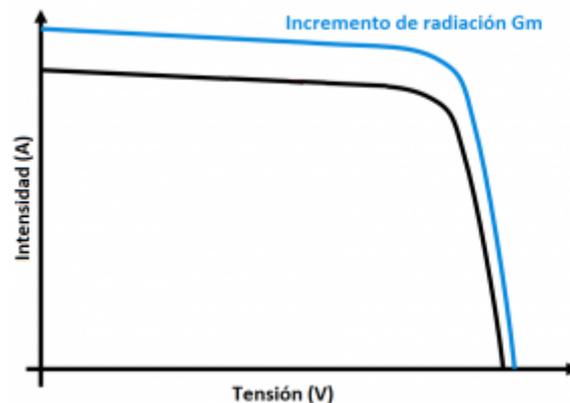
$$V_{OC}(G_m) = V_{OC(STC)} + \frac{n * k_B * T}{q} * \ln\left(\frac{G_m}{G_{STC}}\right)$$

$$I_{SC}(G_m) = I_{SC(STC)} * \frac{G_m}{G_{STC}}$$

$$P_{PMP}(G_m) = FF * V_{OC}(G_m) * I_{SC}(G_m)$$

- $V_{OC}(G_m)$ : Tensión a circuito abierto a un nivel de irradiancia  $G_m$ .
- $I_{SC}(G_m)$ : Intensidad de cortocircuito a un nivel de irradiancia  $G_m$ .
- $P_{pmp}(G_m)$ : Potencia en el punto de máxima potencia a un nivel de irradiancia  $G_m$ .
- $G_{STC}$ : Irradiancia en condiciones estándares de medida ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- $G_m$ : Irradiancia sobre el módulo  $\text{W/m}^2$
- $n$ : factor de idealidad de la célula (adopta valores de 1,2 o 1,3 aproximadamente en células de silicio cristalino).
- $K_b$ : Constante de Boltzman ( $K_b: 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).
- $q$ : carga del electrón ( $q=1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

En la siguiente gráfica podemos ver en color azul la curva característica del panel a un nivel de irradiancia superior pero con temperatura constante.



Gráfica 8. Variación Curva I-V variando la Irradiancia.

### Variación de la irradianción y la temperatura sobre los parámetros:

Aunque en el presente trabajo no sea necesario para los resultados que se han obtenido. También es necesario saber cómo afecta el efecto de la temperatura y la radiación de forma conjunta. El resultado es una ecuación que es función de un factor "K" que depende de la tecnología empleada en cada módulo.

$$\eta(T_m, G_m) = \eta(25^\circ\text{C}, G_m) * [1 + k * (T_m - 25^\circ\text{C})]$$

$$k = \frac{\eta_{coef}}{\eta_{STC}} \approx \begin{cases} -0,0035/^\circ\text{C} \text{ para Si cristalino} \\ -0,003/^\circ\text{C} \text{ para CIS} \\ -0,0025/^\circ\text{C} \text{ para CdTe} \end{cases}$$

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

La potencia de salida del panel en cada momento vendrá dada por la siguiente expresión:

$$P_{DC} = \eta(T_m, G_m) * A * G_m$$

### **4.- Conclusiones y Trabajos Futuros**

En el presente trabajo se ha demostrado que con el prototipo de trazador I-V es posible trazar la curva I-V y P-V de un módulo fotovoltaico, para así poder caracterizarlo térmica y eléctricamente. Mediante el prototipo trazador I-V, se han obtenido las curvas de los diferentes casos estudiados en el trabajo y se han comparado con las simulaciones realizadas en LTspice, para así analizarlas y obtener unos resultados en los que se verifica que el prototipo trazador I-V, realiza correctamente las gráficas. Los resultados obtenidos una vez analizados los casos estudiados es que el prototipo trazador I-V, necesita una serie de pequeñas mejoras para así obtener unas gráficas más precisas, ya que con el actual prototipo el número de puntos que capta se queda escaso. Se han solucionado diversas dificultades técnicas encontradas para la correcta medida de la tensión y corriente del módulo fotovoltaico y toda la electrónica necesaria para asegurarlo. Calibramos los rangos de amplificadores operacionales y los medimos con un osciloscopio para obtener los valores correctos para convertir los valores de ADC a los valores de voltaje. Todas estas conversiones se realizan mediante software en el programa informático que descarga los datos del dispositivo, guarda los archivos y los traza.

Por lo tanto se ha demostrado que con un prototipo Trazador I-V de bajo costo, es posible realizar curvas I-V y P-V de un módulo fotovoltaico con la precisión adecuada para caracterizar los posibles defectos que se han mencionado.

En cuanto a la caracterización térmica se ha analizado cómo afecta la variación de la temperatura al módulo fotovoltaico, para ello se han obtenido unos coeficientes a partir de los diferentes casos analizados en los que los resultados obtenidos concuerdan bastante con la teoría. El parámetro de la corriente es el que se comporta de una manera distinta que en la teoría, ya que al aumentar la temperatura la corriente debería sufrir un ligero aumento. El resultado obtenido en el trabajo es que la corriente disminuye un 0,23% por cada °C de incremento de temperatura, esto puede ser debido a que el equipo de medida no logre captar los suficientes puntos y se produzca un ligero desajuste. En cuanto a los parámetros de tensión y potencia generada por el módulo éstos disminuyen en un 1,42% y 2,52% por cada °C de aumento de temperatura. Estos dos parámetros cumplen con lo establecido de forma teórica.

Una vez observado que los datos obtenidos con el prototipo trazador I-V, reflejan de forma óptima la forma de la curva y los valores de corriente y tensión. Estos están en línea con lo esperado, por lo que estamos seguros de que el dispositivo está midiendo correctamente. La comparación con las simulaciones realizadas con LTspice, nos permite conocer el nivel de precisión alcanzado por el dispositivo. Este nivel de precisión es necesario mejorarlo para poder obtener curvas con un mayor número de puntos para así reducir el ruido en la medición y obtener curvas mucho más cercanas a la simulación.

Para finalizar, todos los defectos e inconvenientes que han surgido a lo largo del trabajo se han apuntado con el fin de incorporar soluciones y nuevas ideas. Se está diseñando un nuevo prototipo trazador I-V que solvete defectos que se han observado durante el trabajo. En el nuevo dispositivo se incorporará un procesador más potente, una memoria interna con capacidad para almacenar hasta 5000 puntos a la vez, elementos electrónicos que nos

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

permitan tiempos más rápidos entre medidas. Además de integrar también los sensores de temperatura en el mismo dispositivo para poder realizar ambas medidas de forma simultánea. Además, el nuevo prototipo integrará la comunicación por USB con el ordenador.

### **5.- BIBLIOGRAFÍA**

- [1]. E. D. Dunlop y D. Halton, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 82, 467 (2004).
- [2]. S. W. Johnston, N. J. Call, B. Phan, y R. K. Ahrenkiel, en *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf. (Philadelphia, PA, USA, 2009)*, pp. 000276-000281.
- [3]. “Efecto de la Resistencias Parasitarias | PVEducation.” [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/efecto-de-la-resistencias-parasitarias>.
- [4]. R. B. Becerra, “FÍSICA DE SEMICONDUCTORES BANDAS DE ENERGÍA - ppt descargar.” [Online]. Available: <https://slideplayer.es/slide/5561442/>.
- [5]. “Semiconductores Extrínsecos Tipo N y Tipo P - ppt video online descargar.” [Online]. Available: <https://slideplayer.es/slide/8994778/>.
- [6]. “Instalación Solar Fotovoltaica para Vivienda.” [Online]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>
- [7]. M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi, and M. Dales, “The impact of cracks on photovoltaic power performance,” *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, vol. 2, no. 2, pp. 199–209, 2017
- [8]. A. Abete, E. Barbisio, F. Cane, y P. Demartini, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf. 2*, 1005 (1990).
- [9]. Y. Zhu y W. Xiao, *Sol. Energy* 196, 346 (2020).
- [10]. W. Ananda, *QiR 2017 - 2017 15th Int. Conf. Qual. Res. Int. Symp. Electr. Comput. Eng. 2017-December*, 450 (2017).
- [11]. CIEMAT, Ed., *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica.*, Vol. I. 2006.
- [12]. “Efecto de las sombras en un panel solar fotovoltaico.” [Online]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/efecto-de-las-sombras-en-un-panel-solar-fotovoltaico/>.
- [13]. Ingelibre, “Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica,” 2014. [Online]. Available: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>.
- [14]. Marc Köntges et al., *Review on Failures of Photovoltaic Modules*. 2013.
- [15]. M. Simon and E. L. Meyer, “Low cost I-V system employing variable power supply unit as an electronic load,” *J. Eng. Des. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 330–344, Oct. 2012.

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

- [16]. [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_04.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm)
- [17]. E. E. van Dyk, A. R. Gxasheka, and E. L. Meyer, "Monitoring current–voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 3, pp. 399–411, Mar. 2005.
- [18]. J. Muñoz and E. Lorenzo, *Diseño de una carga capacitiva para medir generadores fotovoltaicos*, no. 127. S.A.P.T. Publicaciones Técnicas, 1983.
- [19]. S. Gallardo-Saavedra, L. Hernández-Callejo, M. D. C. Alonso-García, J. D. Santos, J. I. Morales-Aragonés, V. Alonso-Gómez, Á. Moretón-Fernández, M. Á. González-Rebollo, y O. Martínez-Sacristán, *Energy* 205, (2020).
- [20]. A low-cost device for measuring the complete I-V curve of solar cells integrated into a modular platform suitable for other techniques such as electroluminescence. Víctor Alonso-Gómez<sup>1</sup>, José Ignacio Morales-Aragonese, Sara Gallardo-Saavedra, Alberto Redondo Plaza, Diego Fernández Martínez y Luis Hernández-Callejo.
- [21]. F. Fruehauf and M. Turek, "Quantification of Electroluminescence Measurements on Modules," *Energy Procedia*, vol. 77, pp. 63–68, 2015.
- [22]. R. Khatri, S. Agarwal, I. Saha, S. K. Singh, and B. Kumar, "Study on long term reliability of photo-voltaic modules and analysis of power degradation using accelerated aging tests and electroluminescence technique," *Energy Procedia*, vol. 8, pp. 396–401, 2011.
- [23]. S. Kajari-Schröder, I. Kunze, and M. Köntges, "Criticality of cracks in PV modules," *Energy Procedia*, vol. 27, pp. 658–663, 2012.

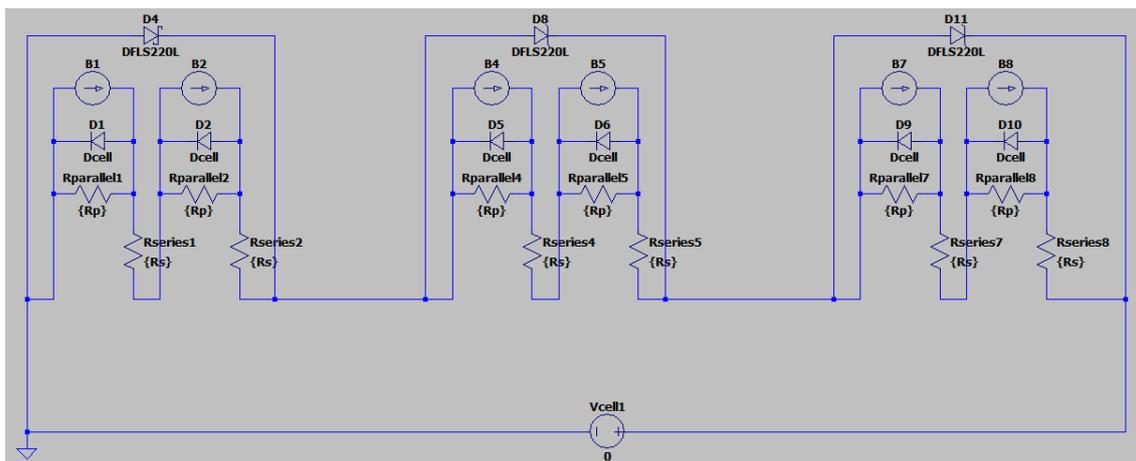
# **ANEXOS**

## ANEXO Nº 1.- CASOS SIMULADOS EN LTSPICE VS MEDIDAS REALES LABORATORIO

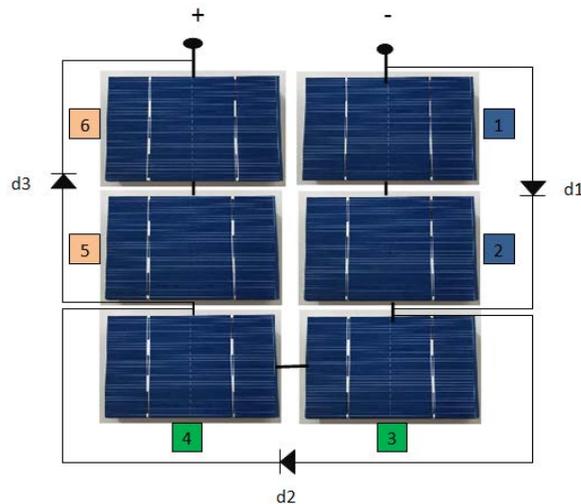
La forma de realizar las mediciones se explicará detalladamente en el apartado de métodos utilizados, en los siguientes casos se realizará una simulación en LTSpice con el caso concreto que sea de análisis y después se compararan los datos obtenidos en la simulación con la medida obtenida en laboratorio, que es realizada con un dispositivo desarrollado por los investigadores del área de fotovoltaica. A partir de los datos obtenidos se realiza una pequeña conclusión con lo observado.

Para la realización de la simulación, se ha partido de un módulo fotovoltaico formado por 6 células solares idénticas, que forman un módulo fotovoltaico con una  $I_{SC} = 1,2 A$ ,  $V_{OC} = 3,86 V$  que genera una potencia  $P = 3,44 W$ , son datos obtenidos de la simulación de LTSpice con una irradiación fija de  $1000 w/m^2$ . Además los diodos de bypass que forman el módulo son de tipo Sttochky, más concretamente el modelo DFLS220L, estos diodos tienen una caída de tensión de  $0,288 V$ , es un diodo que tiene una pérdida de tensión menor que otro tipo de diodos más comunes, que se utilizan de forma genérica. Se ha utilizado este diodo para apreciar mejor los cambios que ocurren con el sombreado de las células del módulo fotovoltaico.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico

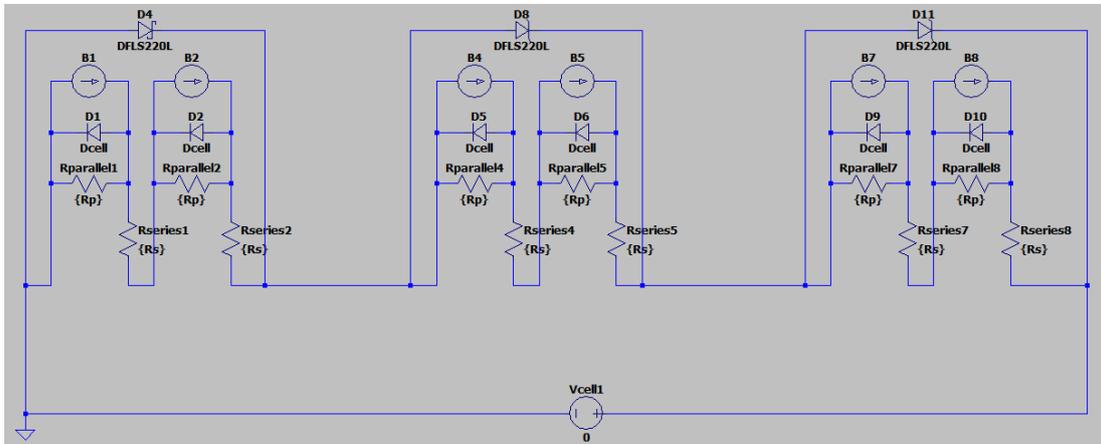


# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

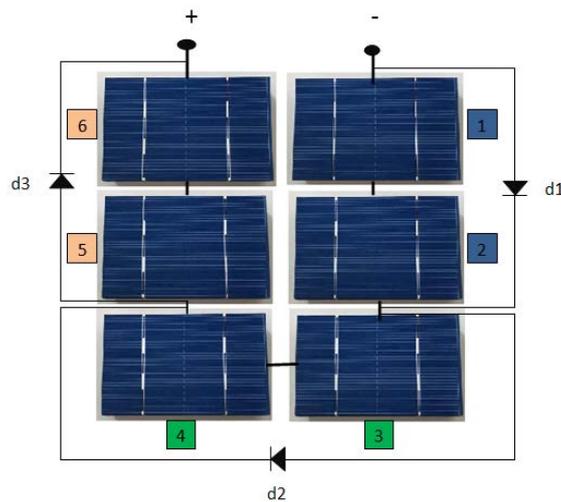
## 1.1-. CASO N°1

El primero de los casos que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico sin ninguna sombra.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso N°1

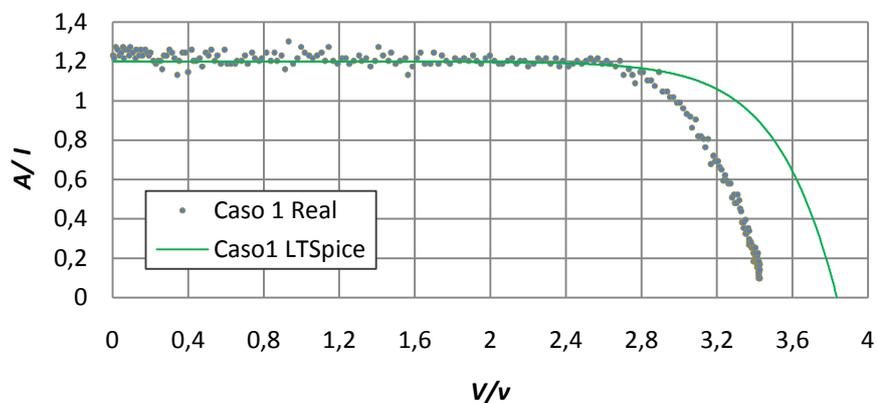


Figura 28. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso N°1

### Curva P-V Caso N°1

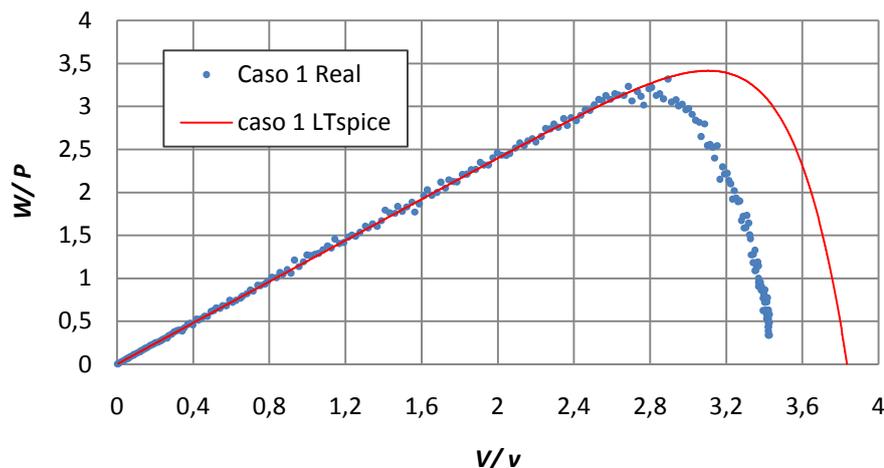


Figura 29. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 1

En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 3,42 w, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,86 v. En este caso no se produce ningún tipo de sombra sobre el módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 3,43 V y la  $I_{SC} = 1,26 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos y a pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento del 5% de la corriente de cortocircuito y un descenso del 11% respecto a la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

Datos obtenidos de la simulación en LTspice y de las medidas realizadas en laboratorio.

| LTSPICE    |                   |              | Medida Real |               |             |
|------------|-------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| Voltaje/ V | W/Potencia        | Corriente/ A | Voltaje/V   | Corriente / A | W/Potencia  |
| vcell1     | V(N003)*I(Vcell1) | I(Vcell1)    |             |               |             |
| 5,00E-03   | 6,00E-03          | 1,20E+00     | -0,05386    | 1,18938       | -0,06406001 |
| 1,00E-02   | 1,20E-02          | 1,20E+00     | -0,04914    | 1,27434       | -0,06262107 |
| 1,50E-02   | 1,80E-02          | 1,20E+00     | -0,03971    | 1,26018       | -0,05004175 |
| 2,00E-02   | 2,40E-02          | 1,20E+00     | -0,03028    | 1,23186       | -0,03730072 |
| 2,50E-02   | 3,00E-02          | 1,20E+00     | -0,02557    | 1,27434       | -0,03258487 |
| 3,00E-02   | 3,60E-02          | 1,20E+00     | -0,01614    | 1,2885        | -0,02079639 |
| 3,50E-02   | 4,20E-02          | 1,20E+00     | -0,00671    | 1,24602       | -0,00836079 |
| 4,00E-02   | 4,80E-02          | 1,20E+00     | 0,00272     | 1,23186       | 0,00335066  |
| 4,50E-02   | 5,40E-02          | 1,20E+00     | 0,00744     | 1,2177        | 0,00905969  |
| 5,00E-02   | 6,00E-02          | 1,20E+00     | 0,01687     | 1,27434       | 0,02149812  |
| 5,50E-02   | 6,60E-02          | 1,20E+00     | 0,0263      | 1,26018       | 0,03314273  |
| 6,00E-02   | 7,20E-02          | 1,20E+00     | 0,03573     | 1,23186       | 0,04401436  |
| 6,50E-02   | 7,80E-02          | 1,20E+00     | 0,04516     | 1,24602       | 0,05627026  |
| 7,00E-02   | 8,40E-02          | 1,20E+00     | 0,05459     | 1,27434       | 0,06956622  |
| 7,50E-02   | 9,00E-02          | 1,20E+00     | 0,05931     | 1,2177        | 0,07222179  |
| 8,00E-02   | 9,60E-02          | 1,20E+00     | 0,06874     | 1,26018       | 0,08662477  |
| 8,50E-02   | 1,02E-01          | 1,20E+00     | 0,08288     | 1,26018       | 0,10444372  |

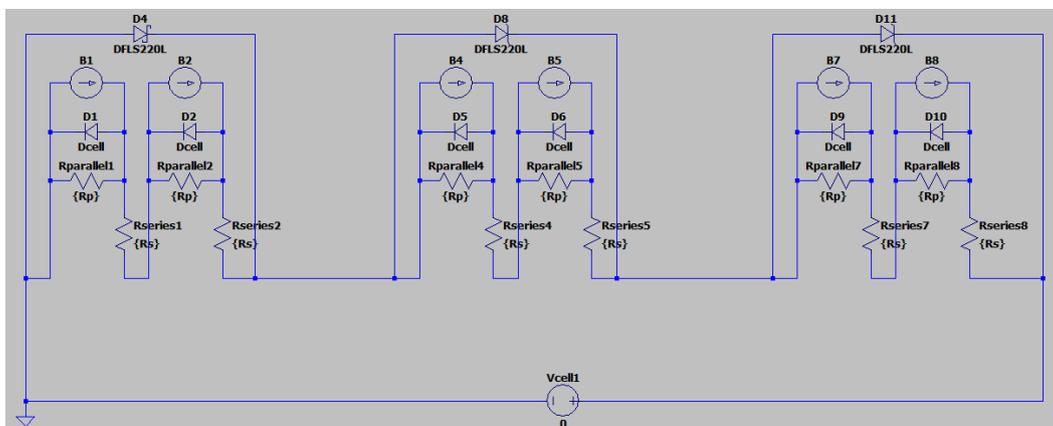
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

|          |          |          |         |         |            |
|----------|----------|----------|---------|---------|------------|
| 9,00E-02 | 1,08E-01 | 1,20E+00 | 0,0876  | 1,23186 | 0,10791094 |
| 9,50E-02 | 1,14E-01 | 1,20E+00 | 0,09231 | 1,27434 | 0,11763433 |
| 1,00E-01 | 1,20E-01 | 1,20E+00 | 0,10646 | 1,24602 | 0,13265129 |
| 1,05E-01 | 1,26E-01 | 1,20E+00 | 0,1206  | 1,2177  | 0,14685462 |
| 1,10E-01 | 1,32E-01 | 1,20E+00 | 0,12532 | 1,26018 | 0,15792576 |
| 1,15E-01 | 1,38E-01 | 1,20E+00 | 0,13946 | 1,23186 | 0,1717952  |
| 1,20E-01 | 1,44E-01 | 1,20E+00 | 0,14889 | 1,26018 | 0,1876282  |
| 1,25E-01 | 1,50E-01 | 1,20E+00 | 0,15832 | 1,23186 | 0,19502808 |
| 1,30E-01 | 1,56E-01 | 1,20E+00 | 0,17247 | 1,26018 | 0,21734324 |
| 1,35E-01 | 1,62E-01 | 1,20E+00 | 0,1819  | 1,24602 | 0,22665104 |
| 1,40E-01 | 1,68E-01 | 1,20E+00 | 0,19133 | 1,23186 | 0,23569177 |
| 1,45E-01 | 1,74E-01 | 1,20E+00 | 0,20076 | 1,24602 | 0,25015098 |
| 1,50E-01 | 1,80E-01 | 1,20E+00 | 0,21491 | 1,20354 | 0,25865278 |
| 1,55E-01 | 1,86E-01 | 1,20E+00 | 0,22905 | 1,18938 | 0,27242749 |
| 1,60E-01 | 1,92E-01 | 1,20E+00 | 0,23848 | 1,20354 | 0,28702022 |
| -----    | -----    | -----    | -----   | -----   | -----      |
| 3,76E+00 | 9,59E-01 | 2,55E-01 | 3,41653 | 0,16991 | 0,58050261 |
| 3,76E+00 | 9,03E-01 | 2,40E-01 | 3,41653 | 0,22655 | 0,77401487 |
| 3,77E+00 | 8,45E-01 | 2,24E-01 | 3,41181 | 0,15575 | 0,53138941 |
| 3,77E+00 | 7,87E-01 | 2,08E-01 | 3,41653 | 0,18407 | 0,62888068 |
| 3,78E+00 | 7,28E-01 | 1,92E-01 | 3,42124 | 0,15575 | 0,53285813 |
| 3,78E+00 | 6,67E-01 | 1,76E-01 | 3,41653 | 0,18407 | 0,62888068 |
| 3,79E+00 | 6,06E-01 | 1,60E-01 | 3,42124 | 0,14159 | 0,48441337 |
| 3,79E+00 | 5,43E-01 | 1,43E-01 | 3,41653 | 0,16991 | 0,58050261 |
| 3,80E+00 | 4,79E-01 | 1,26E-01 | 3,42596 | 0,16991 | 0,58210486 |
| 3,80E+00 | 4,15E-01 | 1,09E-01 | 3,42124 | 0,12743 | 0,43596861 |
| 3,81E+00 | 3,49E-01 | 9,16E-02 | 3,42124 | 0,09912 | 0,33911331 |
| 3,81E+00 | 2,82E-01 | 7,39E-02 | 3,42596 | 0,09912 | 0,33958116 |
| 3,82E+00 | 2,14E-01 | 5,60E-02 | 3,42124 | 0,11327 | 0,38752385 |
| 3,82E+00 | 1,45E-01 | 3,79E-02 | 3,42124 | 0,18407 | 0,62974765 |
| 3,83E+00 | 7,45E-02 | 1,95E-02 | 3,42124 | 0,12743 | 0,43596861 |
| 3,83E+00 | 3,05E-03 | 7,96E-04 | 3,42596 | 0,14159 | 0,48508168 |

### 1.2.- CASO N° 2

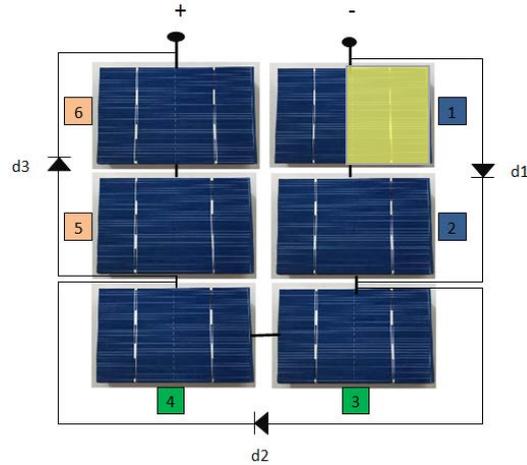
El segundo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº2

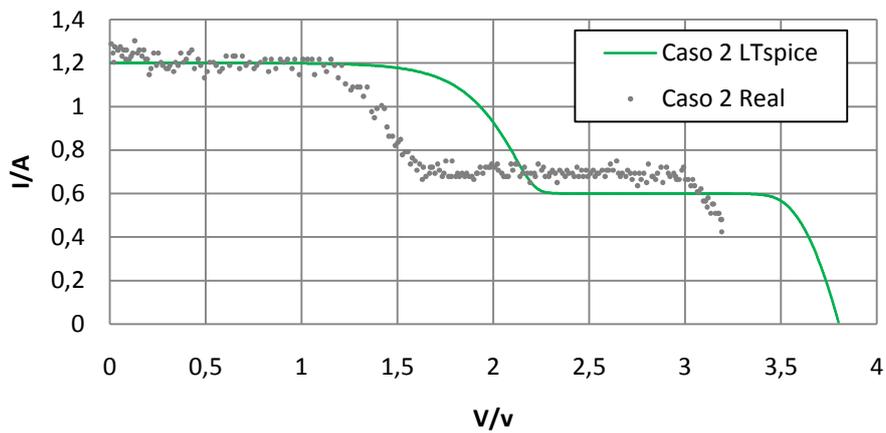


Figura 30. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 2

## Curva P-V Caso Nº 2

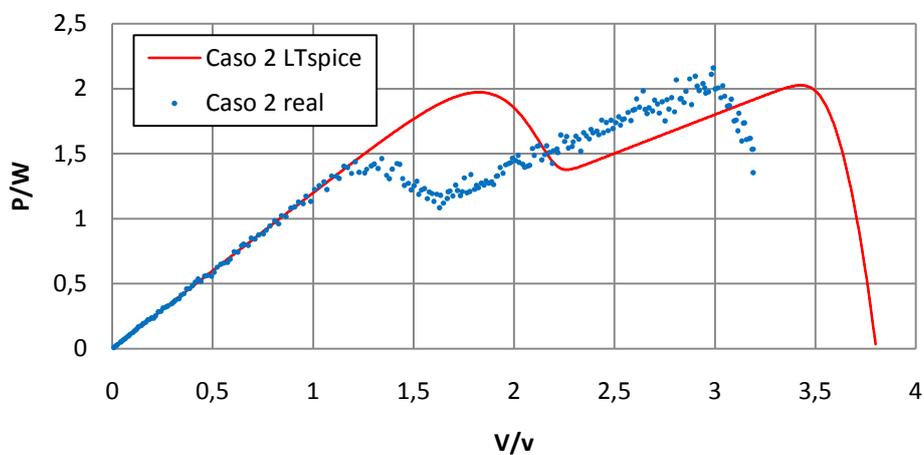


Figura 31. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 2

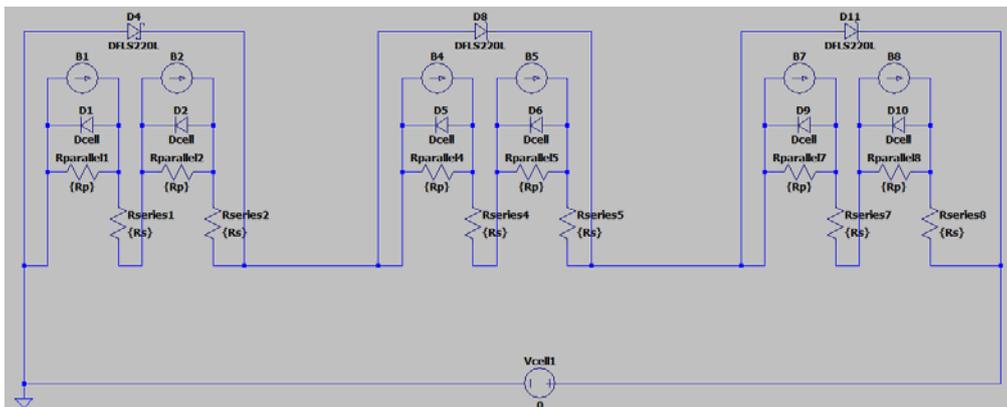
# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 2 w, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,86 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 3,19 V y la  $I_{SC} = 1,24 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos y a pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

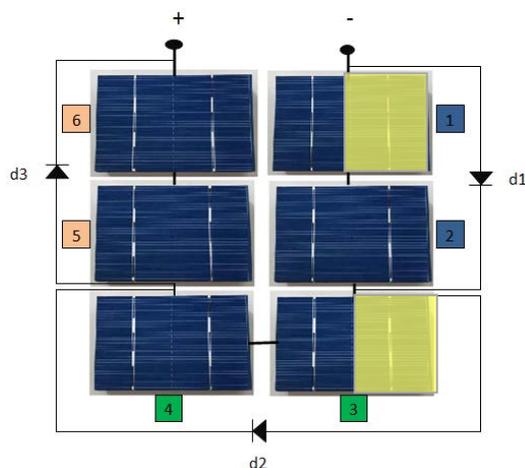
### 1.3-. CASO Nº 3

El tercer caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1 y 3 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 3

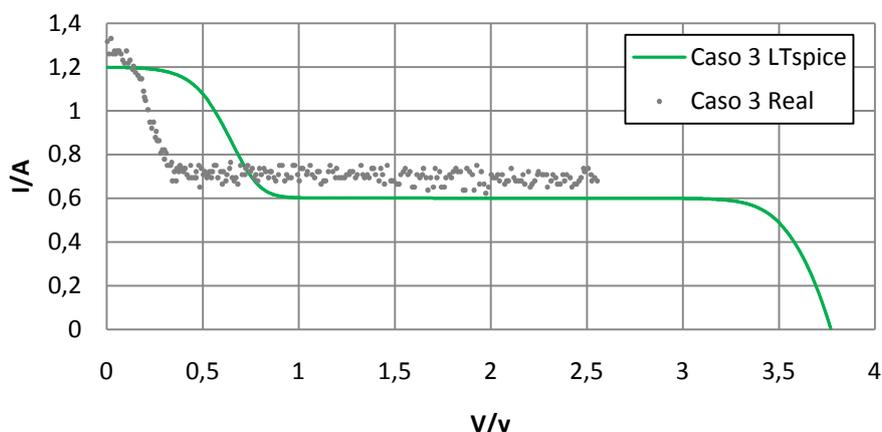


Figura 32. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 3

### Curva P-V Caso Nº 3

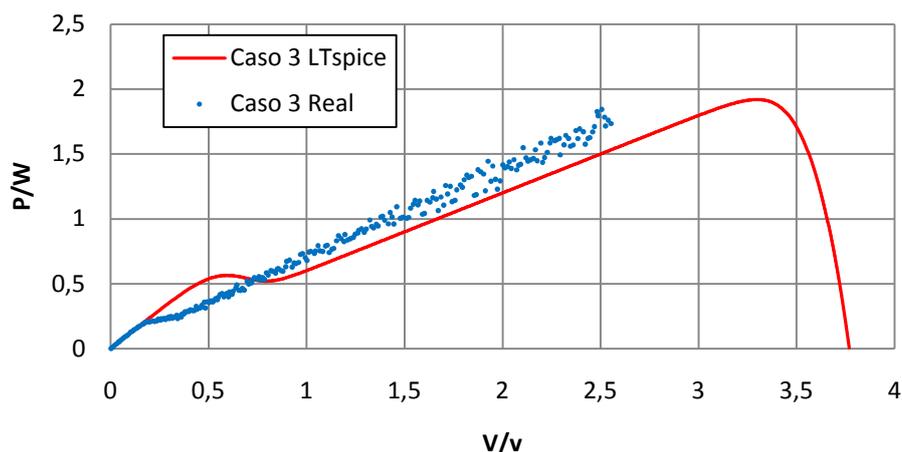


Figura 33. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 3

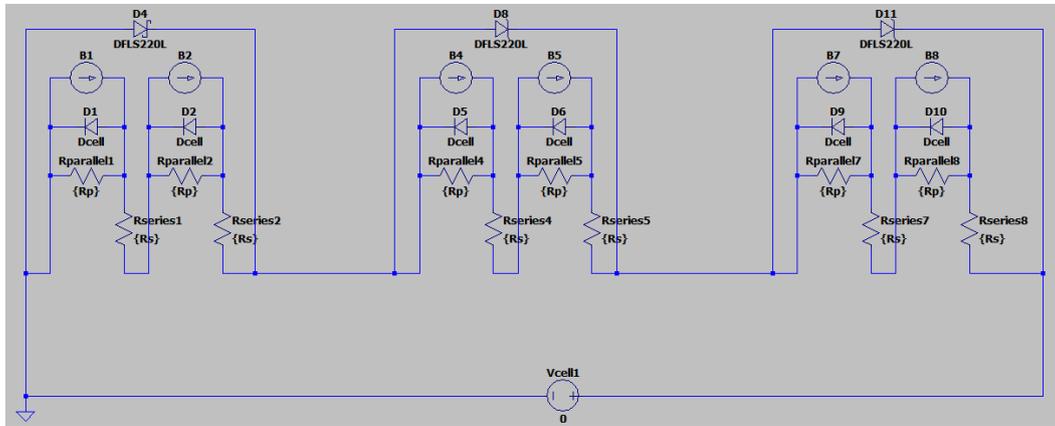
En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,92 w, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,77 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1 y 3 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,66 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos y a pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

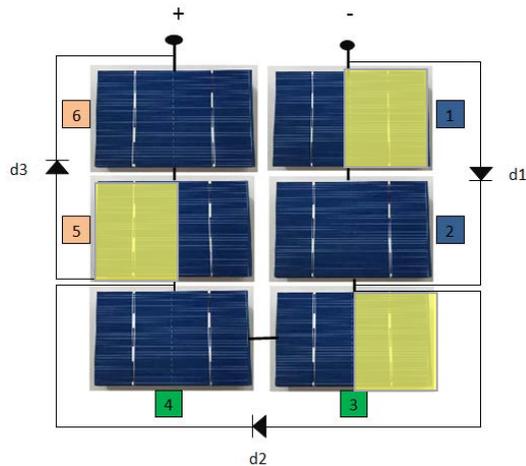
## 1.4-. CASO Nº 4

El cuarto caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1, 3 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 4

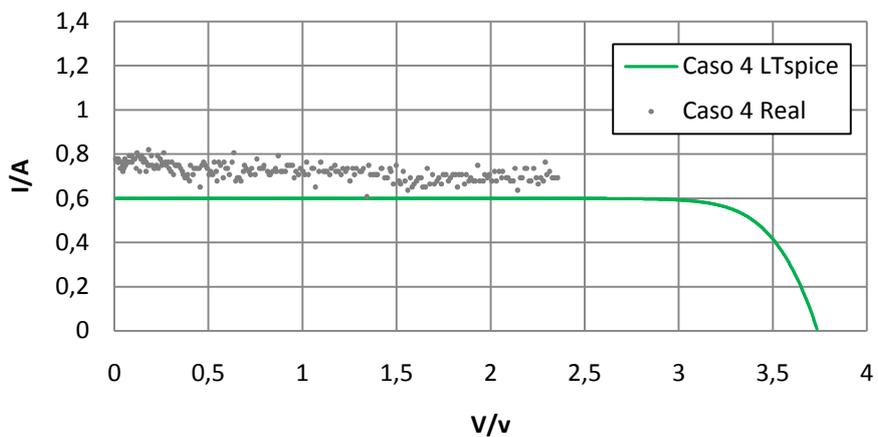


Figura 34. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 4

### Curva P-V Caso N° 4

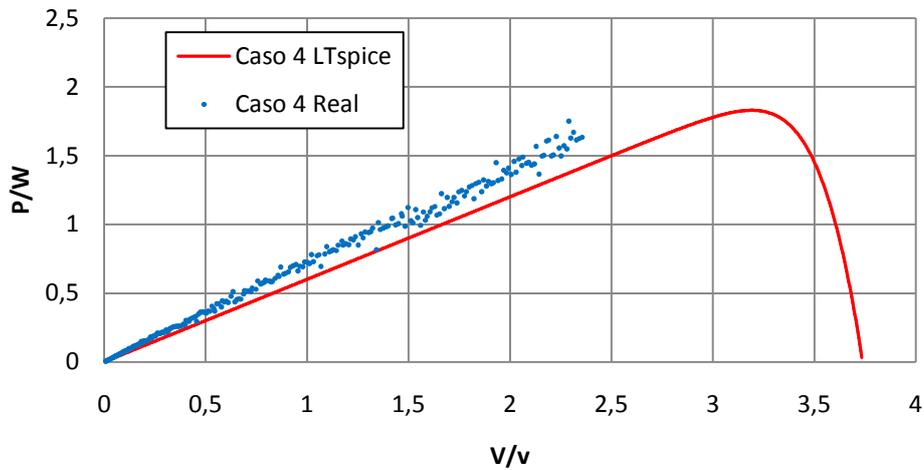


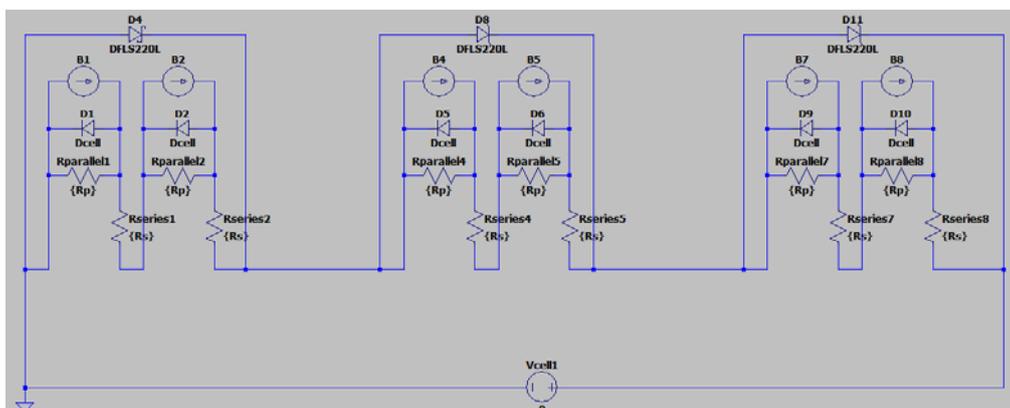
Figura 35. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 4

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,829 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0.6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,74 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1, 3 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,44 V y la  $I_{SC} = 0.79 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

#### 1.5-. CASO N° 5

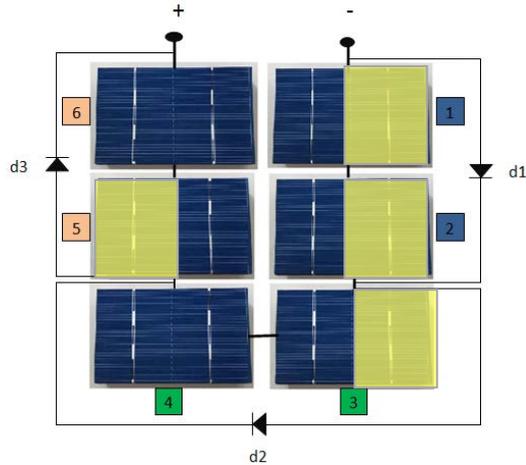
El quinto caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1, 2, 3 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso N°5

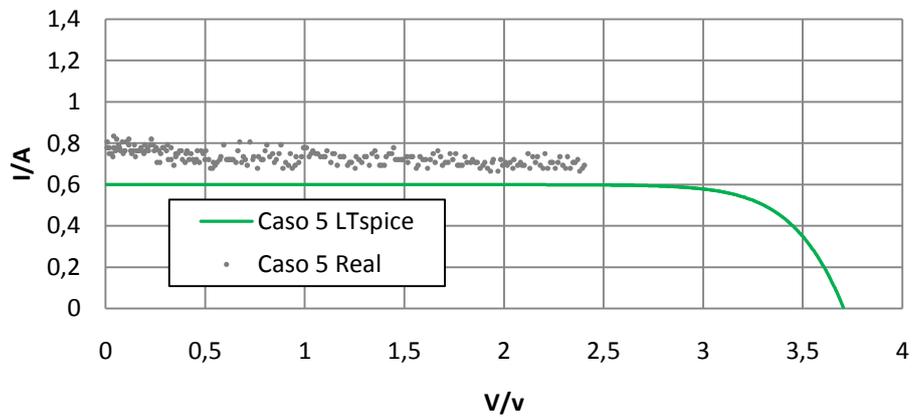


Figura 36. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso N° 5

## Curva P-V Caso N° 5

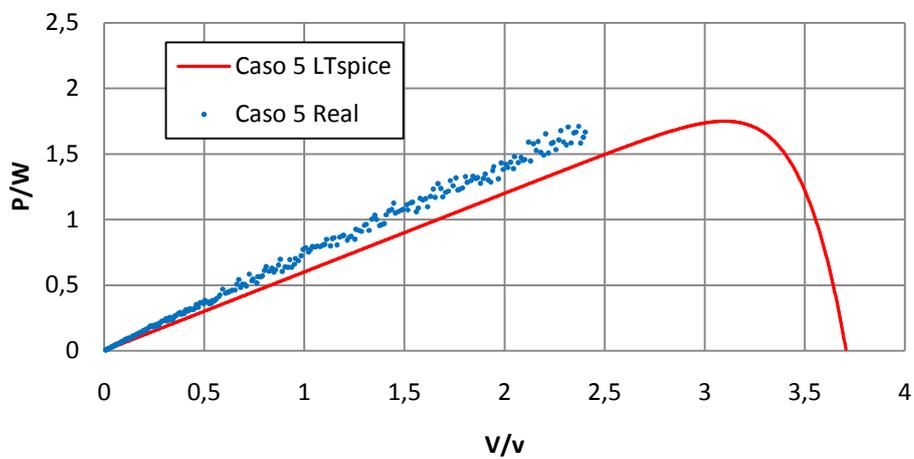


Figura 37. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 5



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 6

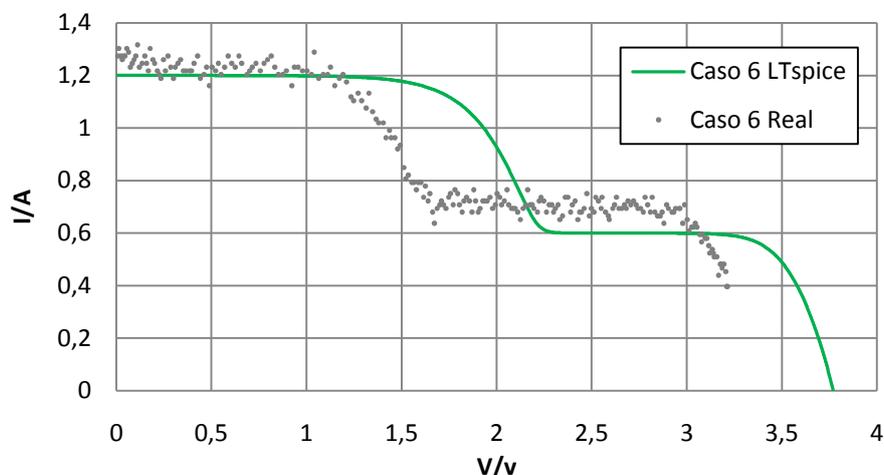


Figura 38. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 6

### Curva P-V Caso Nº 6

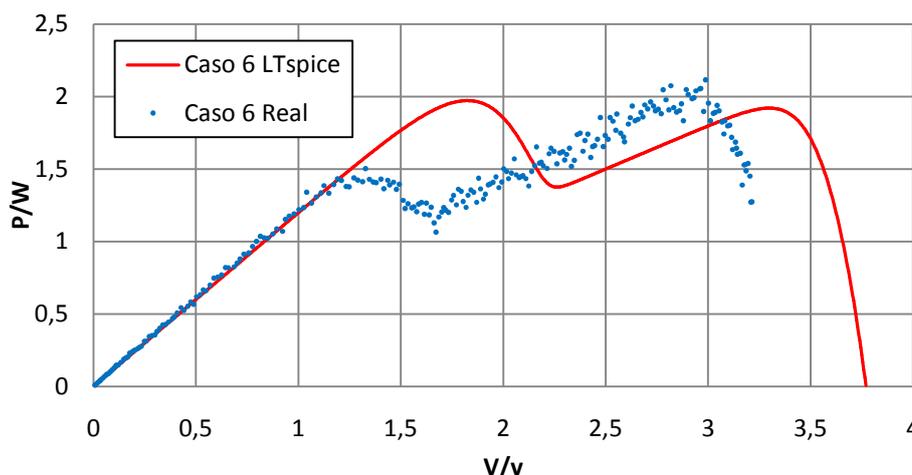


Figura 39. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 6

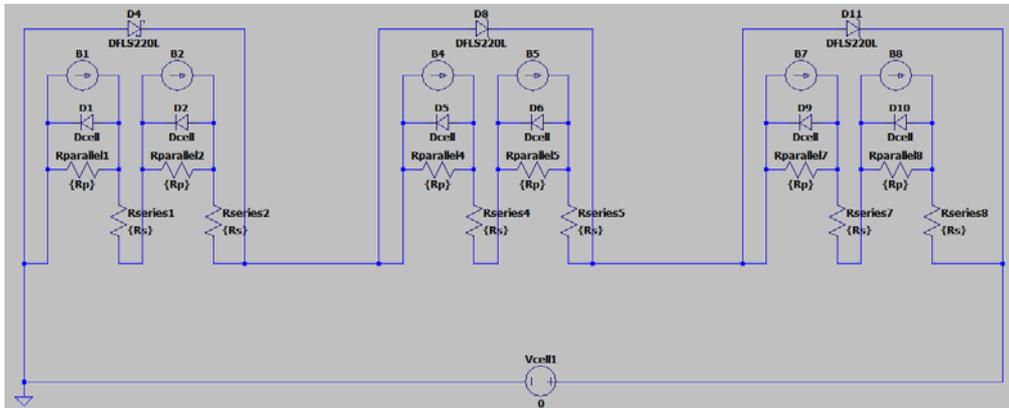
En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,97 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,74 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1 y 2 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 3,34 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay una célula mas sombreada el resultados es similar al caso nº 2.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

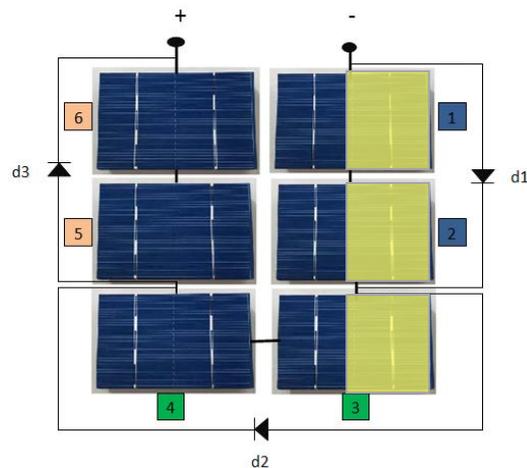
## 1.7-. CASO Nº 7

El séptimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1, 2 y 3 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº7

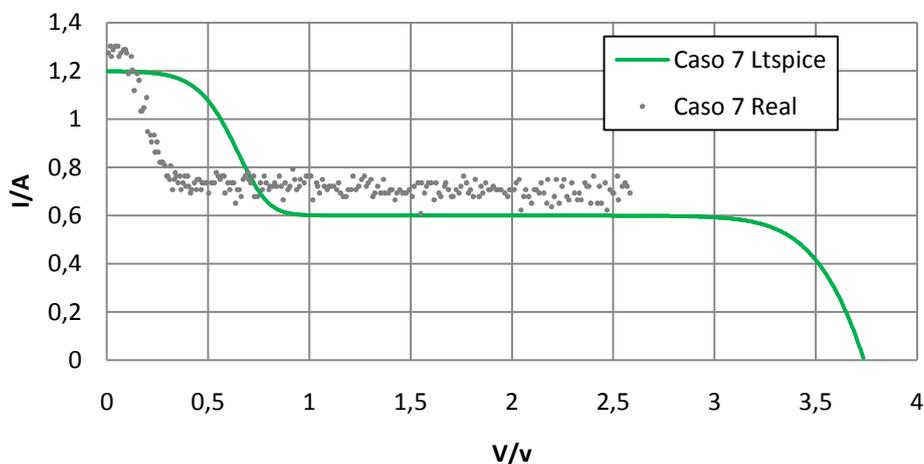


Figura 40. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 7

### Curva P-V Caso N°7

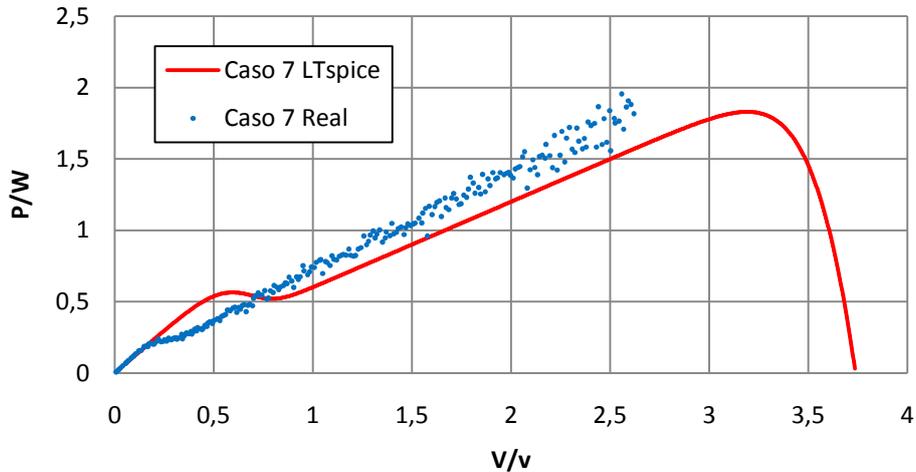


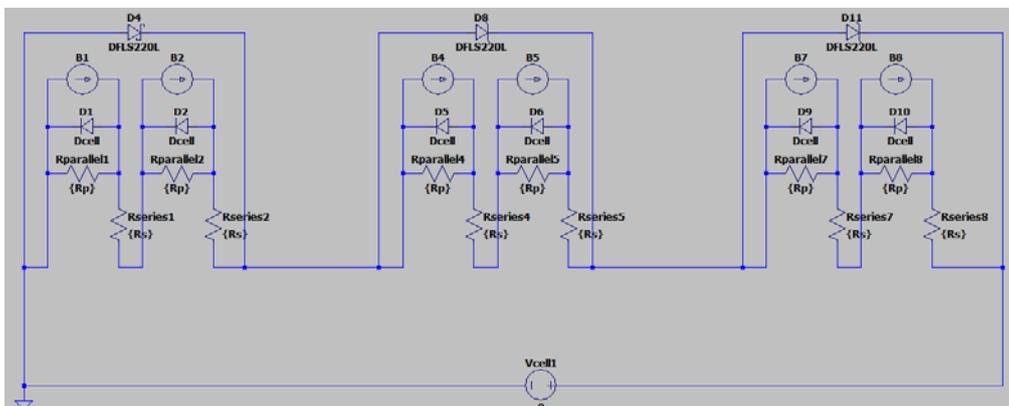
Figura 41. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 7

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,83 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,77 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1, 2 y 3 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,76 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay una célula más sombreada el resultado es similar al caso n° 3.

#### 1.8.- CASO N° 8

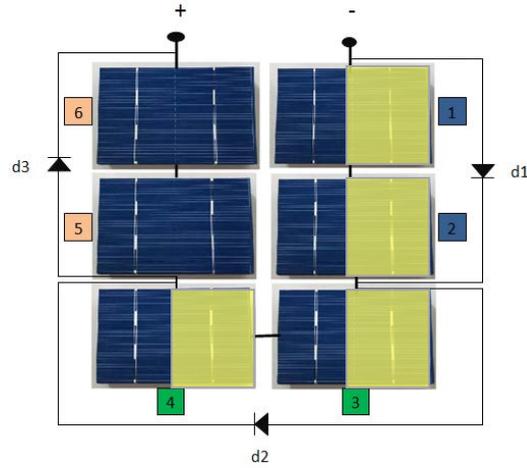
El octavo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1, 2, 3 y 4 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº 8

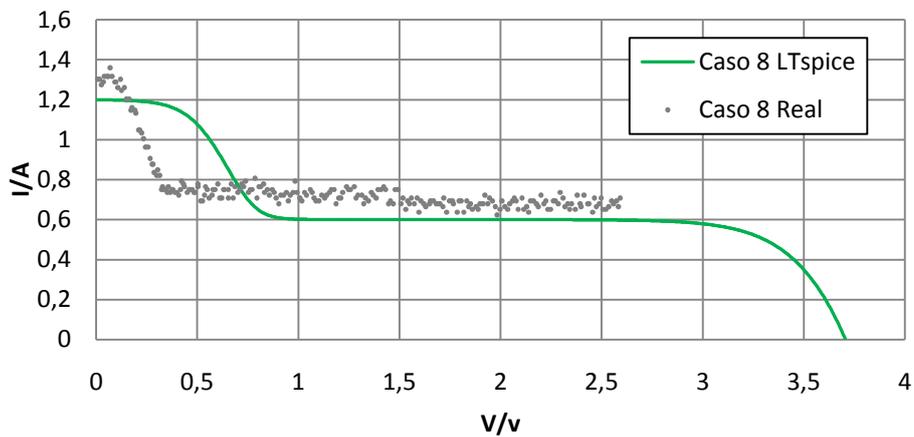


Figura 42. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 8

## Curva P-V Caso Nº 8

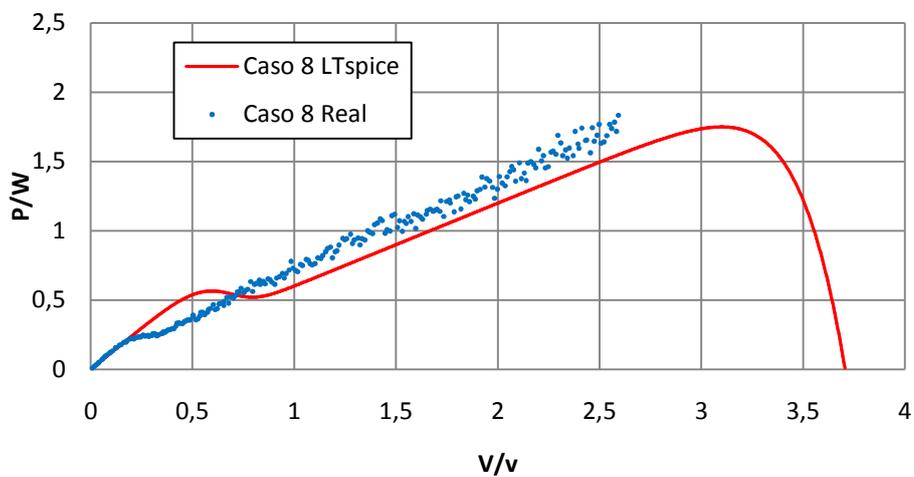


Figura 43. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 8

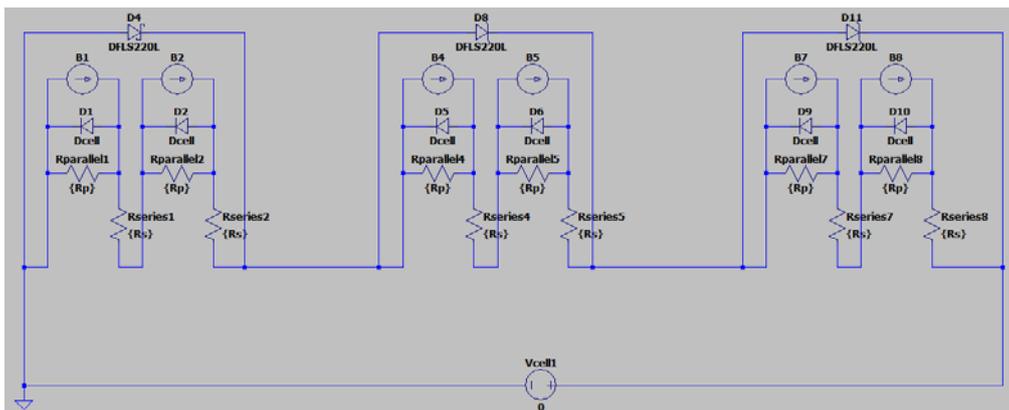
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,75 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,76 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1, 2, 3 y 4 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,72 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay una célula mas sombreada el resultados es similar al caso nº 7.

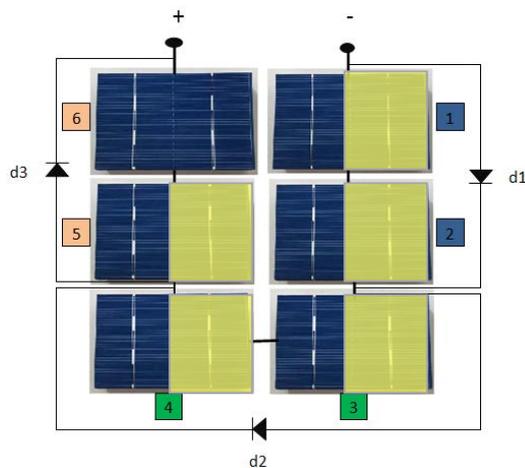
### 1.9.- CASO Nº 9

El noveno caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 1, 2, 3, 4 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico:



## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 9

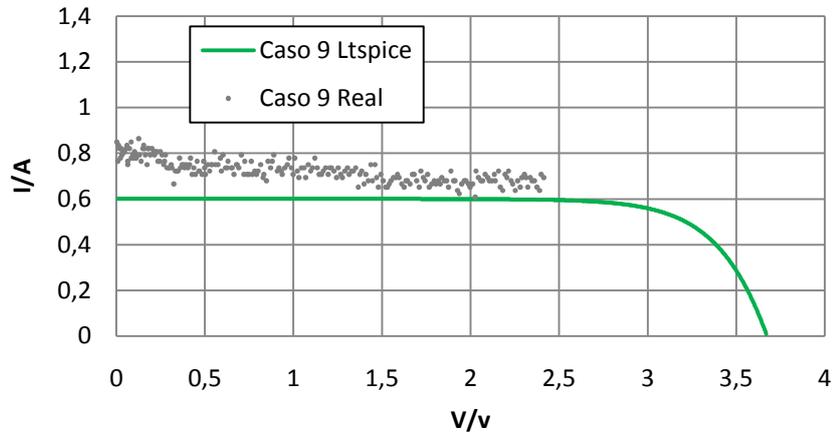


Figura 44. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 9

### Curva P-V Caso Nº 9

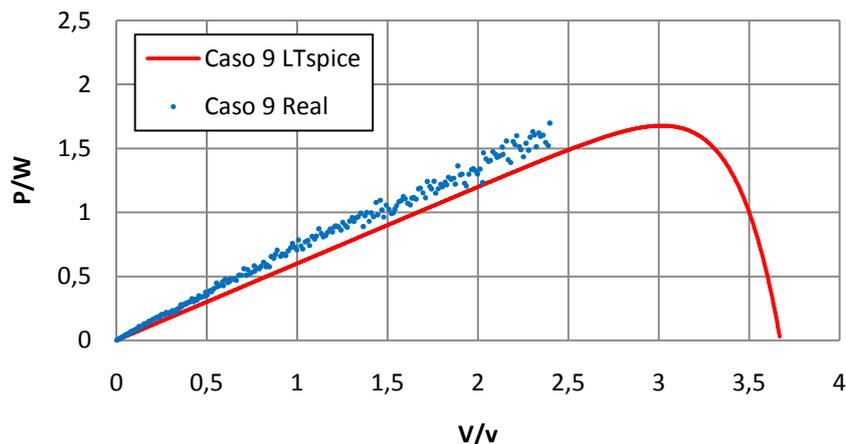


Figura 45. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 9

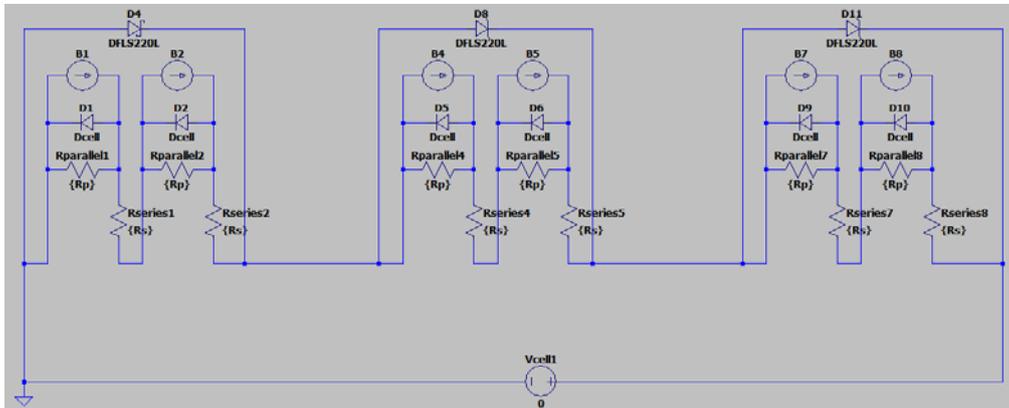
En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,67 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0,6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,66 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 1, 2, 3, 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,51 V y la  $I_{SC} = 0,82 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay 2 células mas sombreadas el resultados es similar al caso nº 4.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

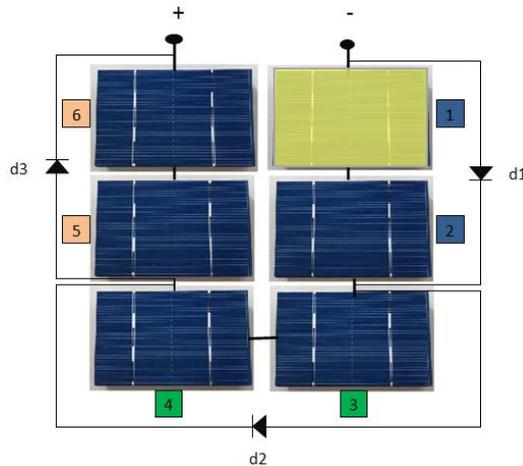
## 1.10-. CASO Nº 10

El decimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 10

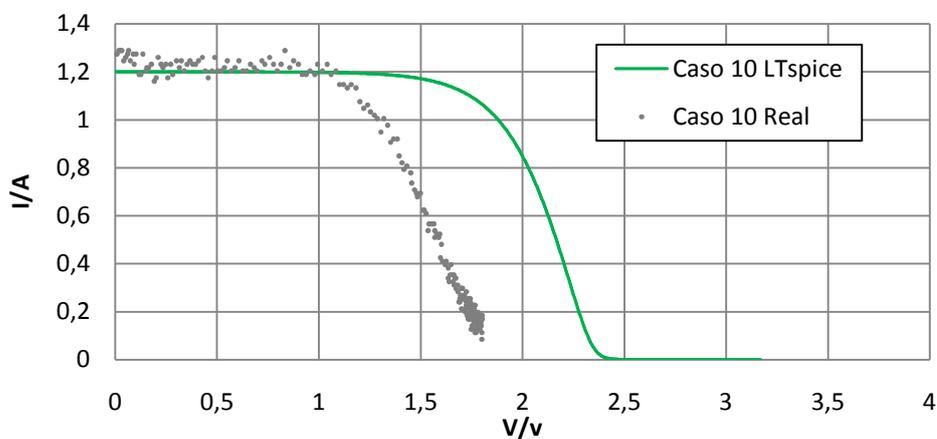


Figura 46. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 10

### Curva P-V Caso N° 10

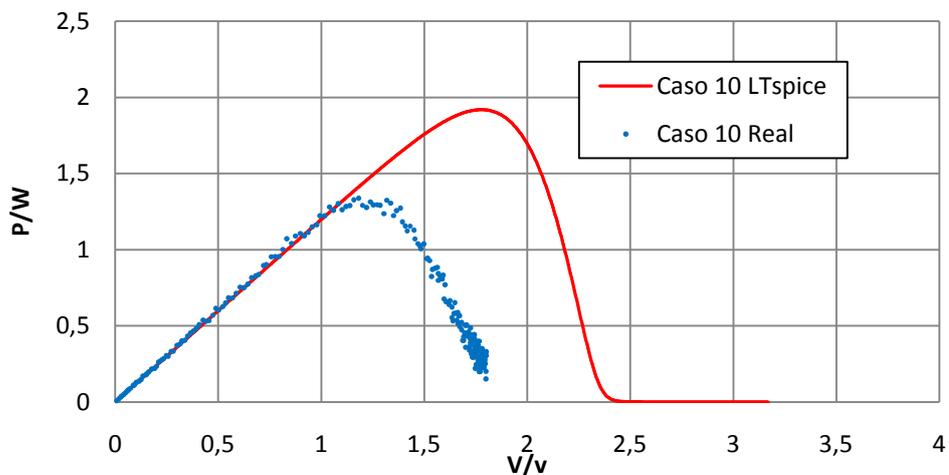


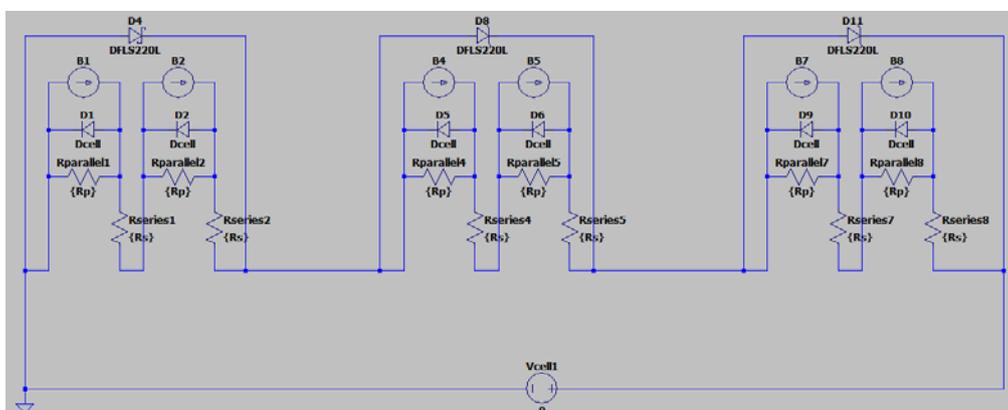
Figura 47. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 10

En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,92 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 2,51 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 1,82 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

#### 1.11-. CASO N° 11

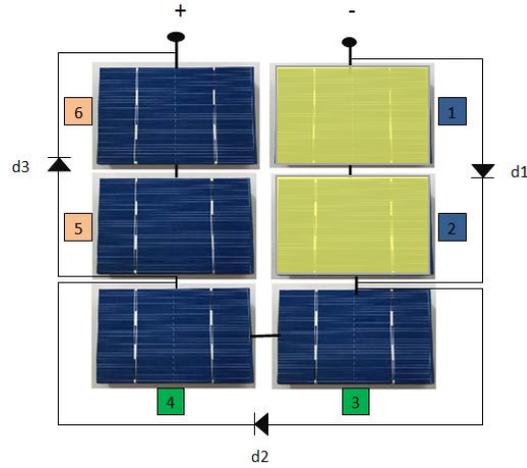
El undécimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1 y 2 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº 11

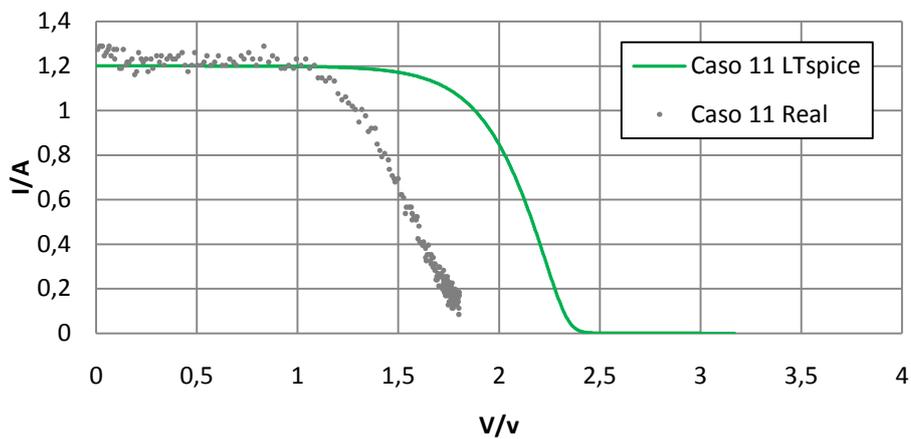


Figura 48. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 11

## Curva P-V Caso Nº 11

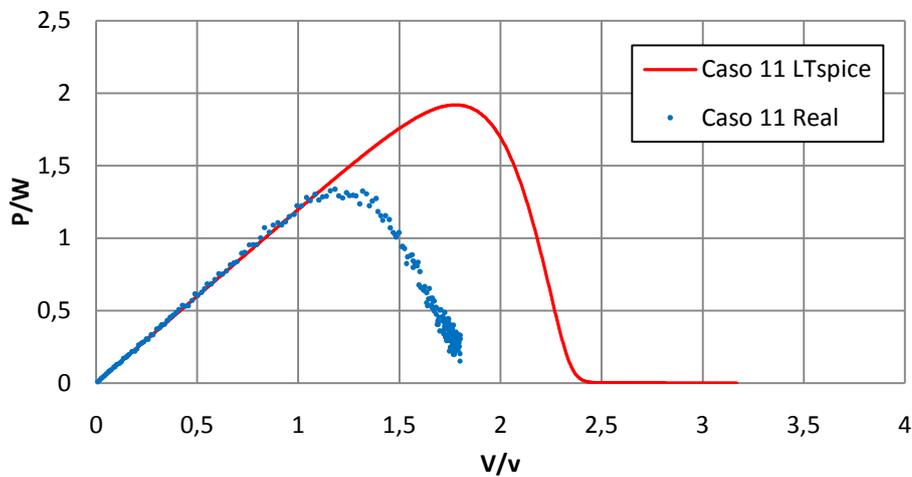


Figura 49. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 11

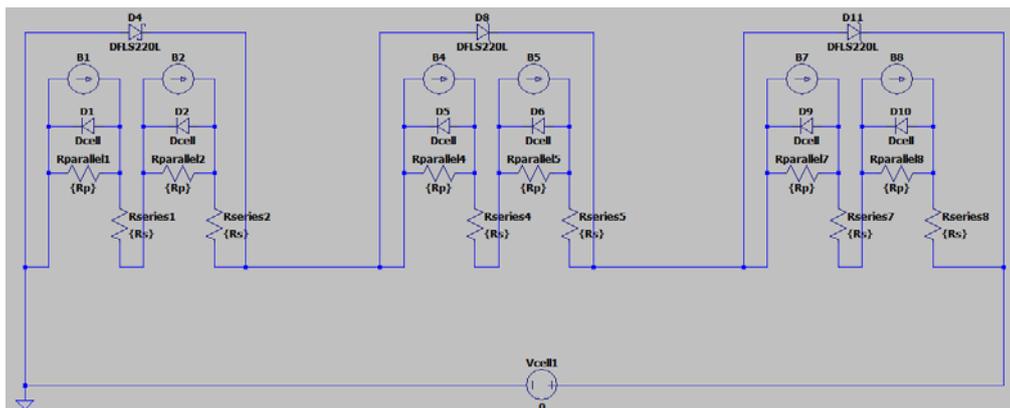
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las graficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,92 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 2,51 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1 y 2 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 1,82 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay una célula mas sombreadas el resultados es idéntico al caso nº 10, ya que sobre esas células actúa el mismo diodo de bypass.

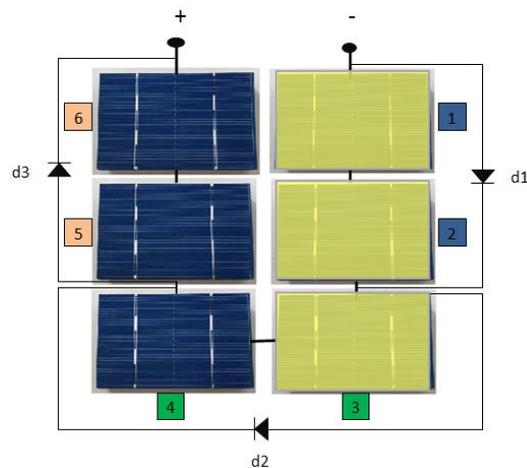
### 1.12-. CASO Nº 12

El duodécimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula, 2 y 3 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 12

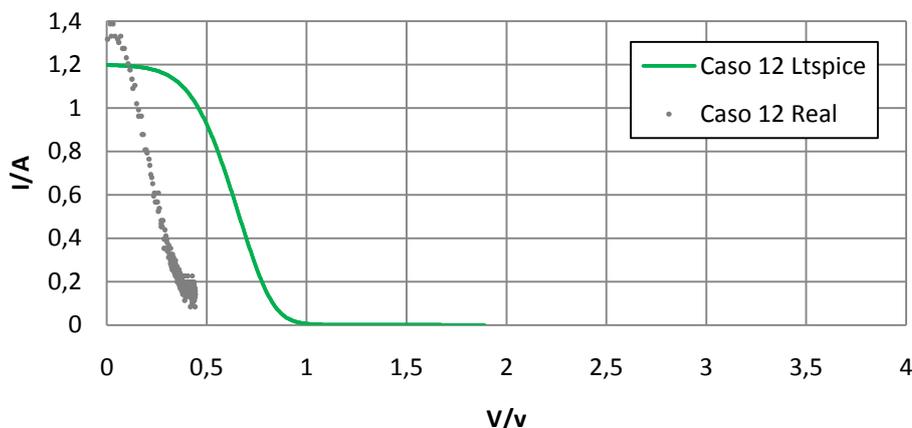


Figura 50. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 12

### Curva P-V Caso Nº 12

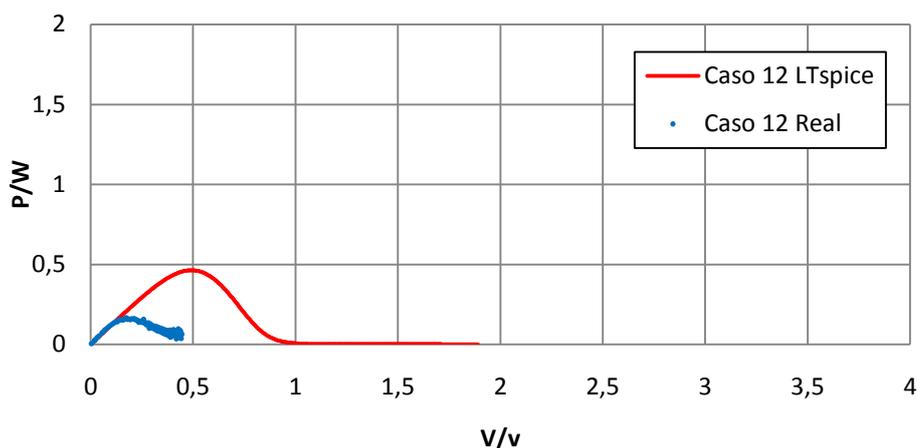


Figura 51. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 12

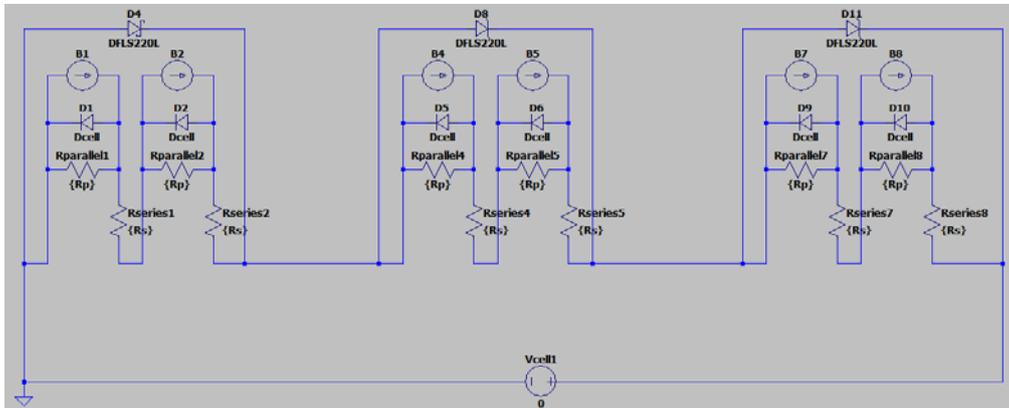
En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,462 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 1,11 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2 y 3 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0,48 V y la  $I_{SC} = 1,42 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

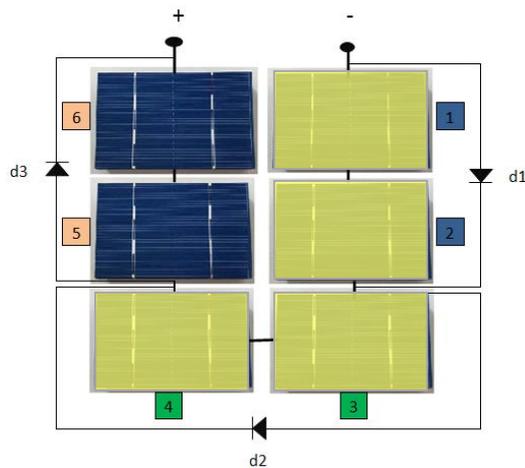
## 1.13-. CASO Nº 13

El decimotercer caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 2, 3 y 4 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 13

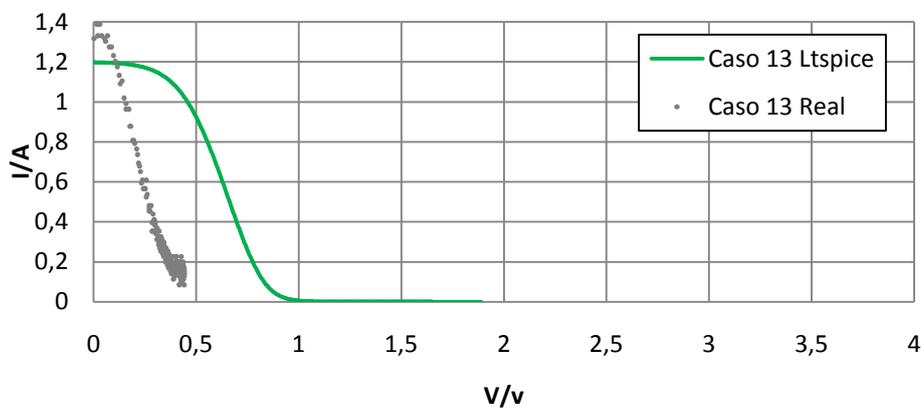


Figura 52. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 13

### Curva P-V Caso N° 13

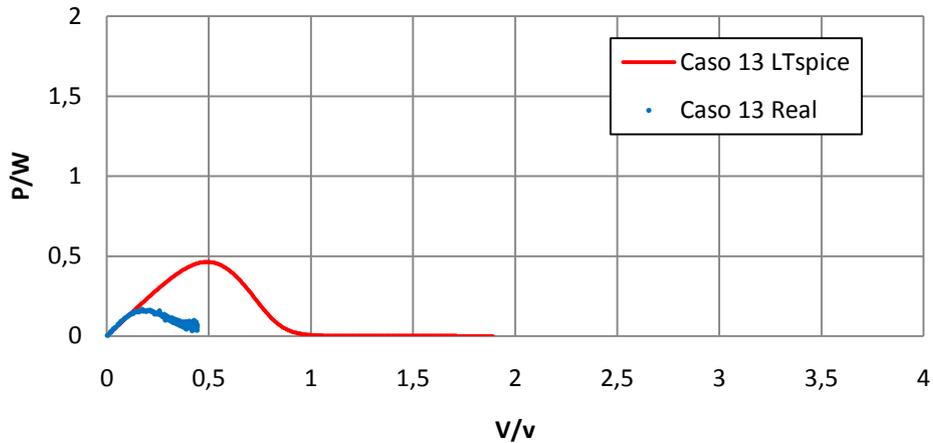


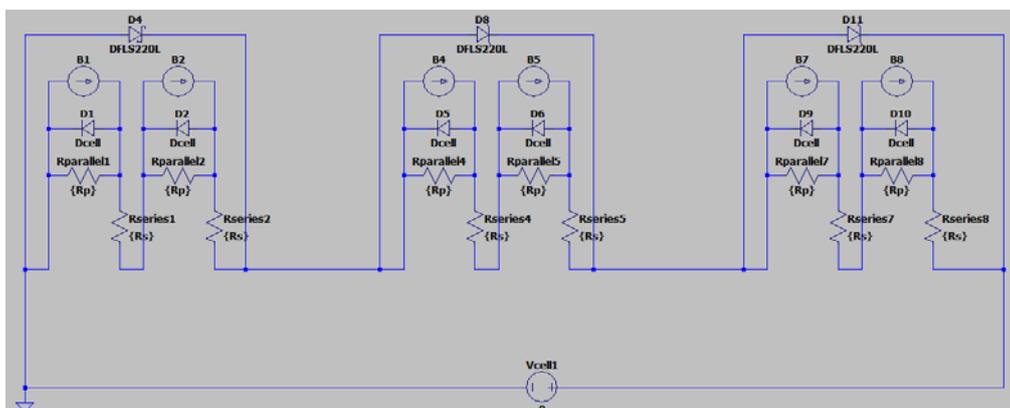
Figura 53. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 13

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,462 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 1,11 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2 y 3 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0,48 V y la  $I_{SC} = 1,42 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. En este caso aunque hay una célula mas sombreadas el resultados es idéntico al caso n° 12, ya que sobre las células sombreadas actúa el mismo diodo de bypass.

#### 1.14-. CASO N° 14

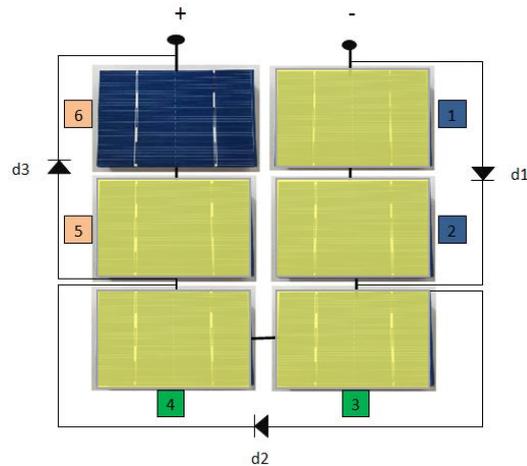
El decimocuarto caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 2, 3, 4 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico:



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº 14

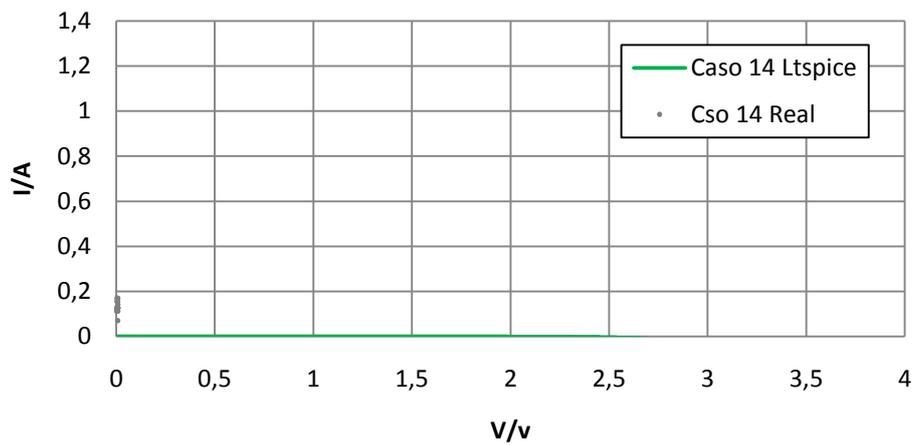


Figura 54. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 14

## Curva P-V Caso Nº 14

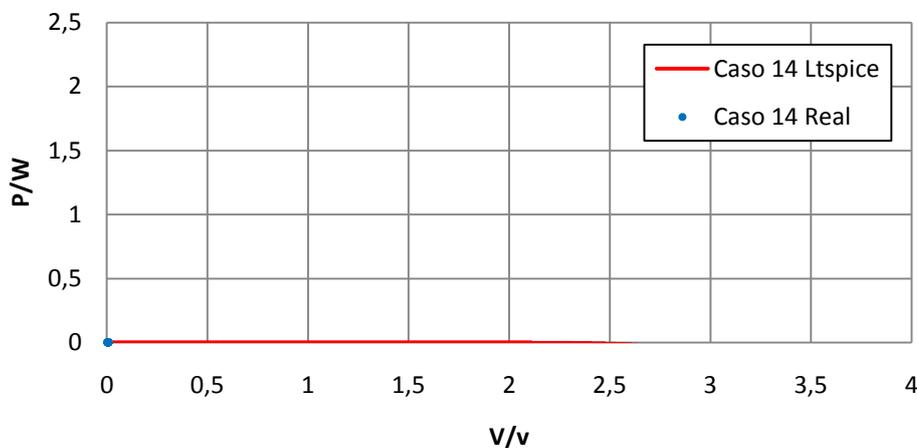


Figura 55. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 14

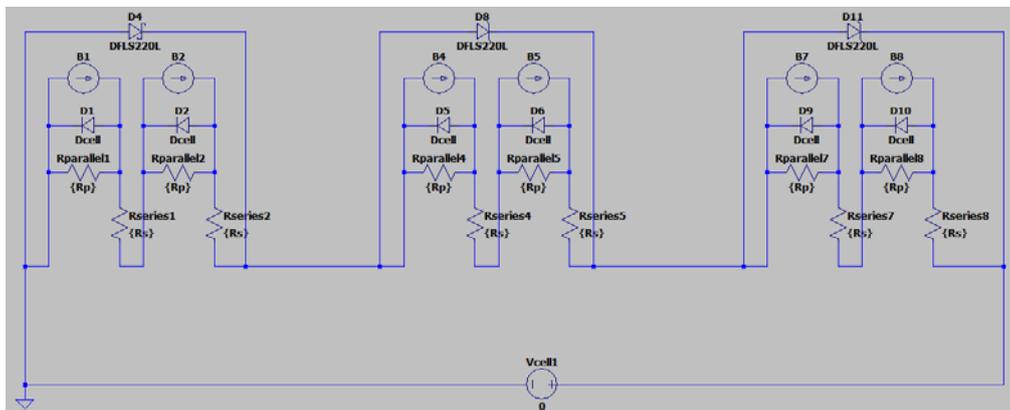
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0 W, la intensidad de cortocircuito del panel es 0 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 0 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2, 3, 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0 V y la  $I_{SC} = 0,14$  A, esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito.

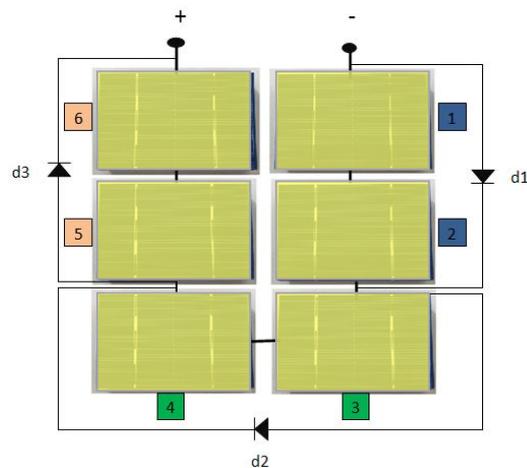
### 1.15-. CASO Nº 15

El decimoquinto caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 2, 3, 4, 5 y 6 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 15

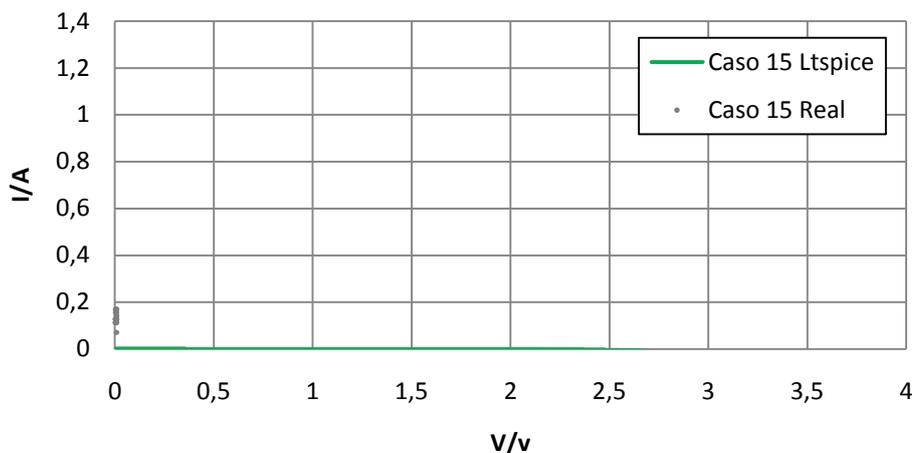


Figura 56. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 15

### Curva P-V Caso Nº15

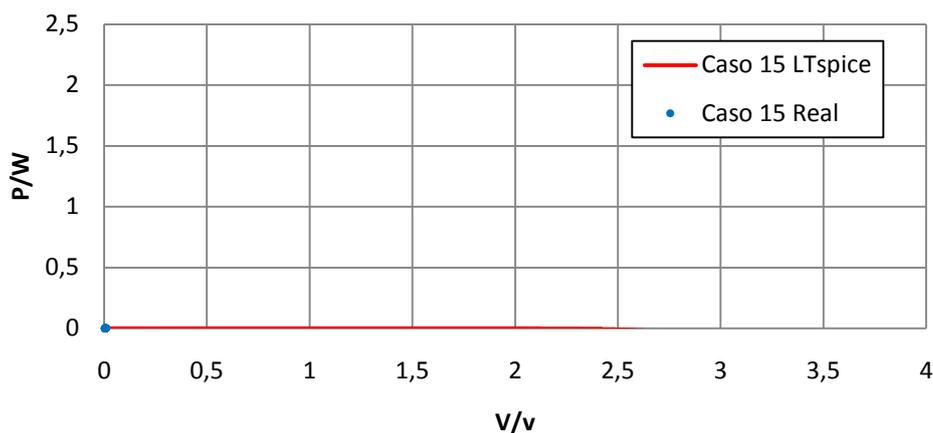


Figura 57. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 15

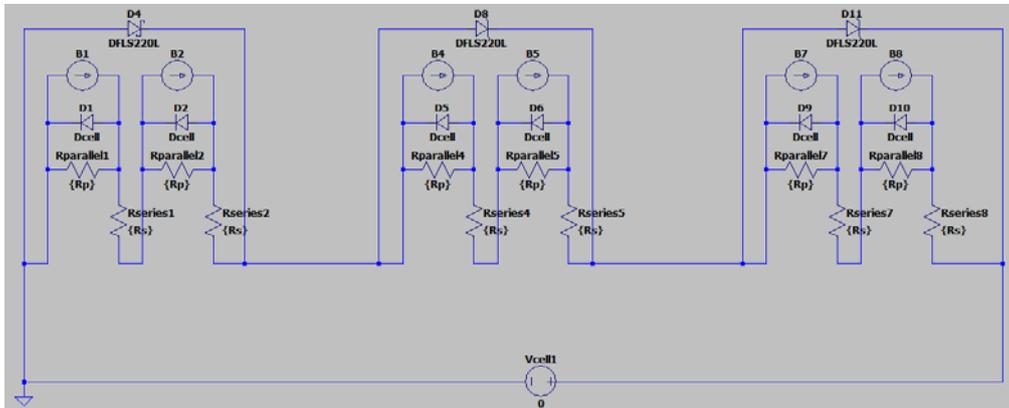
En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0 W, la intensidad de cortocircuito del panel es 0 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 0 V. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2, 3, 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0 V y la  $I_{SC} = 0,14 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito. En este caso aunque hay una célula mas sombreadas el resultados es idéntico al caso nº 14, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismo diodos de bypass.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

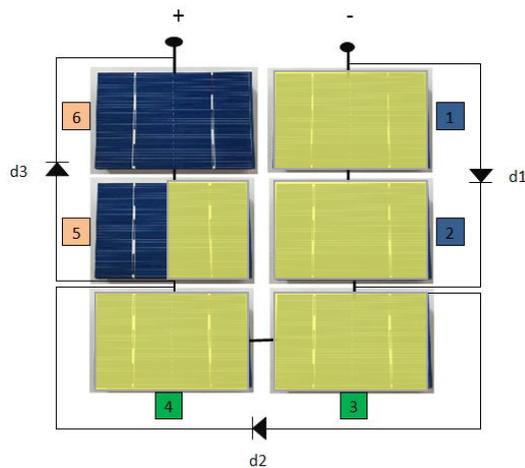
## 1.16-. CASO Nº 16

El decimosexto caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 2, 3 y 4 sombreada y el 50% de la célula 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 16

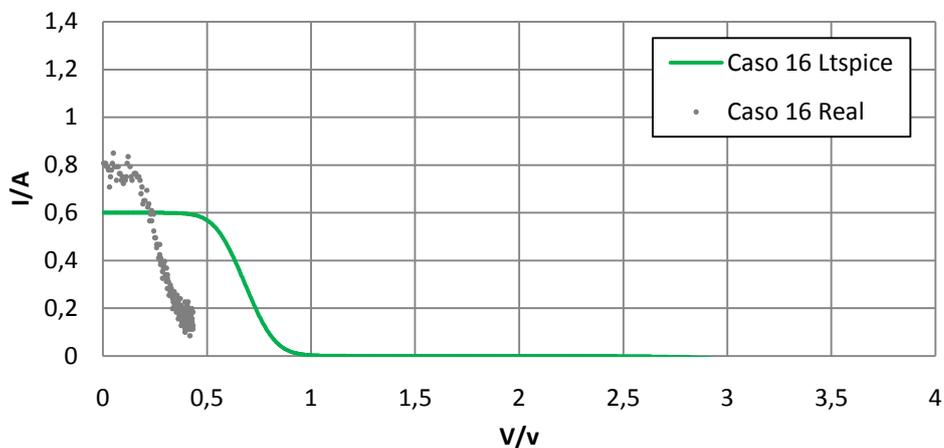


Figura 58. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 16

### Curva P-V Caso N° 16

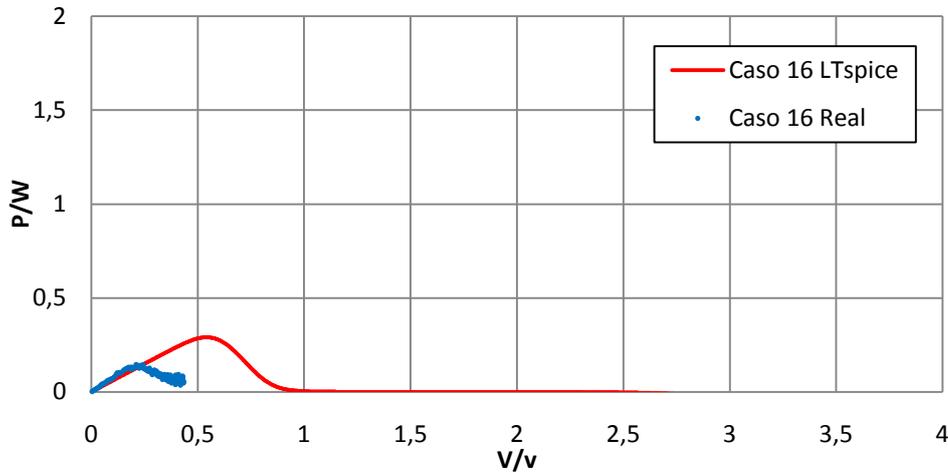


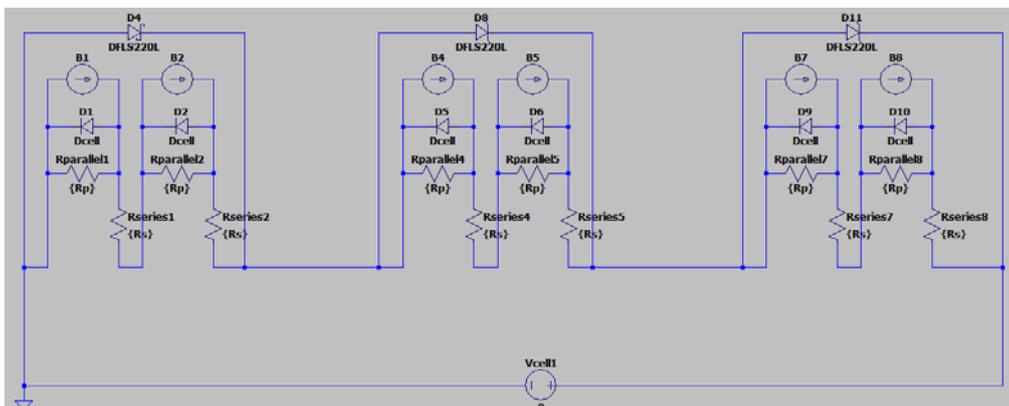
Figura 59. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 16

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,29 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0,6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 1,06 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2, 3 y 4 y el 50% sobre la célula 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0,47 V y la  $I_{SC} = 0,83 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. El resultado de este caso es idéntico al caso n° 17, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismos diodos de bypass.

#### 1.17-. CASO N° 17

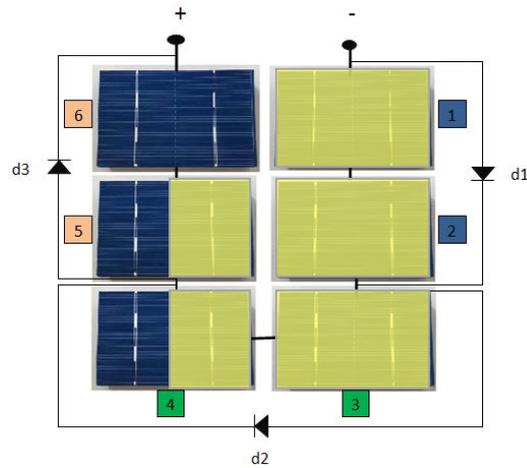
El decimoséptimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 2 y 3 sombreada y el 50% de la célula 4 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº 17

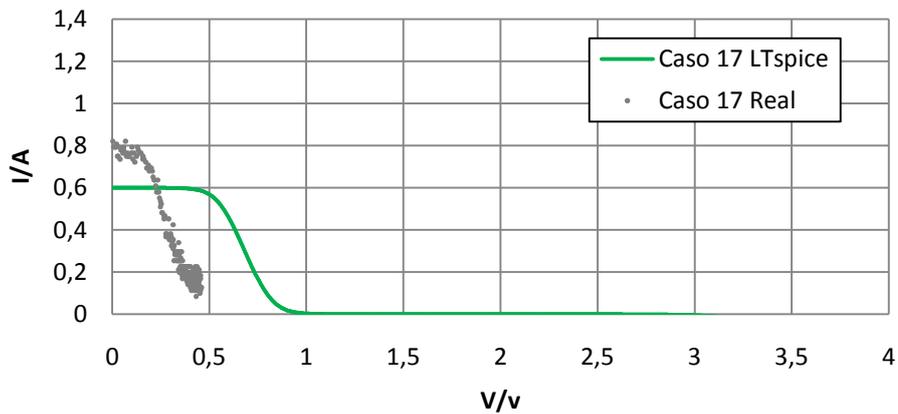


Figura 60. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 17

## Curva P-V Caso Nº 17

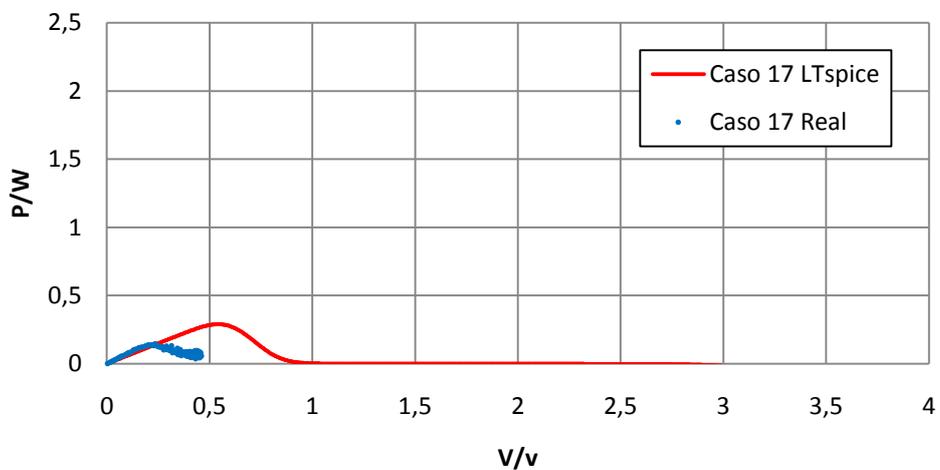


Figura 61. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 17

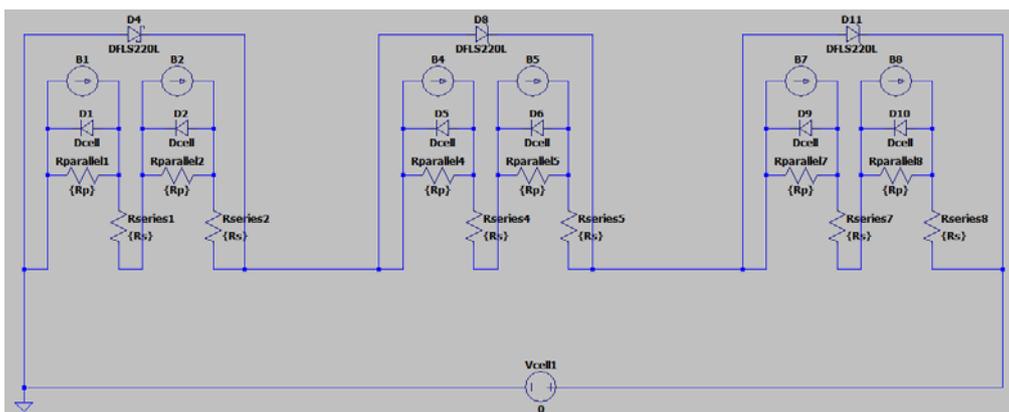
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,29 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0,6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 1,06 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 2 y 3 y el 50% sobre la célula 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0,48 V y la  $I_{SC} = 0,82 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. El resultado de este caso es idéntico al caso nº 16, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismos diodos de bypass.

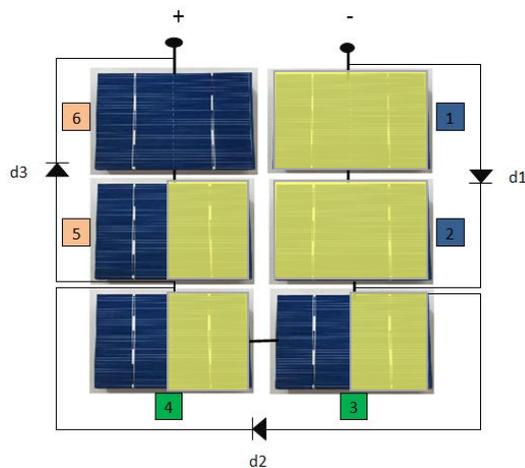
### 1.18-. CASO Nº 18

El decimoctavo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1 y 2 sombreada y el 50% de la célula 3, 4 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 18

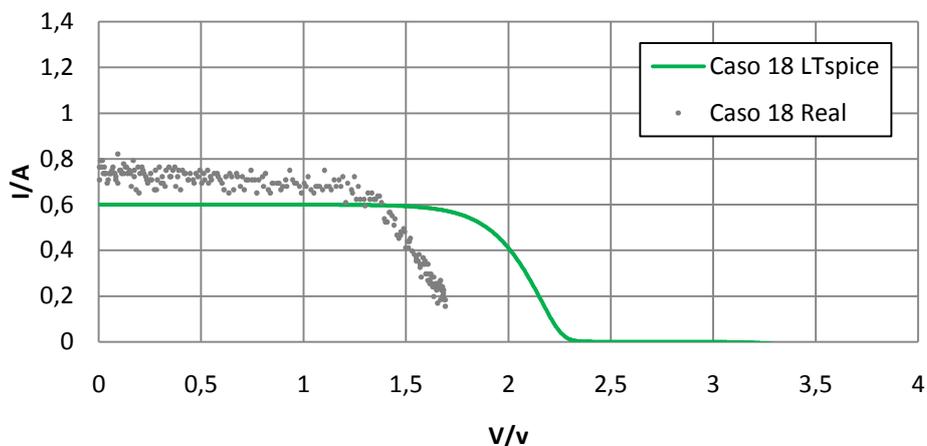


Figura 62. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 18

### Curva P-V Caso Nº 18

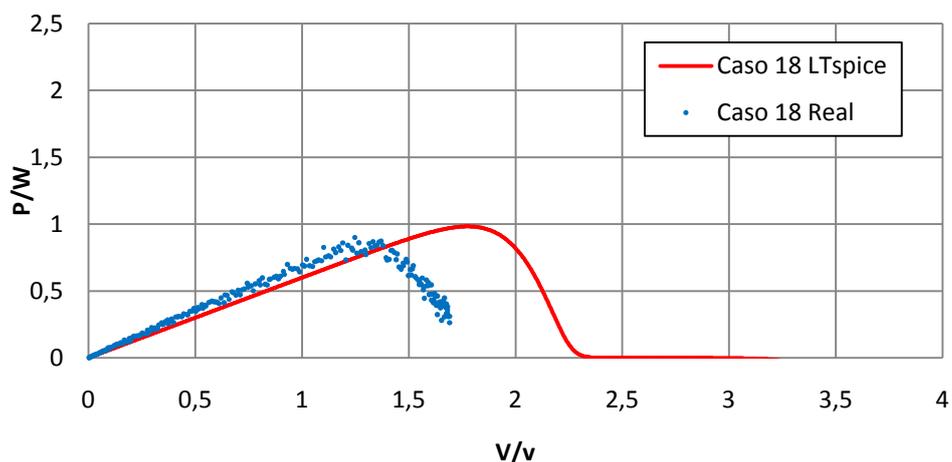


Figura 63. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 18

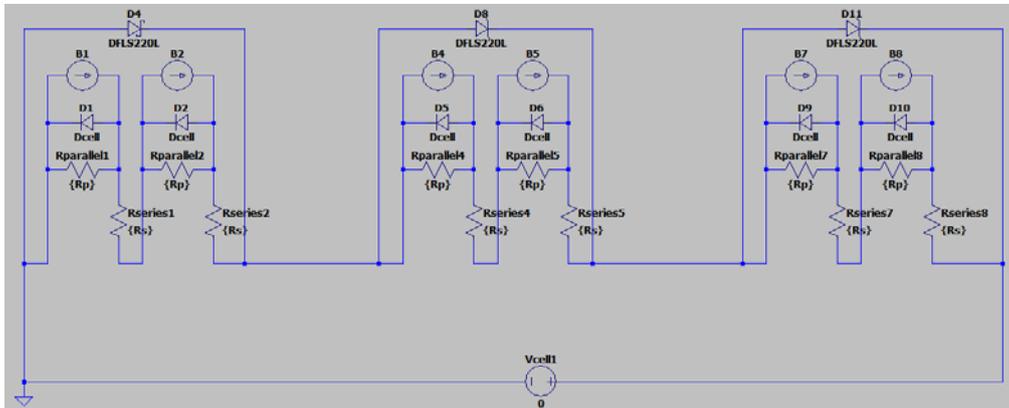
En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,98 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0,6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 2,46 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1 y 2 y el 50% sobre la célula 3, 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 1,74 V y la  $I_{SC} = 0,81 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. El resultado de este caso es idéntico al caso nº 19, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismos diodos de bypass.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

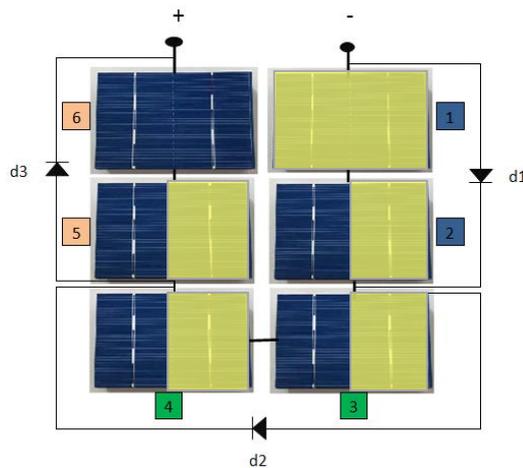
## 1.19-. CASO Nº 19

El decimonoveno caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1 sombreada y el 50% de la célula 2, 3, 4 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 19

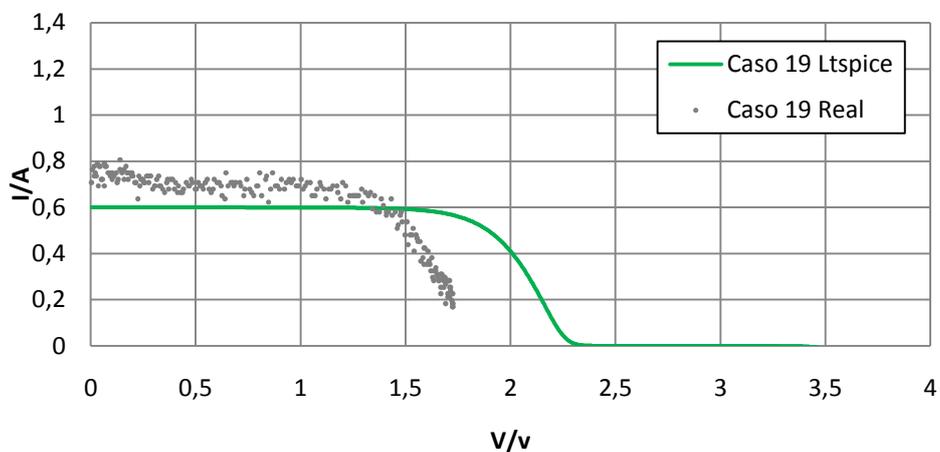


Figura 64. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 19

### Curva P-V Caso N° 19

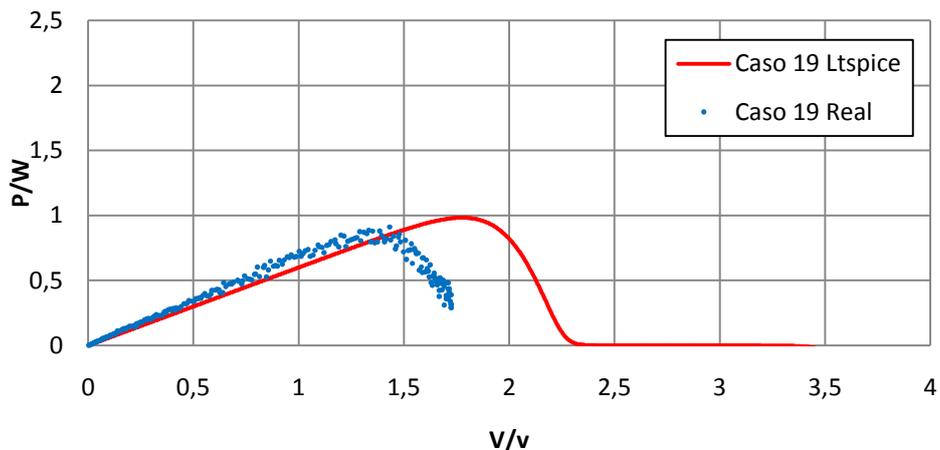


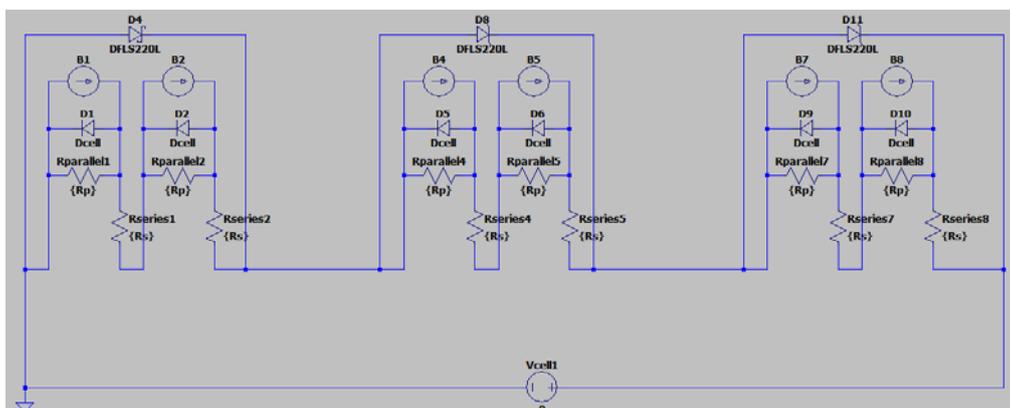
Figura 65. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 19

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0,98 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0,6 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 2,42 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1 y el 50% sobre la célula 2, 3, 4 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 1,76 V y la  $I_{SC} = 0,83 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. El resultado de este caso es idéntico al caso n° 18, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismos diodos de bypass.

#### 1.20-. CASO N° 20

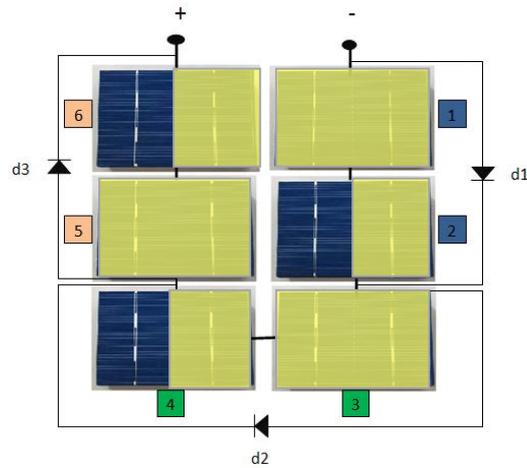
El vigésimo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 3 y 5 sombreada y el 50% de la célula 2, 4 y 6 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V caso N° 20

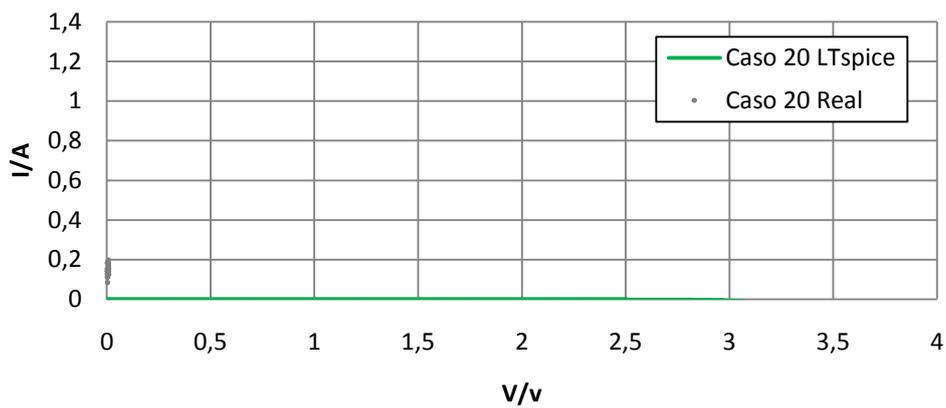


Figura 66. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso N° 20

## Curva P-V Caso N° 20

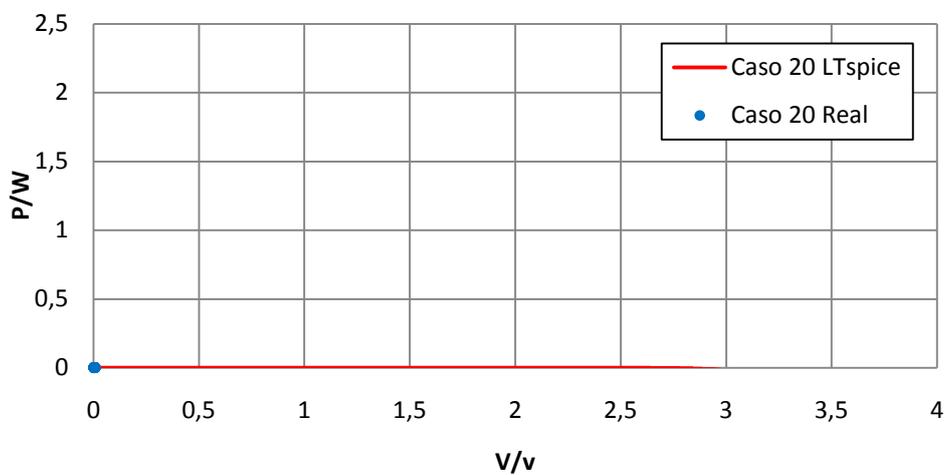


Figura 67. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 20

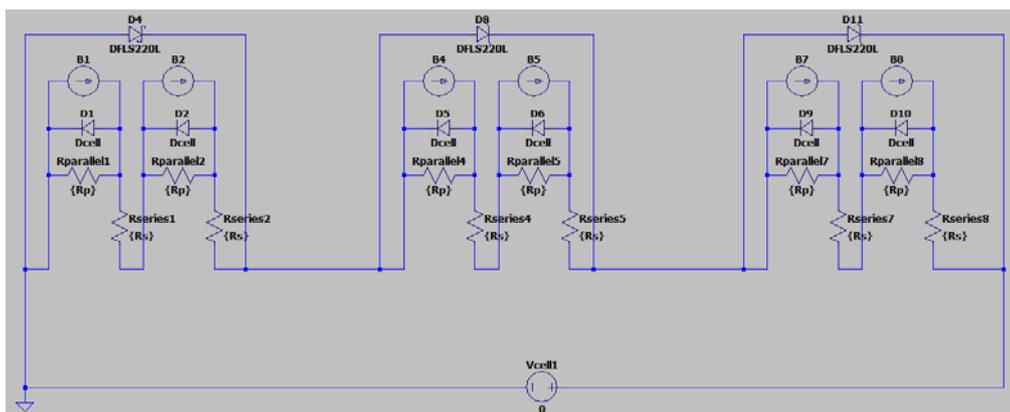
## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 0 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 0 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 3 y 5, el 50% sobre la célula 2, 4 y 6 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0,03 V y la  $I_{SC} = 0,18 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. El resultado de este caso es idéntico al caso nº 14, 15 y 23 ya que sobre las células sombreadas actúan los mismos diodos de bypass.

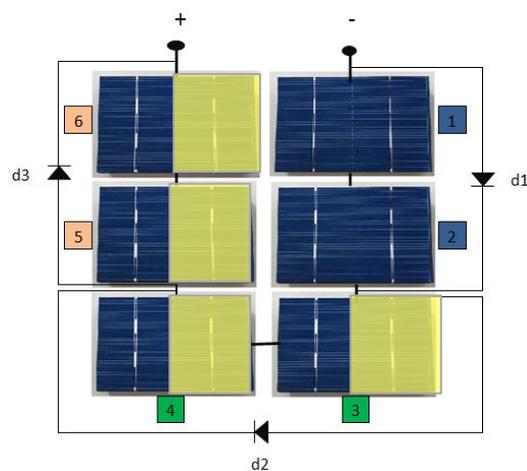
### 1.21-. CASO Nº 21

El vigesimoprimer caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 3, 4, 5 y 6 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 21

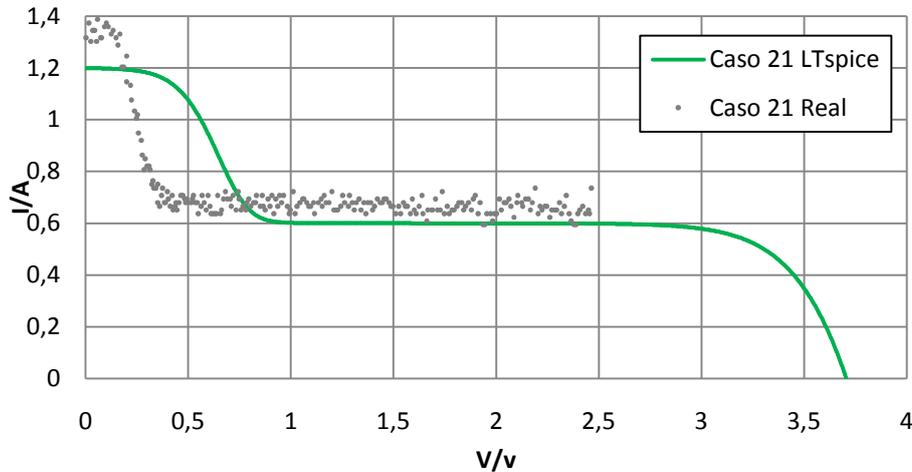


Figura 68. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 21

### Curva P-V Caso Nº 21

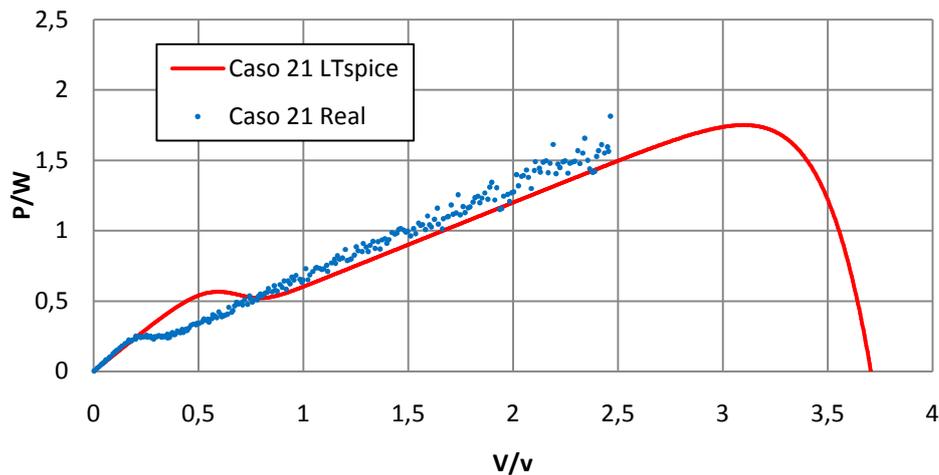


Figura 69. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 21

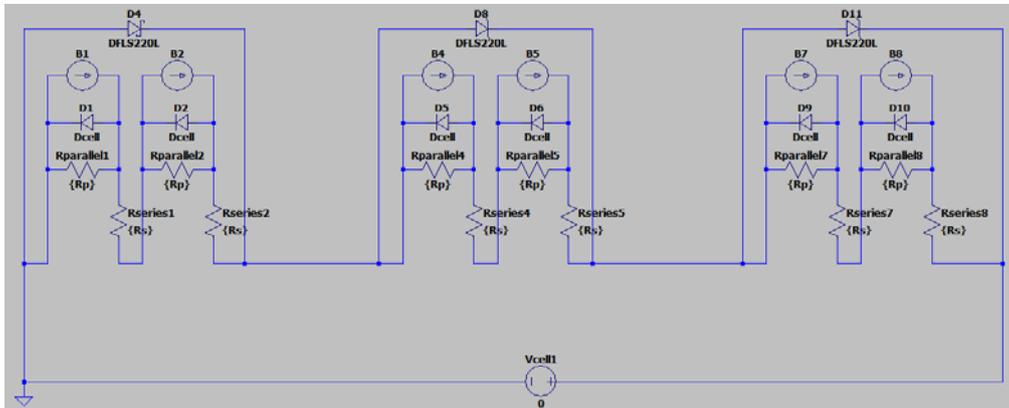
En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,76 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,74 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 3, 4, 5 y 6 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 2,51 V y la  $I_{SC} = 1,38 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación.

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

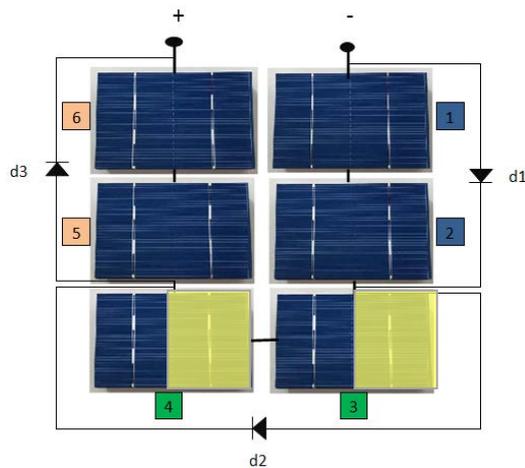
## 1.22-. CASO Nº 22

El vigesimosegundo caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 50% de la célula 3 y 4 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

### Curva I-V Caso Nº 22

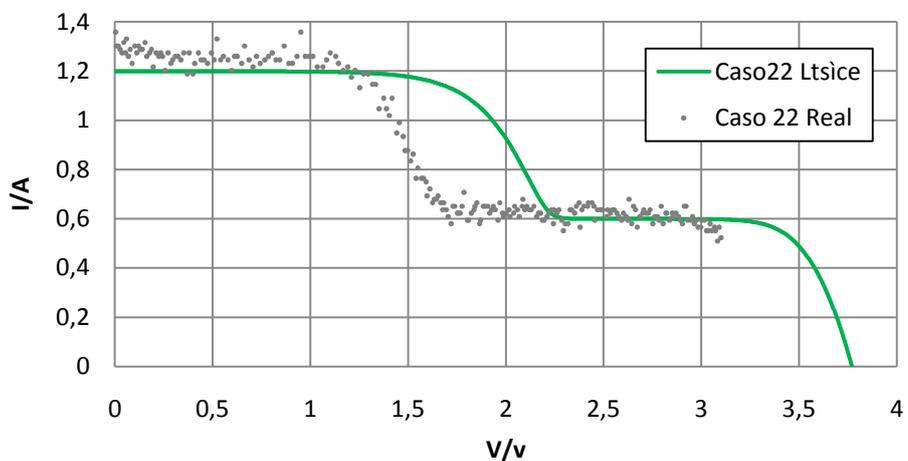


Figura 70. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 22

### Curva P-V Caso N° 22

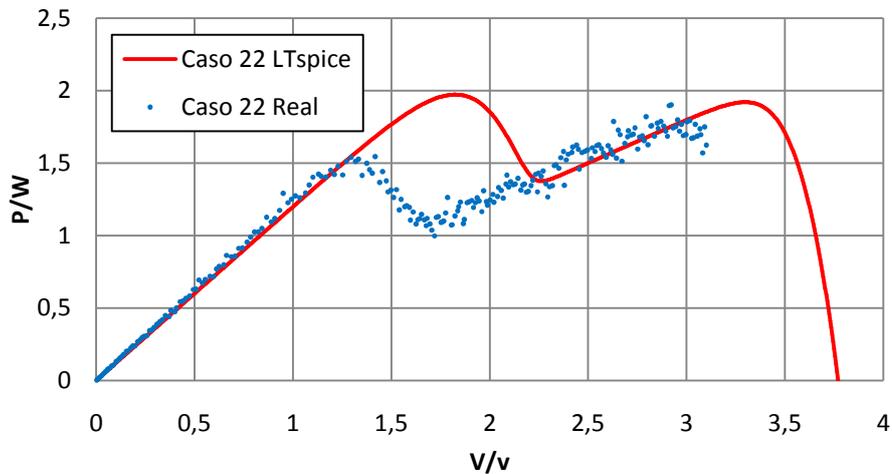


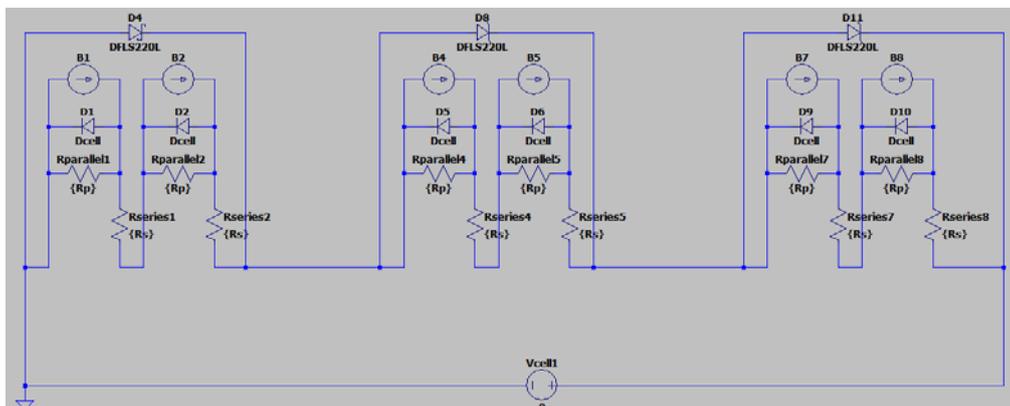
Figura 71. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso N° 22

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 1,97 W, la intensidad de cortocircuito del panel es de 1,2 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 3,74 v. En este caso se produce una sombra del 50% sobre la célula 3 y 4 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 3,24 V y la  $I_{SC} = 1,32 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito y un descenso de la tensión de cortocircuito con respecto a la simulación. Este caso es similar al caso n° 2 y 6.

#### 1.23-. CASO N° 23

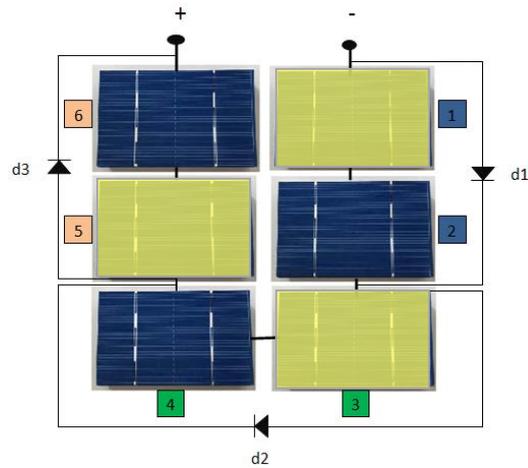
El vigesimotercer caso que se va a realizar es el del módulo fotovoltaico con el 100% de la célula 1, 3 y 5 sombreada.

Módulo utilizado para realizar la simulación.



# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

Esquema módulo fotovoltaico



Como resultado obtenemos las siguientes curvas para analizar:

## Curva I-V Caso Nº 23

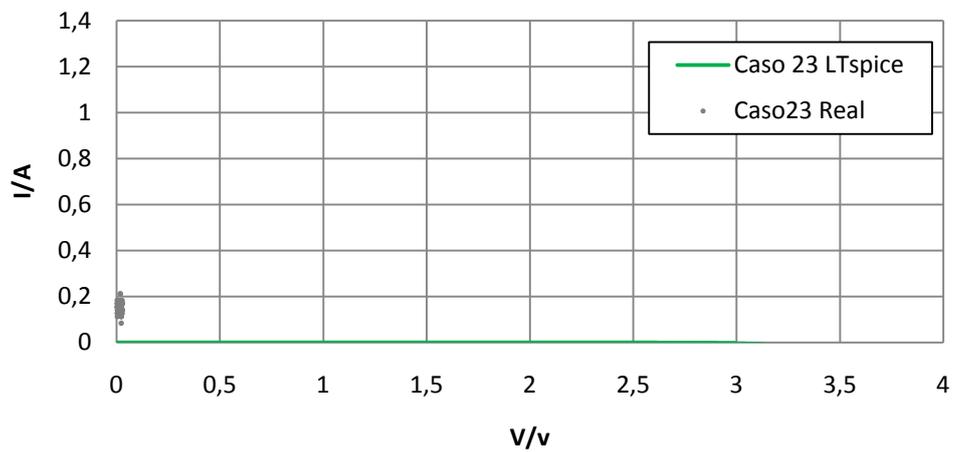


Figura 72. Gráfica curva I-V módulo fotovoltaico caso Nº 23

## Curva P-V Caso Nº 23

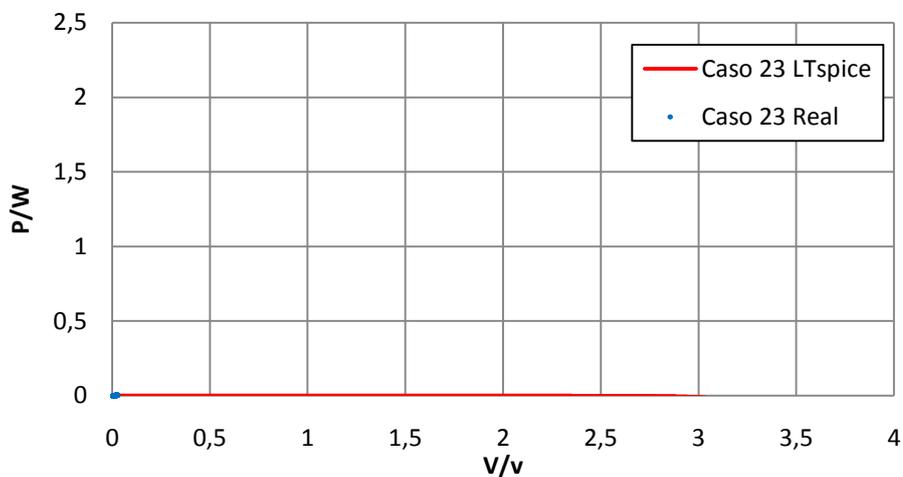


Figura 73. Gráfica curva P-V módulo fotovoltaico caso Nº 23

## CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE LOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON DEFECTOS

En las gráficas anteriores se observa que el panel formado por 6 células está produciendo 0 W, la intensidad de cortocircuito del panel es 0 A, la tensión de cortocircuito del panel es de 0 v. En este caso se produce una sombra del 100% sobre la célula 1, 3 y 5 del módulo fotovoltaico. También se observa que existe un desfase de las medidas reales con respecto a las simuladas, en las medidas reales la tensión de cortocircuito es de 0 V y la  $I_{SC} = 0,17 A$ , esto se debe a que en condiciones reales es difícil mantener constante la irradiación, el equipo de medida no logra captar un mayor número de puntos, ante pequeños defectos de las células y sus conexiones, ya que siempre existe una pequeña variación en la fabricación de las células. Por lo que a partir de estos datos podemos observar un incremento de la corriente de cortocircuito. En este caso el resultados es idéntico al caso nº 14, 15 y 20, ya que sobre las células sombreadas actúan los mismo diodos de bypass.