

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

## TRABAJO FIN DE GRADO

# ***DETECCIÓN DE DEFECTOS ELÉCTRICOS EN CÉLULAS SOLARES EMBEBIDAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS***

**Alumno/Alumna:** Díaz de Corcuera, Urretavizcaya, Izaskun

**Director:** Jimeno, Cuesta, Juan Carlos

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Lunes, 6 de Julio de 2020



## RESUMEN

En la industria fotovoltaica, las células solares son el principal componente para la fabricación de paneles solares, en conexión serie y/o en paralelo, para integrar el módulo fotovoltaico completo. Las células solares pueden presentar defectos característicos, tales como micro grietas, dedos rotos, contactos defectuosos entre células, células con fisuras o células rotas, los cuales no son perceptibles a simple vista. El objetivo de este proyecto se basa en encontrar la causa de los defectos de una célula en un módulo fotovoltaico a través de un simple nuevo método de caracterización. Se obtendrán y verificarán metodologías para la extracción de las características eléctricas de células solares que están incluidas en módulos solares, teniendo sólo accesibles los dos terminales eléctricos del módulo. En este proyecto se consigue una potente y eficaz herramienta enfocada al sector de mantenimiento de módulos fotovoltaicos.

**Palabras clave:** industria fotovoltaica, células solares, módulos fotovoltaicos, defectos, causas, metodologías, herramienta, mantenimiento

## LABURPENA

Industria fotovoltaikoan, eguzki-zelulak seriean edo / eta paraleloan, eguzki-panelak fabrikatzeko erabiltzen dira. Eguzki zelulek akats bereizgarriak izan ditzakete, hala nola mikro pitzadurak, hatz hautsiak, zelulen arteko kontaktu akastunak edo zelula hondatuak, begi hutsean ikusgai ez daudenak. Proiektu honen helburua, modulu fotovoltaiko zelula baten akatsak aurkitzean oinarritzen da, karakterizazio metodo berri soil baten bidez. Gainera, eguzki-moduluen barne dauden eguzki-zelulen ezaugarri elektrikoak erauzteko metodologiak lortu eta egiaztatu egingo dira. Proiektu honen bidez, modulu fotovoltaikoen mantentze-sektorea bideratutako tresna indartsu eta eraginkor bat lortuko da.

## ABSTRACT

In the photovoltaic industry, solar cells are the main component for the manufacturing of solar panels, in series and / or parallel connection, to integrate the complete photovoltaic module. Solar cells can have characteristic defects, such as micro cracks, broken fingers, defective contacts between cells, cells with fissures or broken cells, which are not noticeable to the naked eye. The objective of this project is based on finding the cause of the defects of a cell in a photovoltaic module through a simple new characterization method. Methodologies will be obtained and verified to extract the electrical characteristics of solar cells that are included in solar modules with only the two electrical terminals of the module being accessible. This project achieves a powerful and efficient tool focused on the photovoltaic module maintenance sector.

## TABLA DE CONTENIDO

---

RESUMEN .....	3
1.-INTRODUCCIÓN .....	9
2.- CONTEXTO .....	10
<b>2.1.-HISTORIA DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.-FUNCIONAMIENTO FISICO DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.- ESTRUCTURA DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>13</b>
2.3.1.-ESTRUCTURA FÍSICA DE LA CÉLULA SOLAR.....	13
2.3.2.- FABRICACIÓN DE LA CÉLULA SOLAR.....	14
2.3.3.- MÓDULOS .....	15
<b>2.4.-APLICACIONES.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.-MERCADO .....</b>	<b>17</b>
2.5.1.- COSTES DE LAS CÉLULAS .....	18
2.5.2.- CÉLULAS COMERCIALES Y DE LABORATORIO.....	19
3.- OBJETIVO .....	20
<b>3.1.-OBJETIVO PRINCIPAL .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2.-OBJETIVOS SECUNDARIOS .....</b>	<b>20</b>
4.- BENEFICIOS .....	22
<b>4.1.-BENEFICIOS ECONÓMICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.-BENEFICIOS SOCIALES.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3.-BENEFICIOS TÉCNICOS.....</b>	<b>23</b>
5.- ESTADO DEL ARTE .....	24
<b>5.1.-LUZ INFRARROJA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2.-CÁMARAS MATRICIALES DE ALTA RESOLUCIÓN.....</b>	<b>24</b>
<b>5.3.-CÁMARAS TÉRMICAS.....</b>	<b>25</b>
<b>5.4.- ELECTROLUMINISCENCIA.....</b>	<b>26</b>
6.-ESTUDIO DE LOS DEFECTOS DE UNA CÉLULA SOLAR.....	27
<b>6.1.-CARACTERÍSTICAS (I-V), (P-V) Y SUS PARÁMETROS FUNDAMENTALES .....</b>	<b>27</b>
<b>6.2.- COMPONENTES DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>28</b>
<b>6.3.-TIPOS DE DEFECTOS.....</b>	<b>30</b>
<b>6.4.-ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS VALORES DE LOS COMPONENTES .....</b>	<b>31</b>

7.-ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	39
<b>7.1.- ELECTROLUMINISCENCIA.....</b>	<b>39</b>
<b>7.2.-TERMOGRAFÍA.....</b>	<b>39</b>
<b>7.3.-CURVAS I-V.....</b>	<b>41</b>
7.3.1.-MODELO FÍSICO.....	41
7.3.2.-MODELO DE OPERACIÓN DE MÓDULOS.....	42
7.3.3.-MODELO 9 PARÁMETROS.....	44
<b>7.4.- ELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....</b>	<b>47</b>
8.-RESULTADOS.....	49
<b>8.1.- RECOMPONER CURVAS I-V.....</b>	<b>49</b>
<b>8.2.- CURVA I-V DE LA CÉLULA DEFECTUOSA MEDIANTE LTSPICE.....</b>	<b>55</b>
9.-METODOLOGÍA.....	62
<b>9.1.-GRUPO DE TRABAJO.....</b>	<b>62</b>
<b>9.2.- RECURSOS.....</b>	<b>62</b>
<b>9.3.-FASES DEL PROYECTO.....</b>	<b>63</b>
9.3.1.- DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	63
9.3.2.- ESTUDIO INICIAL.....	63
9.3.3.- DESARROLLO Y DISEÑO.....	63
9.3.4.- PRUEBAS Y RESULTADOS.....	64
9.3.5.- DOCUMENTACIÓN.....	64
9.3.6.- WBS.....	64
<b>9.4.-PLANIFICACIÓN.....</b>	<b>65</b>
10.- PRESUPUESTO.....	67
<b>10.1.-HORAS INTERNAS.....</b>	<b>67</b>
<b>10.2.-AMORTIZACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>10.3.-GASTOS.....</b>	<b>68</b>
<b>10.4.-COSTE TOTAL.....</b>	<b>68</b>
11.-ANÁLISIS DE RIESGOS.....	69
<b>11.1.-ERRORES EN EL DESARROLLO MATEMÁTICO (A).....</b>	<b>69</b>
<b>11.2.-SUPERACIÓN FECHA LÍMITE (B).....</b>	<b>69</b>
<b>11.3.-PERDIDA DE DATOS (C).....</b>	<b>70</b>
<b>11.4.-REQUERIMIENTOS INCOMPLETOS (D).....</b>	<b>70</b>

<b>11.5.-MATRIZ PROBABILIDAD-IMPACTO .....</b>	<b>71</b>
12.-CONCLUSIONES .....	72
13.-REFERENCIAS .....	73

## LISTA DE ILUSTRACIONES

---

Ilustracion 1: Descripción del efecto fotovoltaico.....	12
Ilustracion 2: Región P N y diferencia de potencial.....	13
Ilustracion 3: Estructura de una célula solar .....	14
Ilustracion 4: Silicio monocristalino y policristalino .....	14
Ilustracion 5: Estructura de modelo fotovoltaico.....	16
Ilustracion 6: Estado de la distribución de mercado 2017 .....	18
Ilustracion 7: Evolución de la eficiencia en los últimos 25 años .....	19
Ilustracion 8: Sensor de luz infrarroja para la detección de fallos.....	24
Ilustracion 9: Cámaras matriciales de alta resolución para detectar burbujas .....	25
Ilustracion 10: Cámaras térmicas para detectar fallos en el módulo .....	25
Ilustracion 11: Electroluminiscencia.....	26
Ilustracion 12: Curva I-V y curva P-V .....	27
Ilustracion 13: Modelo un diodo y dos diodos con Ltspice .....	29
Ilustracion 14: Curva IV al varias JL .....	32
Ilustracion 15: Curva PV al variar JL .....	32
Ilustracion 16: Curva IV al variar J01 .....	33
Ilustracion 17: Curva PV al varias J01 .....	34
Ilustracion 18: Curva IV al variar Rsh .....	35
Ilustracion 19: Curva PV al variar Rsh .....	35
Ilustracion 20: Curva IV al variar Rs.....	36
Ilustracion 21: Curva PV al variar Rs .....	36
Ilustracion 22: Curva IV al variar la temperatura .....	37
Ilustracion 23: Curva PV al variar la temperatura .....	38
Ilustracion 24: Paneles solares que presentan puntos calientes .....	40
Ilustracion 25: Ejemplo de especificaciones de un fabricante Jingo .....	43
Ilustracion 26: Curva I-V con modelo de operación y variación de temperatura .....	43

Ilustracion 27: Curva I-V con modelo de operación y variación de iluminación .....	44
Ilustracion 28: Modelo detallado 7 puntos de modelo 9 parámetros .....	45
Ilustracion 29: Curva I-V de Jinco que se va a recomponer.....	49
Ilustracion 30: Primera parte de la curva.....	50
Ilustracion 31: Tercera parte de la curva.....	51
Ilustracion 32: Parte parabólica de la curva.....	52
Ilustracion 33: Curva recompuesta con $\Delta\alpha= 0.05$ .....	52
Ilustracion 34: Curva recompuesta con $\Delta\alpha= 0.1$ .....	53
Ilustracion 35: Curvas recompuestas con variación de iluminación.....	54
Ilustracion 36: Curvas recompuestas con variación de temperatura .....	54
Ilustracion 37: Circuito del módulo con Ltspice .....	55
Ilustracion 38: Circuitos de las células.....	55
Ilustracion 39: Curvas I-V .....	56
Ilustracion 40: Gráficas para sacar las pendientes .....	57
Ilustracion 41: Célula test con Isat2 mayor .....	58
Ilustracion 42: Gráficas de las células .....	59
Ilustracion 43: Circuito de solo la célula test .....	59
Ilustracion 44: Curvas I-V para sacar las pendientes.....	60
Ilustracion 45: Curvas I-V.....	60
Ilustracion 46: Circuito cortocircuitado .....	61
Ilustracion 47: Descomposición del trabajo (WBS) .....	64
Ilustracion 48: Descripción de las tareas del proyecto .....	65
Ilustracion 49: Diagrama de Gantt.....	66

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1: Condiciones iniciales .....	31
Tabla 2: Cambio a un valor mayor de JL .....	32
Tabla 3: Cambio a un valor menor de JL .....	32
Tabla 4: Cambio a un valor mayor de J01 .....	33
Tabla 5: Cambio a un valor menor de J01 .....	33
Tabla 6: Cambio a un valor mayor de Rsh .....	34
Tabla 7: Cambio a un valor menor de Rsh .....	34
Tabla 8: Cambio a un valor mayor de Rs .....	35
Tabla 9: Cambio a un valor menor de Rs.....	36
Tabla 10: Selección de alternativas .....	48
Tabla 11: Valores de los puntos método 9 parámetros .....	50
Tabla 12: Variación de los parámetros a,b,c según la temperatura y la iluminación .....	54
Tabla 13: Grupo de trabajo .....	62
Tabla 14: Recursos .....	62
Tabla 15: Recursos humanos .....	67
Tabla 16: Amortizaciones .....	67
Tabla 17: Gastos .....	68
Tabla 18: Coste total .....	68
Tabla 19: Matriz Probabilidad-Impacto .....	71

## LISTA DE ACRÓNIMOS:

---

UNSW: Universidad de Nueva Gales del Sur  
PESC: Passivated Emitter, Rear Contact  
PERL: Passivated Emitter, Rear Locally  
PERT: Passivated Emitter, Rear Totally diffused  
EFG: Edge-defined Film Growth  
EVA: Estileno-Vinil-Acetato  
WBS: Work Breakdown Structure

## 1.-INTRODUCCIÓN

---

La energía solar es aquella que se obtiene de la radiación solar que llega a la Tierra en forma de luz, calor o rayos ultravioleta. La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía solar que consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Este tipo de energía, a menudo se la denomina directamente energía fotovoltaica. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las células fotovoltaicas. [1]

La energía solar fotovoltaica tiene ventajas específicas como fuente de energía, como por ejemplo que su funcionamiento no genera contaminación ni emisiones de gases de efecto invernadero y que a diferencia de las centrales térmicas no requiere de la combustión de combustibles fósiles. Además, su dimensionamiento es escalable. Es fácil añadir o quitar módulos según la demanda energética variando la energía fotovoltaica instalada. La producción de energía puede ser a gran escala para el consumo en general o a pequeña escala para consumo en pequeñas viviendas, refugios de montaña o sitios aislados. Actualmente, la tasa mejor de conversión de la luz solar en energía fotovoltaica en los nuevos productos comerciales consigue una eficiencia del módulo solar de alrededor de 21,5%.

La energía fotovoltaica es la tercera fuente de energía renovable en términos de capacidad global. En los últimos años la capacidad fotovoltaica instalada en todo el mundo aumentó a más de 580 gigavatios (GW) y esta va en aumento. El problema llega cuando las células solares fallan y se producen defectos que traen pérdidas de hasta un 20% de la energía total. Por ello, es fundamental un instrumento que sea capaz de descubrir la causa de esos fallos y poder lograr un correcto mantenimiento.

Este proyecto se centra en desarrollar un método sencillo con el cual se obtenga la causa de dicho defecto y de este modo poder evitar las enormes pérdidas de energía y dinero. En este documento se describirán los fundamentos básicos de las células solares y cómo se comportan los principales componentes y sus parámetros. Posteriormente, se comentarán los defectos más comunes y cómo influyen estos en la célula. Además, se analizarán los diferentes métodos que ya existen y se desarrollará y validará el nuevo método matemático. Finalmente, para demostrar su correcto funcionamiento y efectividad se utilizará la herramienta Excel y el programa Ltspice.

## 2.- CONTEXTO

---

### 2.1.-HISTORIA DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica generada con el efecto fotovoltaico se reconoció por primera vez el 1839 por el físico francés Becquerel. Sin embargo, no fue hasta el año 1883 que fue construida la primera célula solar por Charles Fritts con una eficiencia de un 1%.

El rápido aumento en el interés en las propiedades del silicio dopado en la década de 1940 fue provocado por las sorprendentes propiedades fotovoltaicas demostradas por uniones p-n, formadas de manera fortuita. Los primeros dispositivos electrónicos comerciales de silicio fueron los diodos de silicio de contacto puntual o "detector de bigote de gato" que datan a principios del siglo XX.

En los Laboratorios Bell en los EE. UU, Russel Ohl patentó la moderna unión entre los materiales semiconductores que actualmente se utiliza. Ohl empezó a cultivar muestras de silicio más puro, fundiendo el material más puro disponible en una cápsula de cuarzo y luego enfriándolo. En un lingote específico, el que se había preparado mediante un enfriamiento muy lento, Ohl y sus compañeros encontraron propiedades inusuales, incluida una fotovoltaje sorprendentemente grande de aproximadamente medio voltio cuando el lingote estaba iluminado por una linterna. El silicio en este lingote mostró dos tipos distintos de propiedades, denominados "positivo" (tipo p) y "negativo" (tipo n), dependiendo de la polaridad requerida para un flujo de corriente fácil entre el material y un cable de metal colocado en la superficie de silicio, y también la polaridad del voltaje observado bajo iluminación. Rápidamente se dio cuenta de que la unión entre las regiones tipo p y tipo n era responsable de las propiedades inusuales del lingote original. Las primeras células solares de silicio se formaron cortando el lingote para incluir secciones con una región tipo p-n y aplicando contactos metálicos. Por lo que, las uniones "crecidas" en las primeras células surgieron de la distribución fortuita de las impurezas de tipo p (boro) y tipo n (fósforo) en el silicio como resultado del lento proceso de solidificación. Con estos avances, los Laboratorios Bell desarrollaron la primera célula fotovoltaica de silicio con un rendimiento del 4,5%.

Las células encontraron una aplicación casi inmediata en las naves espaciales. Las aplicaciones espaciales impulsaron la rápida mejora en la tecnología celular de modo que, a principios de la década de 1960, se había demostrado una eficiencia de conversión de energía celular de aproximadamente el 15% bajo la luz solar terrestre y las células proporcionaban energía a un número cada vez mayor de satélites.

En el frente comercial, a principios de la década de 1970 se había generado un interés generalizado en fuentes alternativas de energía terrestre. Una pequeña industria fotovoltaica terrestre surgió en gran parte como resultado del programa fotovoltaico del gobierno de los Estados Unidos. Las primeras células de silicio multicristalino desarrolladas específicamente para el mercado terrestre se informaron en 1976. En 1998, las células de silicio multicristalino representaban aproximadamente el 30% del mercado total de productos fotovoltaicos.

A principios de la década de 1980, una serie de células pasivadas por óxido mejoradas sucesivamente fabricadas por el grupo del autor en la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW), tomaron la eficiencia de las células de silicio por encima del 18%, luego el 19% y finalmente el 20%. El grupo UNSW ha mantenido el récord mundial de rendimiento de las células de silicio. La célula PESC desarrollada por UNSW (célula solar emisora pasivada) fue la primera célula de silicio en superar el 20% de eficiencia de conversión de energía en 1985. La siguiente mejora en la eficiencia de las células de silicio se produjo, nuevamente en UNSW, al combinar los desarrollos anteriores en la secuencia de células PESC con la pasivación de óxido frontal y posterior demostrada por primera vez en la célula de contacto de punto trasero, llamada célula PERL. Este enfoque produjo la primera célula de silicio con una eficiencia del 24% en 1994 y posee el récord mundial actual del 24.5%. La célula PERL se ha utilizado en cantidades razonablemente grandes en carreras de autos solares y en células espaciales. La siguiente célula es la PERT y esta ofrece simplificaciones de fabricación y se ha utilizado como base de producción de células espaciales

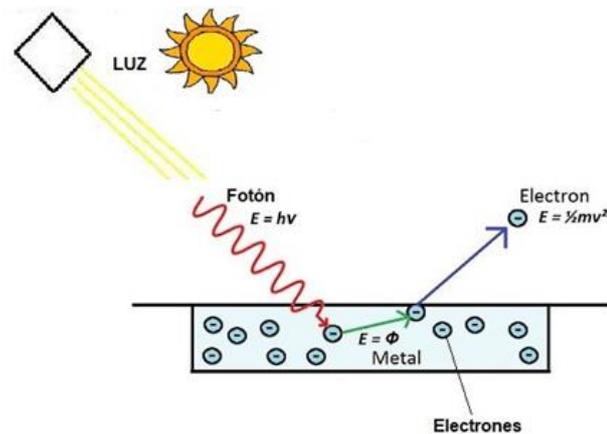
En cuanto a los laboratorios, las mejores células han demostrado cerca del 85% de la eficiencia alcanzable. En los mejores dispositivos experimentales, las pérdidas de rendimiento son del orden del 5% y estas surgen de valores inferiores a los ideales de cada uno de los parámetros de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y factor de llenado. A diferencia del caso de los dispositivos de laboratorio, las células comerciales no tienen ese rendimiento ya que tienen peor calidad del material de sustrato de silicio.

En 1998, aproximadamente el 60% de la producción fotovoltaica mundial se basaba en obleas de silicio multicristalino. Varias compañías han desarrollado procesos comerciales para producir los lingotes precursores de silicio multicristalino. Las ventajas son menores costos de capital, un mayor rendimiento y una mayor tolerancia a la mala calidad de la materia prima. Las obleas multicristalinas son capaces de producir células de aproximadamente el 80% del rendimiento de una célula monocristalina. Sin embargo, debido a la mayor densidad de empaquetamiento posible debido a su geometría cuadrada o rectangular, esta diferencia de rendimiento se enmascara en gran medida a nivel de módulo. [2]

## 2.2.-FUNCIONAMIENTO FISICO DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Este silicio transformado se moldea para fabricar obleas. Estas obleas son el núcleo central de las células solares fotovoltaicas. Cuando los átomos de silicio se unen unos a otros comparten los electrones de las últimas capas con los átomos vecinos formando lo que se denomina enlaces covalentes, muy estables y fuertes. Estas agrupaciones se llevan a cabo de forma ordenada dando lugar a un sólido de estructura cristalina. Las células solares de semiconductores son aparentemente dispositivos bastante simples. Los semiconductores tienen la capacidad de absorber la luz y entregar una parte de la energía de los fotones absorbidos a los portadores de corriente eléctrica: electrones y huecos.

Los átomos de silicio están unidos entre si con una estructura que no permite el movimiento libre de los electrones. El trabajo de la célula es provocar que los electrones libres vayan de un material semiconductor a otro en busca de un “hueco” que llenar absorbiendo los fotones de la luz para liberar electrones que puede usar en una corriente eléctrica. A esos electrones libres se les denomina electrones de conducción. A los enlaces que han dejado vacíos se les denomina huecos. Cuando son expuestos a la luz permiten que un fotón de la luz solar “arranque” un electrón, el electrón libre deja un “hueco” que será llenado por otro electrón que a su vez fue arrancado de su propio átomo. Para que los electrones se muevan unidireccionalmente, se necesita una fuerza motriz. Una forma sencilla de producir esta fuerza motriz es una unión P-N. [3]



**Ilustración 1: Descripción del efecto fotoeléctrico**

Los semiconductores extrínsecos tipo n se obtienen a partir de un proceso de dopado en el que se le añaden átomos con un número relativo de portadores de cargas fijas negativas o electrones. Por el contrario, los semiconductores extrínsecos tipo p se dopan con un exceso de portadores positivos o huecos [4]. Si los dos tipos de materiales dopados se unen, algunos electrones del lado N irán a la región P y llenarán los huecos disponibles. Así se forma una región de agotamiento, donde no hay electrones libres ni huecos.

El lado N se carga positivamente y el lado P se carga negativamente y esto produce un campo eléctrico entre las cargas. Este campo eléctrico produce la fuerza motriz necesaria. Cuando la luz incide sobre la región N, penetra hasta la región de agotamiento, donde se producen electrones y huecos que son repelidos hacia la región N y P respectivamente gracias al campo eléctrico. La concentración de electrones en la región N y de huecos en la región P se vuelven tan altos que se producirá una diferencia de potencial entre ellos. Ahora si conectamos cualquier carga entre estas dos regiones, los electrones comenzarán a fluir a través de la carga, combinándose con los huecos de la región P, produciendo electricidad.

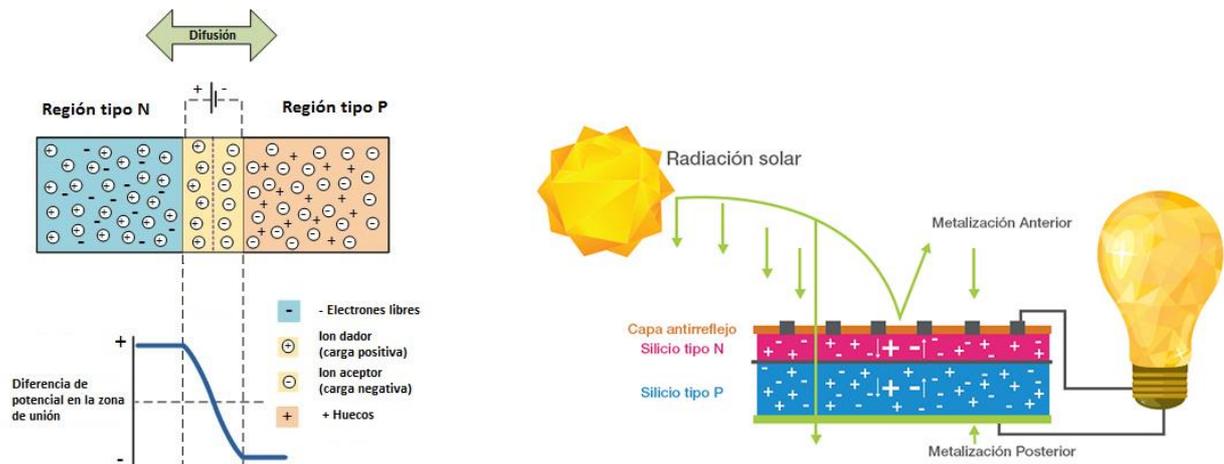


Ilustración 2: Región P N y diferencia de potencial

Para aumentar el rendimiento energético de las células solares fotovoltaicas se busca una capa N muy fina y muy dopada. Por otro lado, la capa inferior P es más gruesa y está escasamente dopada. Esto logra un mayor el grosor de la región de agotamiento y, de esta forma, se produce la electricidad. [5]

## 2.3- ESTRUCTURA DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA

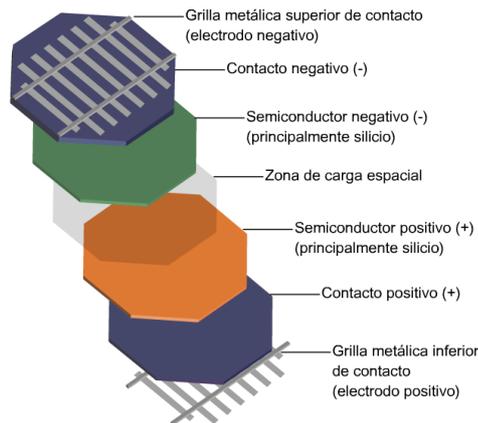
### 2.3.1.-ESTRUCTURA FÍSICA DE LA CÉLULA SOLAR

Para trabajar la célula solar se necesitan 3 elementos de estructura:

- Un absorbedor que absorbe los fotones entrantes y traduce su energía a un excitado estado de portador de cambio.
- Una membrana que evita que ocurra el proceso inverso en el que el portador excitado se recombina a su estado fundamental.
- Contactos que permiten la recolección de portadores y la interconexión a otras células solares o una carga externa

Además de la unión p-n (silicio con carga positiva y negativa) explicada en el apartado anterior que hace posible la aparición de un campo eléctrico, tenemos otro concepto importante en la estructura de una célula solar. Este es el concepto que hace referencia a lo que llamamos malla de metalización frontal. Los contactos metálicos superficiales son necesarios para extraer la corriente eléctrica de la célula. El metal es un material opaco a la luz, en consecuencia, al menos el contacto frontal (el del lado de la célula expuesta directamente al Sol) no puede recubrir completamente la superficie de la célula. Puede pensarse entonces que el contacto

frontal debe ser lo más pequeño (en superficie) posible, pero si se hace excesivamente pequeño uno de los parámetros de los que hablaremos posteriormente, la resistencia serie, aumenta y esto significa una pérdida de eficiencia de la célula. [6]



**Ilustración 3: Estructura de una célula solar**

### 2.3.2.- FABRICACIÓN DE LA CÉLULA SOLAR

Hay muchas formas diferentes para construir células solares y ellas dependen del tipo de fabricante al que acudas. No obstante, todas ellas buscan mejorar la eficiencia y a la vez reducir los costes económicos de fabricación. El silicio con el que se fabrican la mayor parte de las células fotovoltaicas es un material muy abundante en la Tierra. Sin embargo, el procesamiento del silicio es laborioso y complicado.

El procesamiento comienza purificando el silicio que se utilizará como base del semiconductor. A continuación, se funde el silicio purificado para crear los lingotes, ya sean cilíndricos en el caso de las monocristalinas, como en forma cúbica en el caso de las policristalinas.



**Ilustración 4: Silicio monocristalino y policristalino**

El siguiente paso es la texturización de la superficie. El texturizado tiene el objetivo de disminuir la reflexión de la luz en la cara frontal. El concepto texturizar hace referencia al proceso a través del cual se realiza un 'ataque químico' para que la estructura quede en pirámides o irregular de diferentes tamaños. Estas pirámides que se han generado permiten disminuir la reflexión.

Tras el proceso de texturización de la superficie frontal se debe formar el emisor, el cual se forma a través de la difusión de átomos de fósforo. Formar el emisor no es un proceso muy rápido. Se realiza a través de un proceso llamado 'dopado'. El dopado se lleva a cabo mediante impurezas que se dedican a suministrar electrones gracias al fósforo, un conocido elemento químico. El dopaje se realiza en hornos que trabajan a temperaturas muy elevadas, entre los 800°C y los 900°C. Aquí es donde se utiliza el fósforo o el boro según el tipo de célula a obtener (N o P).

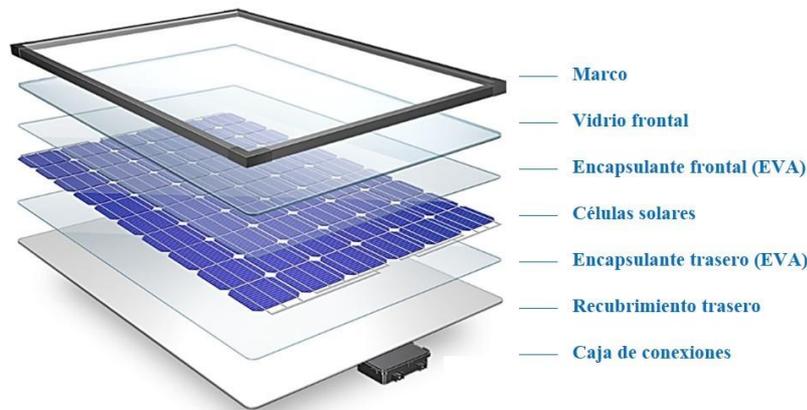
Tras este paso, se forma el contacto frontal sobre el emisor ya construido. El contacto que se ha creado tiene la tarea de recoger los electrones que se generan en la célula por la radiación solar. Por último, se crea el contacto trasero con un material muy parecido al empleado en el contacto frontal. [6, 7]

### 2.3.3.- MÓDULOS

Las células generalmente se venden interconectadas y empaquetadas en un paquete de vidrio resistente a la intemperie conocido como módulo. Los módulos solares no son más que varias células trabajando de forma conjunta para generar un mayor potencial eléctrico. El embalaje consiste en un laminado de vidrio o polímero con los cables positivo y negativo de las células conectadas en serie que están en una caja de conexiones unida a la parte posterior del módulo.

La principal estructura del módulo es la siguiente:

- Varias subcapas de material encapsulante que protege las células; ya que tienen una alta transmisión de la radiación y una baja degradabilidad a lo largo del tiempo.
- Células fotovoltaicas.
- Cubiertas posteriores de vidrio generalmente opacas y de color claro para reflejar la luz que traspasó las células. Esto hace que la luz regrese al frente del panel y que pase de nuevo por las células hasta ser absorbida.
- Un marco de acero inoxidable o aluminio anodizado que sujeta el conjunto. [8,9]



**Ilustración 5: Estructura de un módulo fotovoltaico**

Dichos módulos han demostrado ser extremadamente confiables en el campo, ya que todos los fabricantes ofrecen una garantía de 10–25 años en la salida de potencia del módulo. La eficiencia de las células en el módulo se ubicaría en el rango del 18-20 %, menos de la mitad del límite fundamental del 33 % para el silicio. La eficiencia del módulo es ligeramente menor que la de las células constituyentes debido al área perdida por los marcos y los espacios entre las células.

Un módulo, por ejemplo, puede contener 36 células soldadas juntas en serie. Dado que cada célula individual proporciona una salida máxima de aproximadamente 0,6 V a la luz solar, esto da como resultado un módulo de voltaje de salida máximo de más de 20 V, suficiente para cargar completamente una batería de plomo ácido normal de 12 V. La corriente de salida de cada célula depende de su tamaño y de la intensidad de la luz solar (irradiancia solar), pero generalmente se ubicaría en el rango de 2 a 10 A con luz solar brillante.

## 2.4.-APLICACIONES

Los sistemas fotovoltaicos varían desde sistemas pequeños, montados en el techo o integrados en edificios con capacidades desde unas pocas hasta varias decenas de kilovatios, hasta grandes centrales eléctricas a escala de servicios públicos de cientos de megavatios. Las principales aplicaciones son las siguientes:

- Sistemas integrados en tejados y edificios. Los sistemas fotovoltaicos de los tejados se suelen adaptar a los edificios existentes, generalmente montados sobre la estructura del techo existente o en las paredes existentes.
- Colector solar fotovoltaico térmico híbrido. Estos sistemas son sistemas que convierten la radiación solar en energía térmica y eléctrica.

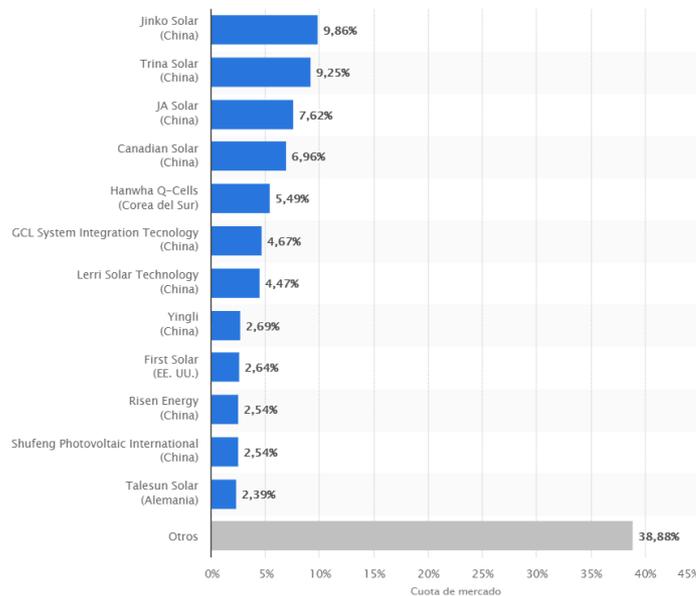
- Concentrador fotovoltaico. Los concentradores utilizan lentes y espejos curvos para enfocar la luz solar en células solares pequeñas. De este modo se consigue una potencia fotovoltaica mucho mayor.
- Electrificación rural. Este tipo de aplicación solar se utiliza en aldeas rurales donde las líneas eléctricas están muy alejadas de la población.
- Centrales eléctricas. Estas centrales son granjas solares para obtener una alta producción de potencia eléctrica.
- Solar flotante. Los sistemas de energía solar flotante se instalan en sitios donde hay poca superficie de tierra disponible. Los paneles solares, en este caso, se encuentran flotando en una superficie acuática como en un pantano o un lago.
- Sistemas independientes. El ejemplo más claro de estos sistemas son las calculadoras solares.
- En transporte. Utilizada para obtener potencia motriz.
- Telecomunicaciones y señalización.
- Aplicaciones en naves espaciales.

Principalmente se diferencian dos tipos de instalaciones fotovoltaicas:

- Instalaciones fotovoltaicas de conexión a red, donde la energía que se produce se utiliza íntegramente para la venta a la red eléctrica de distribución. Dentro de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red existen las plantas de energía solar fotovoltaica. Una planta de energía fotovoltaica, es una gran planta de generación de energía, diseñada para la venta de su producción a la red eléctrica. También se le conoce como una granja solar, especialmente si está ubicada en áreas agrícolas.
- Instalaciones fotovoltaicas aisladas de red, que se suelen utilizar para autoconsumo, ya sea para una vivienda aislada o una estación repetidora de telecomunicación. Podemos encontrar estas en pequeños aparatos como calculadoras o para alumbrados público en determinadas zonas. [10]

## 2.5.-MERCADO

La energía fotovoltaica es la tercera fuente de energía renovable en términos de capacidad global. El fotovoltaico es el sector industrial de mayor crecimiento (en 12 años se ha multiplicado por 100). Las fuentes renovables que ocupan la primera posición son la energía hidráulica y eólica. La Agencia Internacional de Energía espera un crecimiento de 700 a 880 GW de 2019 a 2024. En 2018, la capacidad fotovoltaica instalada en todo el mundo aumentó a más de 515 gigavatios (GW) cubriendo aproximadamente el dos por ciento de la demanda mundial de electricidad. Los principales fabricantes de módulos fotovoltaicos del mundo están localizados en China y Taiwán, que dan cuenta del 70 % de la producción global; otro 15 % es debido a otros países de Asia, siendo el principal Japón. Europa contribuye con un escaso 3 % y América del Norte, con otro 4 %, a pesar de que allí se sitúa uno de los grandes fabricantes mundiales, Sun Power (EEUU). [11]



**Ilustración 6: Estadística de la distribución del mercado de las empresas fabricantes de módulos solares en 2017**

### 2.5.1.- COSTES DE LAS CÉLULAS

Se han realizado muchos estudios sobre los costos de las diferentes etapas de la producción de células de silicio utilizando diferentes supuestos básicos, particularmente en relación con el volumen de producción y el costo del material fuente del silicio.

Probablemente el estudio más reciente sea uno realizado por el Programa Fotovoltaico de la Unión Europea. En este estudio participaron representantes de siete fabricantes y laboratorios de investigación fotovoltaicos europeos. Las claves del estudio fueron el volumen de fabricación de 500 MWp de células solares por año y el material fuente de silicio a US \$ 25 por kg. Se hicieron comparaciones importantes entre la cinta EFG, las tecnologías de obleas multicristalinas y cristalinas, entre secuencias de procesamiento de células serigrafadas, de contacto enterrado, de aislante de metal y de semiconductores y células PERL. [2]

## 2.5.2.- CÉLULAS COMERCIALES Y DE LABORATORIO

El gran diferencial entre las eficiencias de una célula comercial y la mejor célula de silicio de laboratorio muestra el enorme potencial para una mayor mejora de la eficiencia en dispositivos comerciales. En los últimos diez años, la eficiencia de los módulos comerciales de silicio aumentó de 12 % a 17 % a grandes rasgos. En el laboratorio, los módulos de mejor rendimiento se basan en silicio monocristalino con una eficiencia del 24,4 %. En el laboratorio, las células solares de unión múltiple de alta concentración alcanzan hoy una eficiencia de hasta el 46 %. Con la tecnología de concentración, se han alcanzado eficiencias de módulos de hasta 38,9 %. [12]

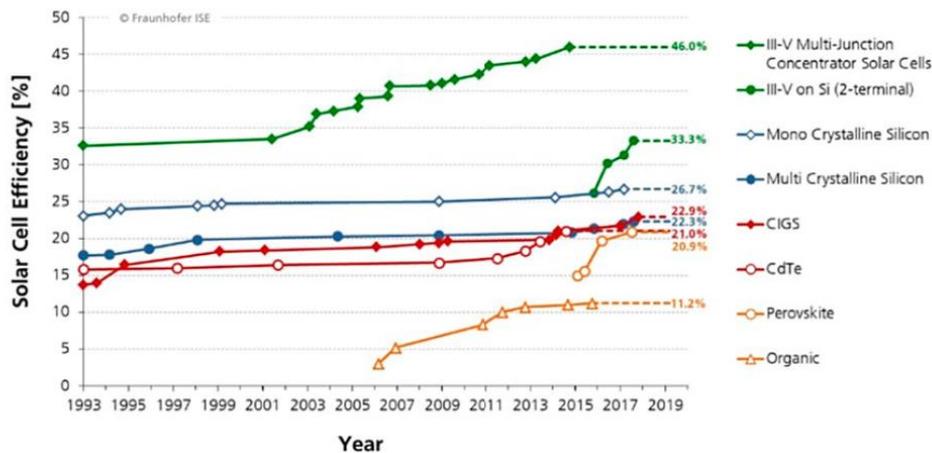


Ilustración 7: Evolución de la eficiencia de las principales tecnologías de células solares durante los últimos 25 años

## 3.- OBJETIVO

---

En este apartado se define y explica el objetivo principal que se persigue con este proyecto y a continuación de este se presentan los objetivos secundarios que han ayudado a alcanzar el objetivo principal deseado.

### 3.1.-OBJETIVO PRINCIPAL

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar una metodología que permita determinar la causa de los fallos de una célula solar incluida en un módulo fotovoltaico sin que se tenga acceso a los terminales específicos de esa célula, sino del módulo fotovoltaico completo.

Esta nueva metodología es de gran utilidad porque como se ha mencionado previamente la energía fotovoltaica que es la tercera fuente global de energía renovable y va en crecimiento. Es una energía con la cual se podría abastecer energéticamente a todo el mundo. Actualmente, esta energía alcanza los 580 GW, pero hay un inconveniente y es todas las pérdidas que se producen cuando un módulo no funciona correctamente. Estos defectos pueden provocar hasta un 20 % de pérdidas de energía las cuales provocan enormes pérdidas económicas. Por ello, es fundamental un instrumento que sea capaz de descubrir la causa de esos fallos y poder lograr un correcto mantenimiento.

Gracias a este nuevo procedimiento de evaluación se puede lograr evitar esas enormes pérdidas. Este procedimiento es muy útil especialmente para esos módulos que se encuentran operando en plantas fotovoltaicas, ya que, mediante su utilización, se verifica cual es la célula problemática mientras los módulos permanecen conectados pudiendo efectuar su inmediata reparación. En conclusión, es un método que está enfocado al negocio de las empresas de mantenimiento y que proporcionará grandes beneficios.

### 3.2.-OBJETIVOS SECUNDARIOS

Para la realización del proyecto y el alcance del objetivo principal, se han ido estableciendo objetivos secundarios. Estos son los siguientes:

- Investigar las células solares y comprender los fundamentos necesarios para la realización del proyecto
- Entender las diferentes estructuras de células solares y sus implicaciones en términos de cómo afectan sus características eléctricas.

- Implementar modelos de células solares, analíticos y numéricos que puedan ser implementadas en el programa LTSpice o en hojas Excel.
- Analizar las diferentes causas de fallos o degradaciones en células solares y como repercuten en sus características eléctricas
- Interpretar los datos de fabricación de un módulo y saber simular sus características
- Evaluar los diferentes métodos que hay actualmente para la detección de fallos y así poder compararlos con la nueva metodología realizada en el proyecto.

## 4.- BENEFICIOS

---

Cuando se ha desarrollado un proyecto es interesante analizar los beneficios económicos, sociales y técnicos que tiene. Por tanto, a continuación, se van a explicar cada uno por separado.

### 4.1.-BENEFICIOS ECONÓMICOS

Desde el punto de vista económico, como se ha mencionado anteriormente, las pérdidas debidas a las anomalías de los módulos traen muchas pérdidas económicas. Aproximadamente, si el negocio está en 100 GW y los paneles se venden a 1 euro, se generan 100 mil millones de euros. Teniendo en cuenta que las pérdidas son del 20 %, podemos hablar de pérdidas de 20 millones de euros por cada 100 GW. Una reducción de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos puede suponer un incremento importante del período de amortización de la planta. Como se puede ver, es una cifra extremadamente grande, pero gracias al nuevo proceso desarrollado en el proyecto, esas cifras se podrían evitar y eso generará grandes beneficios a la empresa.

Asimismo, este método está especialmente enfocado a los negocios de empresas de mantenimiento de paneles solares. Además, hablamos de un negocio local que está dividido por todo el mundo, con gran relevancia internacional, por lo que los beneficios son de una magnitud total y gran interés potencial.

### 4.2.-BENEFICIOS SOCIALES

La energía fotovoltaica tiene un gran impacto social y es importante saber que de esta energía hay cantidad suficiente para abastecer a la humanidad.

Para garantizar un suministro de energía fiable y mantener unos precios asequibles, la Unión Europea quiere crear un mercado europeo de la energía más integrado y competitivo. La comisión europea quiere apostar por el uso de energías renovables a un 50 % y de estas la más económica y rentable es la energía fotovoltaica.

La UE apoya la energía procedente de fuentes renovables y el uso eficiente de la energía, todo ello para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. De modo que el impacto medioambiental al apostar por la fotovoltaica es enorme y se sustituirían los combustibles fósiles

Por otra parte, incido en un mercado distribuido globalmente de mantenimiento de plantas fotovoltaicas produciendo beneficios internacionalmente.

### 4.3.-BENEFICIOS TÉCNICOS

Este sería uno de los beneficios más influyente ya que su uso cambiara las estrategias de detección que se usan actualmente. Principalmente, consiste en un desarrollo matemático y el procedimiento es sencillo y fácil de llegar.

A nivel industrial no existe ninguna metodología que encuentra el origen del fallo de una célula y su causa. Asimismo, no se conoce un método para determinar la causa con módulos que ya están operando. Por tanto, se puede decir, que es la primera herramienta técnica que puede hacerlo. Esta metodología es muy útil para los módulos que se encuentran operando en plantas fotovoltaicas o en situaciones en que haya varios módulos conectados entre sí. En definitiva, es una metodología enfocada a las empresas de mantenimiento de plantas.

En estas situaciones, muchas veces el problema llega cuando en el módulo aparecen fallos que a simple vista no se pueden detectar y que aparentemente funcionan correctamente. En este caso, la eficiencia no es la esperada y, en consecuencia, se están produciendo pérdidas. Gracias a este nuevo proceso se consigue encontrar la causa de dichas anomalías en todas las posibles situaciones. Esto cambiará y facilitará el mantenimiento de dichas células y cambiará el negocio de mantenimiento de plantas.

Si hablamos de defectos en los paneles, hay que mencionar la  $R_s$ . La  $R_s$  es un componente de la célula que consiste en una resistencia en serie, la cuál es muy conflictiva en el mundo fotovoltaico. La causa de esto, es que dentro de un módulo no se puede conocer en que célula falla la resistencia, ya que, todas están en serie. Sin embargo, con este nuevo proceso será posible.

## 5.- ESTADO DEL ARTE

---

En este apartado vamos a explicar que métodos existen y se utilizan en la actualidad para detectar los errores en módulos fotovoltaicos. Es importante tener en cuenta que la visión artificial juega un importante papel. [13]

### 5.1.-LUZ INFRARROJA

La propia formación de los lingotes no está exenta de errores, y durante el crecimiento cristalino de los lingotes suelen aparecer grietas interiores, que pueden visualizarse y separarse. Una de las metodologías utilizadas para determinar la presencia de fisuras o grietas en los bloques, consiste en iluminar los lingotes con luz infrarroja y localizar los defectos a partir de cámaras Infrarrojas basadas en tecnología que permite observar el espectro Infrarrojo entre los 900 y los 1700 nm. La tecnología actual permite utilizar cámaras con este tipo de sensores, que detectan las grietas de menor tamaño.



Ilustración 8: Sensor de luz infrarroja para la detección de fallos

### 5.2.-CÁMARAS MATRICIALES DE ALTA RESOLUCIÓN

Cuando se habla de defectos de pocas micras, la tecnología a utilizar para el control de calidad de estas células hace necesario el uso de cámaras matriciales de alta resolución de 4 a 22 megapixels. En el proceso de fijar los filamentos de contactos eléctricos tampoco está exento de errores. Es frecuente que haya cortocircuitos en estos filamentos, que obstaculicen el paso de la corriente eléctrica y por tanto hagan perder efectividad a la célula solar. Estos cortocircuitos pueden ser realmente de muy pequeñas dimensiones y por tanto también es necesario en este caso utilizar cámaras matriciales de muy alta definición.

En el proceso de texturizado es necesario hacer una inspección de las líneas que se han trazado tanto para ver la anchura de estas líneas como para determinar la distancia entre líneas. Este proceso de inspección frecuentemente se realiza utilizando cámaras de alta resolución. Es importante también tener en cuenta otros defectos adicionales, como la presencia de burbujas en la parte posterior de las células solares, este defecto también está relacionado con la pérdida de efectividad en la transmisión eléctrica.

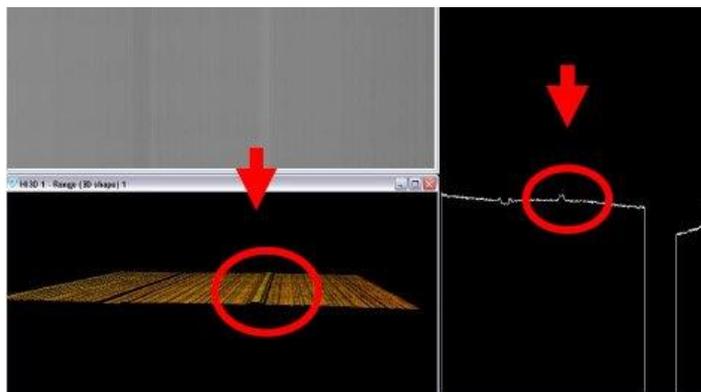


Ilustración 9: Cámaras matriciales de alta resolución para detectar burbujas

### 5.3.-CÁMARAS TÉRMICAS

Una vez fijado el módulo en el panel y en su estructura de aluminio, se somete a una prueba de seguridad eléctrica con el fin de garantizar que no existen cortocircuitos, por ejemplo. Los resultados se consiguen mediante cámaras térmicas.

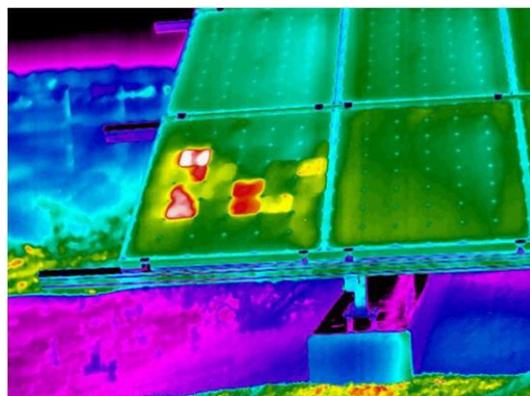


Ilustración 10: Cámara térmica para detectar fallos en el módulo

## 5.4.- ELECTROLUMINISCENCIA

Las células solares convierten la energía solar en electricidad, sin embargo, tienen también la característica de poder emitir luz si se conectan a una corriente eléctrica. A este proceso, digamos inverso, se le denomina electroluminiscencia. Mediante esta tecnología se puede evaluar de forma rápida y precisa la eficiencia de la célula en cada uno de sus puntos. Al inducir una corriente eléctrica sobre la célula esta emite luz en un espectro centrado en los 1.150 nm. Cuanta más radiación emite más eficiente es, y la radiación se emite en toda la célula, de forma que si existe una grieta o una deficiencia en las capas conductoras se ve reflejado en la imagen capturada con cámaras especialmente sensibles a esta longitud de onda.

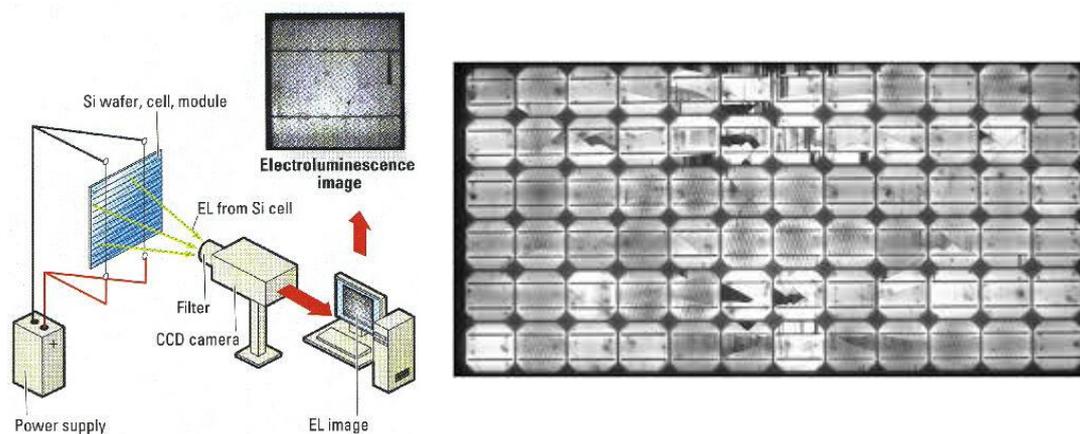


Ilustración 11: Electroluminiscencia

## 6.-ESTUDIO DE LOS DEFECTOS DE UNA CÉLULA SOLAR

En este apartado se van a explicar los principales componentes y características de una célula solar. Además, se va a mencionar y hacer una breve explicación de los defectos más característicos y cómo influyen las variaciones de los componentes con sus características eléctricas. Este es un modo de detección de defectos, que es parte del método físico que se explicará en el siguiente apartado.

### 6.1.-CARACTERÍSTICAS (I-V), (P-V) Y SUS PARÁMETROS FUNDAMENTALES

Toda célula fotovoltaica tiene dos curvas características, conocidas como curvas de corriente-voltaje (I-V) y curva de potencia-voltaje (P-V). Estas se pueden ver representadas en la ilustración 12.

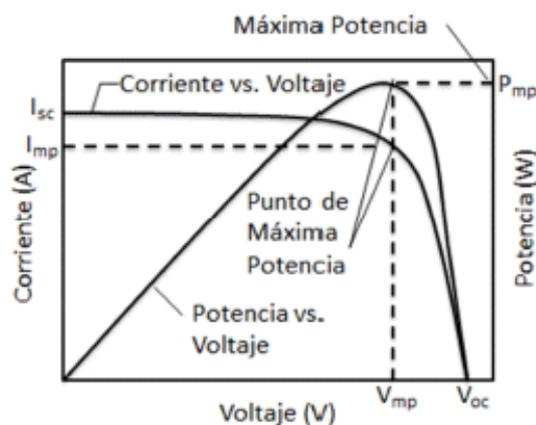


Ilustración 12: Curva I-V y curva P-V

Los parámetros más importantes que se pueden observar son: la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, potencia máxima y su corriente y su tensión máxima.

- $V_{oc}$  (open circuit voltage): Momento de máxima tensión cuando se produce una ruptura en el circuito. Se le conoce como "tensión en circuito abierto" ( $V_{oc}$ ). En este momento la resistencia es infinitamente alta y no hay corriente porque el circuito es incompleto, la célula no está conectada a ninguna carga.
- $I_{sc}$  (Intensity short circuit): El punto donde la célula produce la corriente máxima porque no hay resistencia en el circuito, es decir, cuando suscita cortocircuito entre sus terminales positivo y negativo. Esta corriente máxima se conoce como la "Intensidad en cortocircuito".

- **Vmp (Máximun Power Voltage):** Se le llama "tensión en el punto de su máxima potencia" y corresponde con el punto de intersección con la máxima intensidad de corriente (Imp). Su valor siempre será menor que Voc.
- **Imp (Máximun Power Current):** se le llama "corriente en el punto de la máxima corriente". Este punto es la intersección con la máxima tensión de voltaje (Vmp). Su valor siempre será menor que Isc.
- **Pmp (Maximun Power Point):** punto donde se encuentran la máxima tensión (Vmp) con la máxima intensidad de corriente (Imp) y que al multiplicarse se traduce a la potencia máxima de energía del sistema fotovoltaico. [14]

$$P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp}$$

Como es lógico, si observamos la curva I-V en la ilustración 12, encontramos el valor de tensión en circuito abierto (Voc) en el eje "x" de la gráfica cuando la corriente es igual a cero, puesto que por un circuito abierto no circulan amperios. Y en el eje "y" de la izquierda encontramos el valor de intensidad de cortocircuito (Isc) puesto que cuando el panel se encuentra en cortocircuito el voltaje es igual a cero. [15]

Otro parámetro importante es el factor de forma (FF). El factor de forma es una medida de la cuadratura de la característica I - V y siempre es menor que uno. Es la relación de las áreas de los dos rectángulos que se muestran en la ilustración 12 o podemos obtenerlo por la siguiente fórmula.

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{OC} \times I_{SC}}$$

La eficiencia también es fundamental en una célula solar. Y la eficiencia de conversión de energía,  $\eta$ , se define como

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{P_{in}}$$

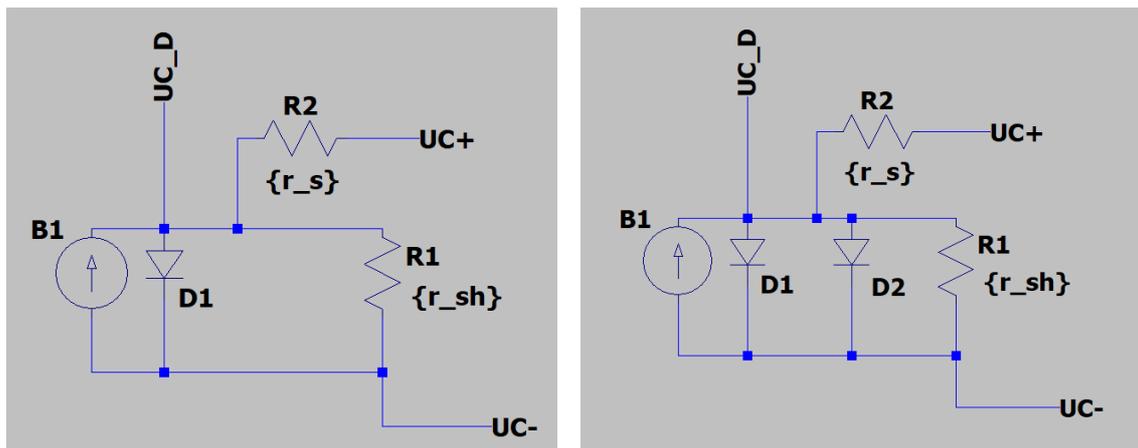
Donde  $P_{in}$  está determinado por las propiedades del espectro de luz incidente sobre la célula solar. [16]

## 6.2.- COMPONENTES DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Las células solares están caracterizadas por unos parámetros físicos que se consiguen con una serie de componentes. Esos componentes consisten en un generador de corriente en paralelo con uno o dos diodos y resistencias.

La corriente suministrada por el generador de corriente es un valor dependiente del nivel de iluminación y con valores típicos comprendidos entre 35 y 42 mA/cm<sup>2</sup> para niveles de iluminación de un sol. El valor de la corriente proporcionada por este generador es directamente proporcional al área iluminada de la célula solar.

El número de diodos que aparecen en paralelo con este generador de corriente es el que da el nombre al modelo usado, de uno o dos diodos (ilustración 13).



**Ilustración 13: Modelo un diodo (izquierda) y modelo dos diodos (derecha) realizado con Ltspice**

El modelo de un diodo da el efecto de recombinación en las diversas regiones de la célula solar y determina su tensión de circuito abierto, también del valor máximo posible del factor de forma. Las diferentes tecnologías de fabricación de células solares, así como sus diversas estructuras, se basan en mejorar este diodo, básicamente alterando un único parámetro: su corriente de saturación. El segundo diodo, que usualmente se asocia a recombinaciones en las denominadas zonas de carga de espacio, da cuenta de defectos superficiales, en los bordes de las células o por diferentes mecanismos de degradación. Su efecto sobre la tensión de circuito abierto y el factor de forma, cuando la célula es de calidad, es pequeño por lo que generalmente no es tenido en cuenta en la simulación de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, su omisión dificulta el poder modelar células o módulos con algunas degradaciones.

Este modelo se complementa con otros dos componentes: dos resistencias denominadas como resistencia serie,  $R_s$ , y resistencia paralela,  $R_{sh}$ . La primera es importante ya que controla las pérdidas óhmicas producidas al extraer la corriente de la célula solar. Su optimización es compleja y también su determinación, que aparece siempre enmascarada por otros efectos e incluso adopta diferentes valores en función de las condiciones de iluminación o de medida. La  $R_s$  es un componente complicado porque no es fácil descubrir que valor de resistencia corresponde a cada célula, ya que la resistencia del módulo aparece siempre como la suma de las resistencias individuales de cada célula ya que está en serie y sin embargo su determinación individual es realmente valiosa porque hay fallos que dependen de ella como puede ser una microrrotura en los dedos metálicos.

La resistencia paralelo es la que controla las fugas de corriente proporcionales a la tensión que soporta la célula. Sin embargo, en células prácticas su valor se sitúa por encima de los 1000 ohms·cm<sup>2</sup> y para estos valores su efecto en la característica corriente-tensión de la célula solar no es apreciable por lo que es un parámetro del que se suele prescindir y lo comprobaremos en el siguiente apartado. Sin embargo, es un parámetro relevante en cuanto algunos daños o degradaciones de las células y tienen muchas fugas.

Por lo tanto, a este modelo se le llama modelo de 5 parámetros. Este permite representar con total precisión la característica corriente-tensión de la célula solar. Pero también se usa otro modelo al que llamamos el modelo de 3 parámetros en el que solo tiene el generador de corriente, el diodo de zonas neutras y la  $R_s$ .

### 6.3.-TIPOS DE DEFECTOS

En el mundo de las células y los módulos fotovoltaicos hay muchos tipos de defectos, pero vamos a hablar de los más comunes.

- **Puntos calientes:** Es uno de los defectos que más se da. Los paneles solares pueden desarrollar zonas que se calienten de forma imprevista porque se sobrecargan. Es algo que ocurre por una mala soldadura durante su fabricación o por defectos en las propias células solares. El problema podría llegar a producir un cortocircuito, por lo que es necesario revisar la zona y resolver el problema.
  - **Microgrietas:** Este defecto se produce cuando la superficie cristalina de los paneles se daña y entonces pueden sufrir microgrietas casi imperceptibles. Su presencia no es problemática más que si aumentan de tamaño, porque se debilitará la zona. Expuesta a la intemperie y a cambios de temperatura, las tensiones térmicas del frío y el calor podrían provocar la aparición de grietas mayores. Eso desembocaría en una pérdida de rendimiento. De hecho, una microgrieta puede desconectar a una célula de su contigua, ya que están conectadas en serie. En consecuencia, el panel generará menos energía al perder células activas.
  - **Decoloración:** A pesar de que en el momento de instalar los paneles parezcan perfectos, pueden presentar con el tiempo una decoloración en diferentes puntos. Normalmente, esto tiene su origen en defectos de fabricación.
  - **Diferencia de voltaje:** La diferencia de voltaje entre el panel y la toma de tierra, que se utiliza por seguridad, puede llevar a perder un 10% del rendimiento. Ese voltaje que se genera podría descargarse de forma parcial en el circuito primario de energía. Y, en consecuencia, disminuir paulatinamente el rendimiento del panel solar, además de reducir la vida útil del panel rápidamente.
  - **Corrosión interna:** Cuando la humedad exterior penetra en los paneles y provoca oxidación. Su origen está en fallos de fabricación, ya que los paneles solares deben ser completamente estancos. Si ocurre, aparecerán pronto manchas oscuras en el interior, y esas zonas oscuras disminuirán la cantidad de energía que el sistema puede generar.
- [17]

- Daño interno del módulo:** En algunas ocasiones, los paneles solares pueden presentar daños internos en su sistema. Estos daños se atribuyen en la mayoría de las ocasiones a una producción defectuosa o una selección de componentes de baja calidad. Esto puede originar un resultado conocido como "rastros de caracoles" y se refiere a la decoloración de los conectores o células solares, coloración amarillenta de las hojas colocadas en la parte posterior. [18]
- Amarilleamiento (Yellowing/Browning):** El amarilleamiento es, básicamente, un cambio de color en los paneles solares debido a la filtración de luz ultravioleta. Generalmente, los módulos solares utilizan un polímero plástico denominado EVA (Etileno-Vinil-Acetato) que funciona como encapsulante de las células solares y que se emplaza en dos capas, encima y debajo de las células. El amarilleamiento ocurre cuando los rayos ultravioletas del sol traspasan el cristal del módulo y la capa superior de EVA, alcanzando así a las células solares. En los huecos que hay entre dichas células, la luz puede continuar avanzando y penetrar a través de la segunda capa de EVA hasta una capa que hay bajo esta (denominada capa LE) y creando en ella una decoloración de tono amarillento. Se trata de un problema bastante evidente a simple vista que, afortunadamente, no afectará de manera significativa al rendimiento de tus paneles. [19]

## 6.4.-ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LOS VALORES DE LOS COMPONENTES

En este apartado se va a investigar las diferentes causas de fallos en células solares y como repercuten en sus características eléctricas cuando ocurren cambios en los componentes. Es decir, se va a analizar como varía la curva I-V y la curva P-V según los diferentes valores que tenga cada componente. En este caso vamos a utilizar el modelo de 2 diodos explicado anteriormente e iremos cambiando los valores y mostrándolos en unas gráficas. Para ver las comparaciones vamos a poner unas condiciones iniciales que son las siguientes:

La temperatura va a ser de  $T= 25C^{\circ}$  y por tanto, tendrá un voltaje térmico de  $V_t= 0.025852$  V. Los demás valores se muestran definidos en la tabla a continuación.

**Tabla 1: Condiciones iniciales**

P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
18.32	630	76.56	0.038	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	10000	1.2	1	2

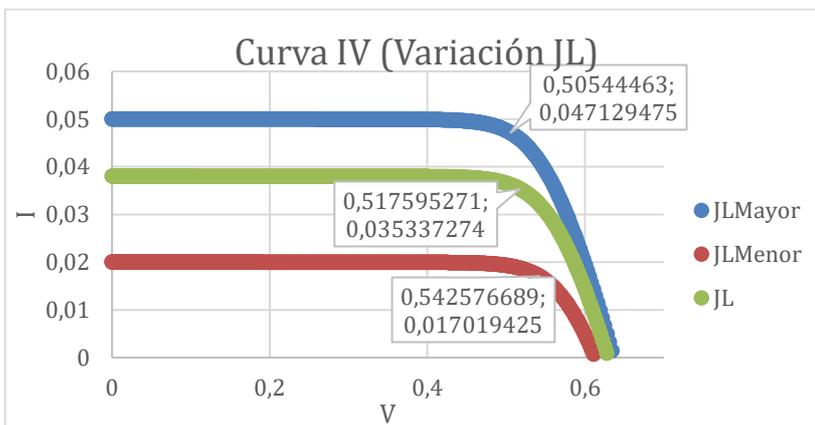
## 1. CAMBIO DE JL

**Tabla 2: Cambio a un valor mayor de JL**

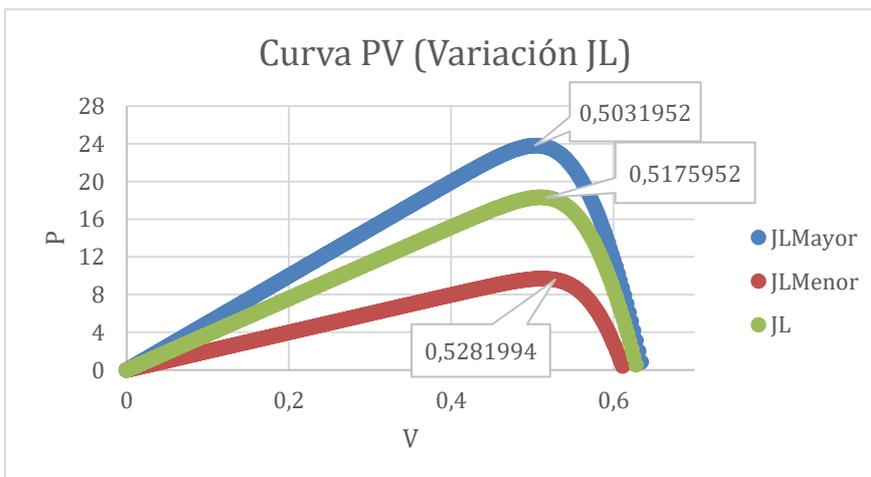
P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
23.82	637	74.79	<b>0.05</b>	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	10000	1.2	1	2

**Tabla 3: Cambio a un valor menor de JL**

P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
9.704	613	79.15	<b>0.02</b>	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	10000	1.2	1	2



**Ilustración 14: Curva IV al variar JL**



**Ilustración 15: Curva PV al variar JL**

El primer cambio que se va a realizar es modificar el valor de  $J_L$ , es decir, modificar el valor de la corriente del generador que es proporcional a la iluminación. Podemos observar en la ilustración 14 como al variar  $J_L$ , la corriente  $I_{sc}$  varía proporcionalmente a  $J_L$ . En cuanto a la potencia (ilustración 15), cuanto mayor la  $J_L$  mayor potencia también. Es decir, cuanto mayor iluminación, mayor potencia.

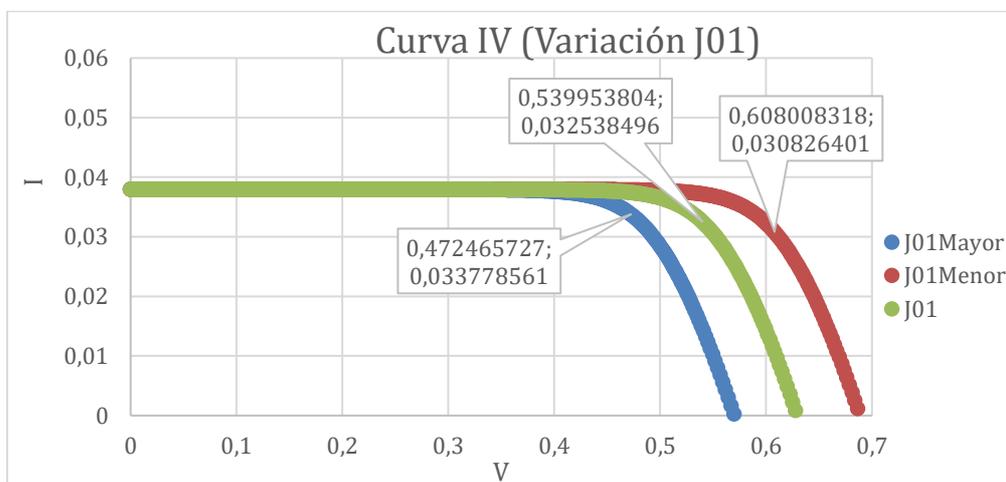
## 2. CAMBIO DE $J_{01}$

**Tabla 4: Cambio a un valor mayor de  $J_{01}$**

P_max (W)	Voc(mV)	FF	$J_L$ (A/cm <sup>2</sup> )	$J_{01}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$J_{02}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh ( $\Omega$ )	Rs ( $\Omega$ )	n1	n2
16.21	570	74.85	0.038	$1e^{-11}$	$1e^{-9}$	10000	1.2	1	2

**Tabla 5: Cambio a un valor menor de  $J_{01}$**

P_max	Voc(mV)	FF	$J_L$ (A/cm <sup>2</sup> )	$J_{01}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$J_{02}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh	Rs	n1	n2
20.42	689	78.01	0.038	$1e^{-13}$	$1e^{-9}$	10000	1.2	1	2



**Ilustración 16: Curva IV al variar  $J_{01}$**

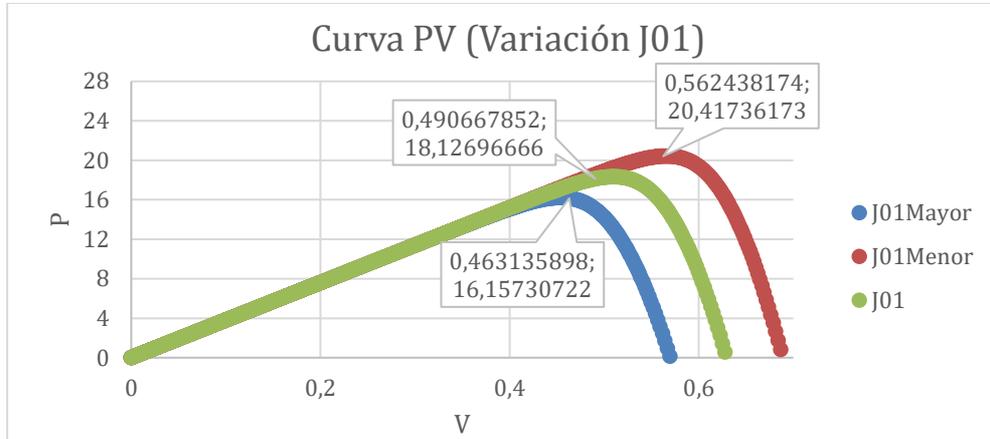


Ilustración 17: Curva PV al variar J01

En este caso, se va a variar el valor de J01, es decir el valor de la corriente que pasa por el primer diodo. Cuanto mayor es la corriente por el diodo menor es la  $V_{oc}$  y cuanto menor corriente, mayor  $V_{oc}$ . Con la potencia pasa exactamente lo mismo, cuanto mayor J01, menor potencia. Si lo comprobamos con J02, que corresponde a la corriente del segundo diodo, ocurre exactamente lo mismo.

### 3. CAMBIO DE Rsh

Tabla 6: Cambio a un valor mayor de Rsh

P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
18.35	630	76.66	0.038	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	<b>100000</b>	1.2	1	2

Tabla 7: Cambio a un valor menor de Rsh

P_max	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh	Rs	n1	n2
15.78	625	66.44	0.038	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	<b>100</b>	1.2	1	2

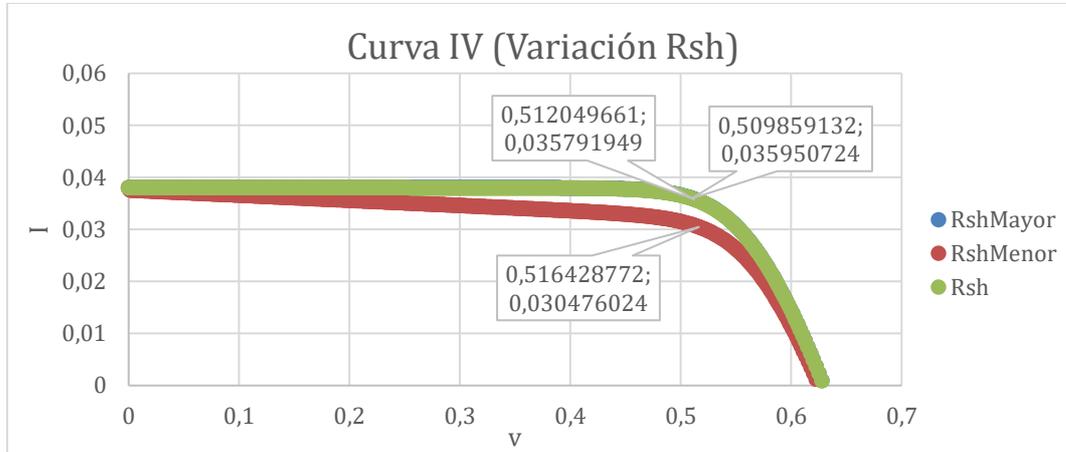


Ilustración 18: Curva IV al variar Rsh

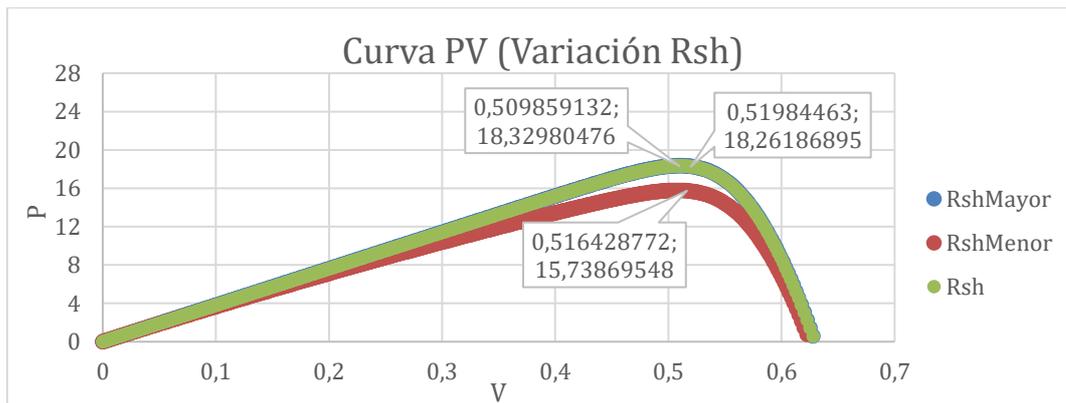


Ilustración 19: Curva PV al variar Rsh

Si hablamos de la Rsh (resistencia paralelo), como se ha mencionado anteriormente, sabemos que cuando la resistencia tiene un valor a mayor de 1000 ohms, no hay cambios y es prescindible. Eso lo comprobamos fácilmente en las ilustraciones de arriba. El problema llega cuando la Rsh es pequeña y hay fugas. En ese caso, la potencia se reduce y puede llegar a ser problemático.

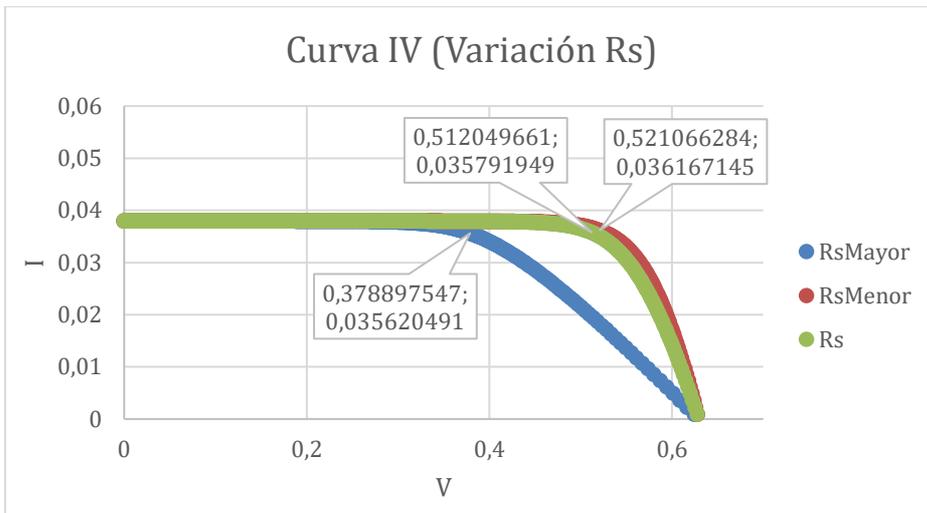
#### 4. CAMBIO DE Rs

Tabla 8: Cambio a un valor mayor de Rs

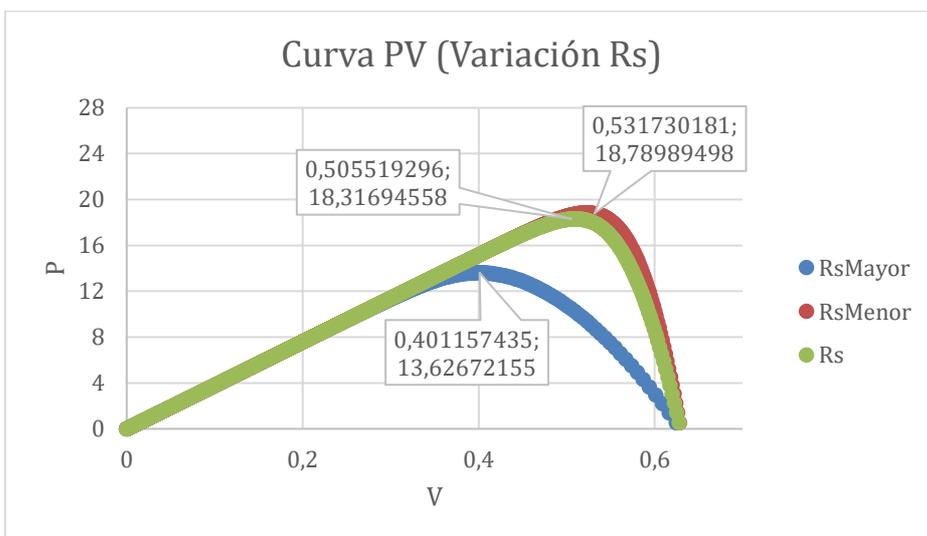
P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
13.62	630	56.92	0.038	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	10000	5	1	2

**Tabla 9: Cambio a un valor menor de Rs**

P_max (W)	Voc(mV)	FF	JL (A/cm <sup>2</sup> )	J01 (A/cm <sup>2</sup> )	J02 (A/cm <sup>2</sup> )	Rsh (Ω)	Rs (Ω)	n1	n2
18.84	630	78.72	0.038	1e <sup>-12</sup>	1e <sup>-9</sup>	10000	<b>0.8</b>	1	2



**Ilustración 20: Curva IV al variar Rs**



**Ilustración 21: Curva PV al variar Rs**

La  $R_s$  es el componente más problemático y más difícil de determinar ya que es un componente que está en serie, y en un módulo es la suma de todas las resistencias series de las células. Si la  $R_s$  es menor no hay problema, el problema real llega cuando la  $R_s$  es mayor. En ese caso, la potencia se reduce significativamente.

## 5. CAMBIO DE TEMPERATURA

**T MAYOR:**  $T = 60^\circ\text{C}$  y voltaje térmico  $V_t = 0.02888 \text{ V}$

**T MENOR:**  $T = 12^\circ\text{C}$  y voltaje térmico  $V_t = 0.02455 \text{ V}$

Cuando  $V_t = \frac{k \times T}{q}$  y donde  $q$  es la carga del electrón ( $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $T$  es la temperatura en Kelvin y  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )

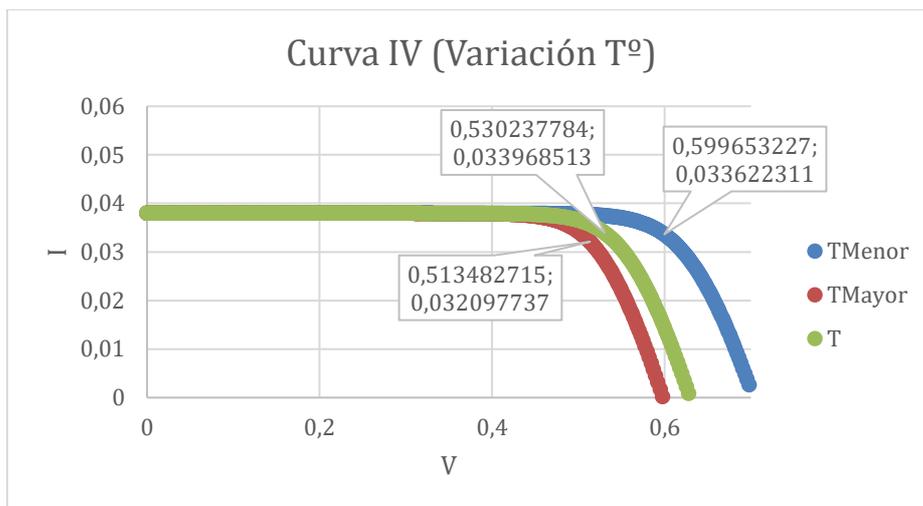
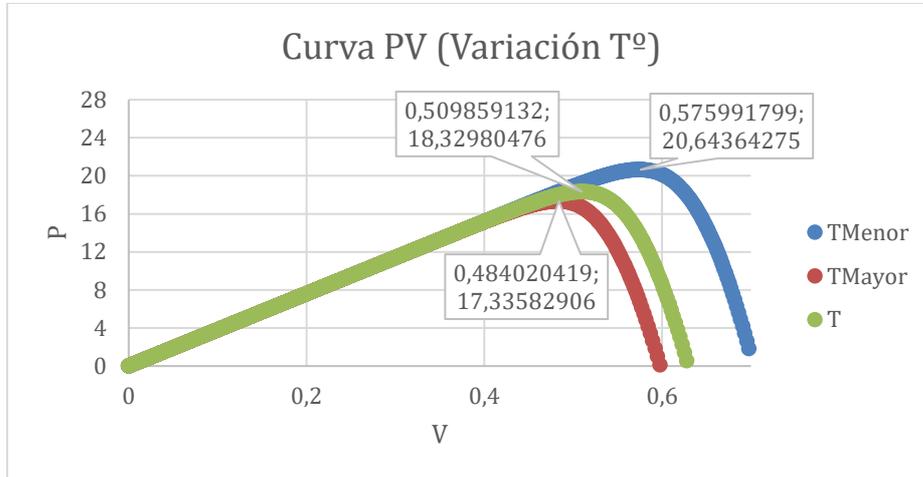


Ilustración 22: Curva IV al variar la temperatura



**Ilustración 23: Curva PV al variar la temperatura**

Cuando la temperatura aumenta, la  $V_{co}$  disminuye también y por consiguiente la potencia. Y lo mismo, pero al contrario ocurre cuando la  $T$  es menor. En conclusión, la temperatura es una variable decisiva en el correcto funcionamiento de los equipos. Por ejemplo, existe una regla básica que indica que, para un equipo dado, un incremento de  $10^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura de funcionamiento recomendada por el fabricante del mismo puede suponer una reducción del 50% de su vida de trabajo. Esta sencilla regla nos muestra cómo una temperatura excesiva puede suponer un coste importante en cuanto a equipos y mantenimiento en general. Adicionalmente, si consideramos que los paneles solares son elementos donde se integran un gran número de células semiconductoras, el calentamiento generado en una célula defectuosa puede dar lugar al deterioro de las células agravándose el problema conforme pasa el tiempo.

## 7.-ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

---

Para la detección de defectos en un módulo, se conocen varias estrategias, tanto técnicas como numéricas. En este apartado se va a estudiar y evaluar estrategias para la determinación y cuantificación de los defectos en células individuales incluidas en un módulo fotovoltaico. Entre los modelos numéricos existen, por ejemplo, el modelo físico y el modelo de operación de módulos, pero también existen técnicas, como la electroluminiscencia o la termografía. En este proyecto se ha desarrollado un nuevo método al que llamamos modelo 9 parámetros. A continuación, se va a explicar por separado cada modelo y técnica y se va a evaluar sus ventajas e inconvenientes enfocándose en analizar el esfuerzo que se necesita, lo que son capaces de analizar y a qué nivel.

### 7.1.- ELECTROLUMINISCENCIA

Como se ha explicado en el apartado 5, la electroluminiscencia es un sistema de funcionamiento que consiste en aplicar voltaje sobre los módulos fotovoltaicos para comprobar que el flujo de corriente es el apropiado. Las células emiten una luz infrarroja que es captada por la cámara de electro luminiscencia. Las que funcionan adecuadamente aparecen brillantes en la imagen de la cámara, las que están dañadas muestran un color oscuro. De esta manera, los módulos que pasan el control de calidad son los que muestran una distribución de corriente uniforme. La medición a través de electroluminiscencia permite detectar posibles errores de fabricación, así como daños producidos durante el transporte, en tan sólo unos minutos. Estos test de electroluminiscencia perfeccionan los métodos de control de calidad ya existentes, que incluyen cámaras climática y flash, y medidas a largo plazo como una planta propia de pruebas que cuenta con una superficie de 3.000m<sup>2</sup>. [20]

**Ventajas:** Es capaz de captar que célula de todo el módulo es la dañada y es capaz de cuantificar el origen de dicho fallo. Además, no es nada costoso ya que con solo una imagen se puede sacar toda información.

**Inconvenientes:** En la imagen capturada solo se observa un mapa de tensiones por lo que la información es reducida. Asimismo, es capaz de hacer barridos de tensiones, pero a cambio mucho tiempo.

### 7.2.-TERMOGRAFÍA

Cuando una célula está averiada o no genera energía porque no recibe la radiación del sol, se puede polarizar de forma inversa pasando a comportarse como una carga en vez de un generador, lo cual puede implicar una alta disipación de calor. Dependiendo de la estructura del panel fotovoltaico y dado que las células se conectan en serie para lograr la tensión más adecuada para el inversor utilizado, un fallo en una de las células podría dar lugar a una pérdida total o parcial de potencia de un panel fotovoltaico. En cualquiera de los casos, este tipo de

problema supone una disminución del rendimiento del panel. Esta situación es fácilmente detectable si se utiliza una cámara termográfica.

La cámara termográfica captura simultáneamente una imagen térmica totalmente radiométrica junto con una imagen de luz visible superponiéndolas píxel a píxel con diferentes grados de fundido. La imagen así obtenida va a mostrar, por un lado, las temperaturas de la superficie de los objetos mostrados, en este caso los paneles fotovoltaicos, a través de una paleta de colores seleccionable por el usuario que presentará con diferentes colores las diferentes temperaturas, y, por otro lado, una imagen de luz visible que facilite la identificación de los elementos. Gracias a la imagen térmica podremos ver el sobrecalentamiento de las células defectuosas. Las condiciones más favorables para la detección de este tipo de problemas serán aquellas en las que el panel proporcione la máxima potencia, normalmente al mediodía en un día despejado.

La inspección de paneles fotovoltaicos con una cámara termográfica se puede realizar tanto desde la parte frontal como desde la parte posterior del panel. En este último caso se presenta la ventaja de que se evitarán problemas relacionados con reflejos solares o aquellos derivados de la baja emisividad asociada a la superficie cristalina del panel. [21]

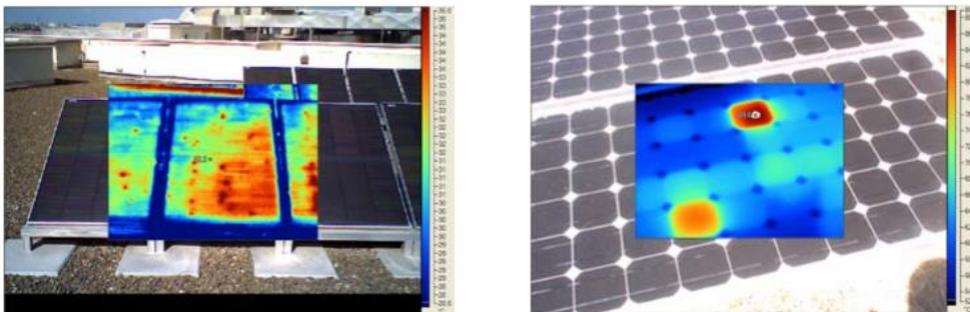


Ilustración 24: Paneles solares que presentan múltiples puntos y zonas calientes

**Ventajas:** La ventaja principal es que al igual que la luminiscencia, es una técnica rápida y no es costosa ya que solo consiste en capturar una imagen.

**Inconvenientes:** Esta técnica es capaz de localizar un solo error, exactamente, el de sobrecalentamiento o puntos calientes, por lo que la información que te da es mínima. Además, solo indica un valor (la tensión de operación) y no es capaz de decir que tipo de defecto tiene, ni puede cuantificarlo.

## 7.3.-CURVAS I-V

En un módulo fotovoltaico las curvas I-V son fundamentales. Estas dan mucha información de cómo están funcionando las células y utilizándolas eres capaz de detectar si existe algún error como se ha analizado en el apartado 6.4. Pero existen diferentes métodos o herramientas y cada cual, proporciona una información distinta, más o menos completa. Los modelos son los siguientes:

### 7.3.1.-MODELO FÍSICO

El modelo físico o el modelo de 5 parámetros permite representar con total precisión la característica corriente-tensión de la célula solar. Para su obtención se precisa medir un mínimo de unos 30 valores I-V, o valores de la corriente obtenidos cada 20 o 30 mV y equiespaciados desde cortocircuito hasta la tensión de circuito abierto. Sin embargo, estos parámetros conducen a expresiones trascendentes y complejas de generalizar al caso de módulos compuestos por diversas células o por sistemas con muchos módulos, salvo en el caso en que se presuponga que todas las células solares son idénticas y están afectadas por idénticas condiciones de iluminación y temperatura. La ecuación completa y compleja es la siguiente:

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \frac{V + I \times R_s}{V_T} - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \frac{V + I \times R_s}{2 \times V_T} - 1 \right) - (V + I \times R_s) \times G_{sh}$$

Muchas veces con 3 parámetros es más que suficiente, solo se necesita la  $R_s$ ,  $I_{01}$  e  $I_L$ . A este modelo se le denomina el modelo de 3 parámetros y es un modelo más simple. El inconveniente que presenta es que solo sirve si todas las células o módulos son similares y si están en las mismas condiciones de funcionamiento.

**Ventajas:** Es la herramienta más precisa y la que más información proporciona. Es capaz de detectar el error y cuantificarlo.

**Inconvenientes:** El mayor inconveniente es que es la técnica más costosa, ya que para hacer las mediciones hay que desconectar el módulo y medirlo en un laboratorio. En muchos casos, se usan laboratorios móviles. Además, su modelo numérico es muy complicado y como las células están en serie es inviable trabajar con ecuaciones tan complejas.

### 7.3.2.-MODELO DE OPERACIÓN DE MÓDULOS

Desde el punto de vista del usuario del módulo fotovoltaico el conocimiento de sus características máximas y de la potencia entregada es más que suficiente. Para eso se usan sólo 3 parámetros: corriente de cortocircuito,  $I_{sc}$ , tensión de circuito abierto,  $V_{oc}$ , y potencia entregada,  $P_o$ , o equivalentemente el factor de forma, FF, relacionado con los anteriores por:

$$FF = \frac{P_o}{V_{oc} I_{sc}}$$

Puesto que los datos son sólo 3, también lo son ahora los componentes circuitales y la ecuación que describe el comportamiento de la célula viene dado por:

$$I = I_{sc} \left( 1 - \exp \frac{V + I \times R_s - V_{oc}}{m \times V_T} \right)$$

El paso desde el modelo de tres parámetros,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  y FF, a tres elementos circuitales es simple, teniendo en cuenta que el generador de corriente tendrá un valor de  $I_{sc}$ , el diodo una corriente de saturación de

$$I_{sat} = \frac{I_{sc}}{\exp \frac{V_{oc}}{m \times V_T}}$$

y el factor de forma puede calcularse por:

$$FF = FF_0 \left( 1 - \frac{I_{sc} \times R_s}{V_{oc}} \right)$$

con

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}; \quad v_{oc} = \frac{V_{oc}}{m \times V_T}$$

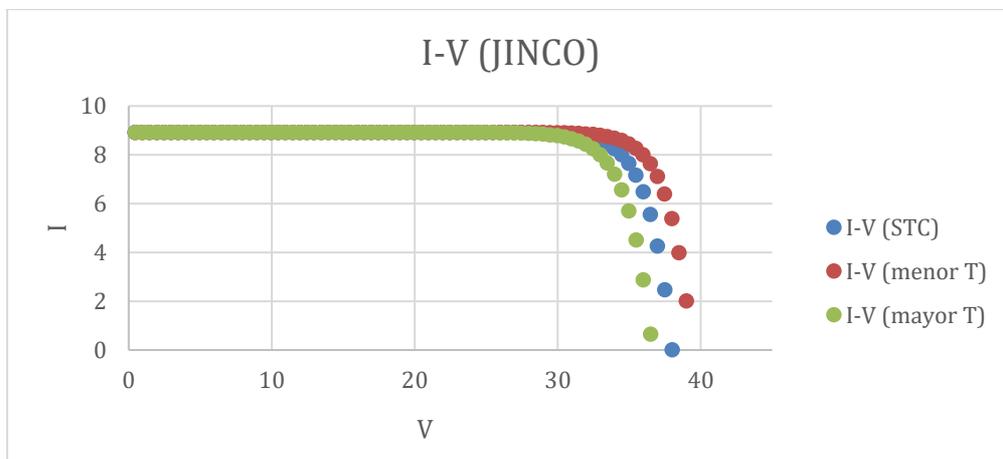
Por consiguiente, con las especificaciones que proporciona el fabricante se pueden representar las curvas I-V y comprobar si funcionan correctamente. Es decir, puedo recomponer la gráfica y detectar variaciones. Por ejemplo, se puede apreciar las curvas recompuestas en las ilustraciones 26 y 27 con un cambio de temperatura e iluminación. Las fórmulas que se usan para recomponer las curvas del módulo son las siguientes:

$$I = I_{sc} \times \left( 1 - \exp \left( \frac{Vm - V_{oc}m}{numcelserie \times Vm \times V_T} \right) \right)$$

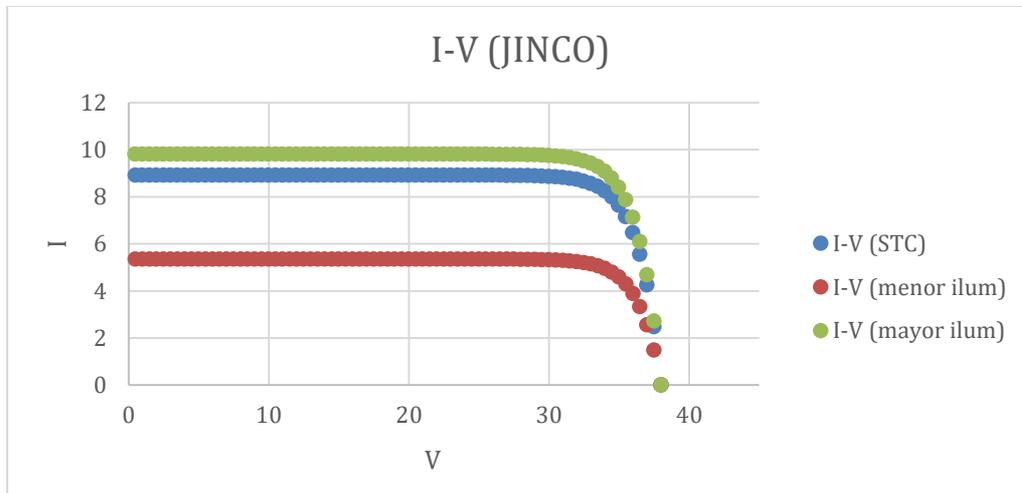
$$V = Vm - I \times Rs$$

ESPECIFICACIONES										
Tipo de módulo	JKM255PP		JKM260PP		JKM265PP		JKM270PP			
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT		
Potencia nominal (Pmáx)	255Wp	190Wp	260Wp	194Wp	265Wp	198Wp	270Wp	202Wp		
Tensión en el punto Pmáx-VMPP (V)	30.6V	28.1V	31.1V	28.3V	31.4V	28.7V	31.7V	29.0V		
Corriente en el punto Pmáx-IMPP (A)	8.28A	6.75A	8.37A	6.84A	8.44A	6.91A	8.52A	6.97A		
Tensión en circuito abierto-VOC (V)	38.0V	35.0V	38.1V	35.1V	38.6V	35.3V	38.8V	35.6V		
Corriente de cortocircuito-ISC (A)	8.92A	7.22A	8.98A	7.26A	9.03A	7.31A	9.09A	7.35A		
Eficiencia del módulo (%)	15.58%		15.89%		16.19%		16.50%			
Temperatura de funcionamiento (°C)					-40°C~+85°C					
Tensión máxima del sistema					1000VDC (IEC)					
VALORES máximos recomendados de los fusibles					15A					
Tolerancia de potencia nominal (%)					0~+3%					
Coefficiente de temperatura de PMAX					-0.40%/°C					
Coefficiente de temperatura de VOC					-0.30%/°C					
Coefficiente de temperatura de ISC					0.06%/°C					
TEMPERATURA operacional nominal de célula					45±2°C					

**Ilustración 25: Ejemplo de especificaciones de un fabricante Jinko de módulos fotovoltaicos**



**Ilustración 26: Curva I-V con modelo de operación Jinko y variación de temperatura**



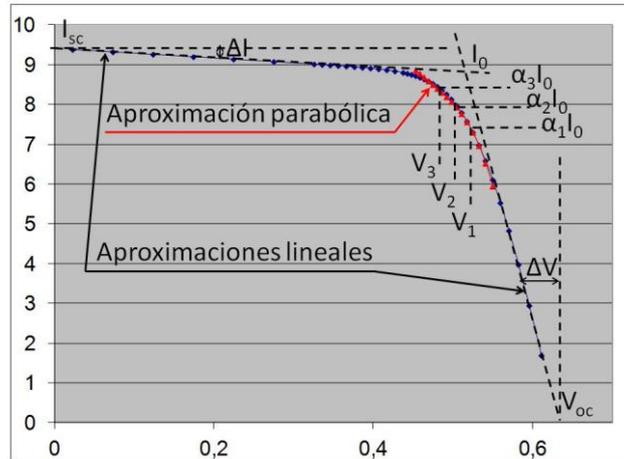
**Ilustración 27: Curva I-V con modelo de operación Jinco y variación de iluminación**

**Ventajas:** Es un modelo compacto y sencillo que solo con 3 datos ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y FF) se puede recomponer la curva I-V y detectar alguna anomalía.

**Inconvenientes:** La mayor desventaja es que la cantidad de información que te proporciona es muy reducida. Solo es capaz de decir si el módulo funciona correctamente o incorrectamente. No es capaz de detectar en que célula está el error, ni cuantificarlo.

### 7.3.3.-MODELO 9 PARÁMETROS

El modelo 9 parámetros es la herramienta que se propone en este trabajo. Este modelo no se basa en los principios físicos que rigen en las células o en los módulos solares sino en sus características de operación y como se relacionan sus tensiones y corrientes. El modelo necesita hasta un máximo de 9 parámetros, pero solo 5 parámetros serían suficientes para describir el funcionamiento de la célula solar.



**Ilustración 28: Modelo detallado de los 7 puntos I-V del modelo de 9 parámetros**

La ilustración anterior muestra el detalle de los 7 puntos que se miden en el primer cuadrante de la curva I-V de una célula o módulo solar:

- La corriente de cortocircuito:  $I_{sc}$
- La tensión de circuito abierto:  $V_{oc}$
- El decremento de corriente a una tensión fija sobre el punto de cortocircuito ( $1/3 V_{oc}$ ):  $\Delta I$
- El decremento de tensión a una corriente fija sobre el punto de circuito abierto ( $1/3 I_{sc}$ ):  $\Delta V$

Con estos cuatro puntos se generan dos modelos lineales que simulan el comportamiento de la célula o el módulo desde cortocircuito o circuito abierto. La intersección de ambos modelos se produce en el punto  $I_0$ , que se obtiene por:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - 3\Delta I}{1 - \frac{9\Delta I \Delta V}{V_{oc} I_{sc}}} \cong I_{sc} - 3\Delta I \left(1 - \frac{3\Delta V}{V_{oc}}\right) \cong I_{sc} - 3\Delta I$$

A partir del punto  $I_0$  se miden los valores de la tensión de la célula a tres valores de corriente,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , fijados por coeficientes fijos,  $\alpha_1 I_0$ ,  $\alpha_2 I_0$  y  $\alpha_3 I_0$ , obteniéndose las tensiones  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ . De estos tres puntos de tensión medidos se obtiene un modelo parabólico de la forma:

$$V = a + b \times I + c \times I^2$$

La obtención de los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  es inmediata a partir de los valores de  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  y de los coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$ . Así, por ejemplo, para  $\alpha_3 - \alpha_2 = \alpha_2 - \alpha_1 = \Delta\alpha$  se obtiene:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{V_3(\alpha_1\alpha_2^2) + V_1(\alpha_3\alpha_2^2) - 2V_2(\alpha_1\alpha_2\alpha_3)}{(\alpha_1\alpha_2^2) + (\alpha_3\alpha_2^2) - 2(\alpha_1\alpha_2\alpha_3)} \\
 b &= -\frac{V_3(\alpha_1 + \alpha_2) + V_1(\alpha_3 + \alpha_2) - V_2(\alpha_1 + 2\alpha_2 + \alpha_3)}{2(\Delta\alpha)^2 I_0} \\
 c &= \frac{V_3 + V_1 - 2V_2}{2(\Delta\alpha)^2 I_0^2}
 \end{aligned}$$

De los coeficientes a, b y c se obtiene directamente la potencia entregada por la célula y su posición en la curva corriente tensión:

$$\begin{aligned}
 P_o &= I_m V_m \\
 I_m &= \frac{b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{-3c} \\
 V_m &= I_m \frac{b}{3} + \frac{2}{3}a
 \end{aligned}$$

El modelo parabólico con dos tramos lineales presenta un error sobre el modelo físico inferior al 5% en todo el tercer cuadrante (de tensión positiva y corriente saliente) e inferior al 0,5% en la determinación de la potencia entregada. En el caso de que la determinación de los parámetros a, b y c se haga en regiones muy alejadas del punto de máxima potencia, por ejemplo, usando  $\Delta\alpha=0,1$  el error en la determinación de la potencia entregada se muestra menor del 5%. También los parámetros a, b y c se relacionan fácilmente con los parámetros del modelo de características a través de:

$$\begin{aligned}
 R_{seff} &= R_s + 2 \frac{V_T}{I_{SC}} \\
 c &= -\frac{(V_m - R_{seff} I_m)^2}{4I_m^2 (V_{OC} - R_{seff} I_m - V_m)} \\
 a &= 2V_m + c \times I_m \\
 b &= \frac{V_m}{I_m} - 2 \cdot c \times I_m
 \end{aligned}$$

Por lo que una vez obtenidos es fácil encontrar su variación con las diferentes condiciones de operación: iluminación y temperatura.

El modelo propuesto tiene por ventaja el que los parámetros de cualquier agrupación serie de células o de módulos se pueden obtener por sumas de los parámetros de sus células o módulos integrantes, incluso en el caso en que estos sean diferentes entre sí, lo que no puede hacerse con ningún otro modelo.

El modelo resulta especialmente útil para detectar fallos individuales en ristas de células, módulos o agrupaciones en serie de estos. De la simple curva I-V del módulo es inmediato recomponer la curva I-V de la célula. Pero también es posible obtener la característica individual de cada célula. Por ejemplo, manteniendo todas las células en oscuridad salvo una de ellas, la célula bajo test, es posible obtener la respuesta de esa célula en concreto. Pero, puesto

que todas las células están en oscuridad y están conectadas en serie no será posible extraer ninguna corriente del conjunto, así que la única característica de estática que podrá obtenerse de la célula bajo test será la de Voc-Isc. De esta característica se puede obtener la característica completa de la célula salvo su resistencia serie. Además, no siempre es sencillo el forzar la oscuridad de todo el módulo salvo de una célula. La otra estrategia consiste en mantener una iluminación uniforme en todo el módulo, como se puede encontrar en módulos en campo, y provocar una iluminación de diferente magnitud para la célula bajo test y de este modo, observar solamente la curva de la célula bajo test y detectar cualquier anomalía.

**Ventajas:** Este modelo es sencillo matemáticamente y es capaz de obtener la  $R_s$  de una célula, cosa que las demás técnicas no. Con este modelo se puede obtener el error, cuantificarlo y detectar en que célula se encuentra. Al estar desconectado de la física, es necesario volver al modelo físico para obtener los resultados, pero en este caso ya lo tienes desglosado y sabes dónde hay que buscar. Además, puedes obtener los parámetros del módulo con la suma de los parámetros de las células y eso no lo puede hacer ningún otro modelo.

**Inconvenientes:** El problema que tiene es que es una técnica costosa, ya que hay que ir célula por célula representando su curva y observando individualmente cualquier anomalía. Por consiguiente, lo que se necesita es bastante tiempo.

## 7.4.- ELECCIÓN DE ALTERNATIVA

La elección de la alternativa depende de la información que se necesita saber. Por ejemplo, el método de operación de módulo va dirigido al usuario de una planta que solo necesita comprobar si existe algún fallo. Al trabajador le da igual donde esté el fallo, lo que le interesa saber es si funciona o no, entonces con la información que le proporciona este método es más que suficiente.

En cambio, al fabricante le interesa saber dónde está el fallo y cuantificarlo. Necesita saber cuál es el problema y ponerle fin para no generar pérdidas. La mejor alternativa y la que más éxito tiene actualmente es la luminiscencia. Es el método menos costoso y con el que se puede obtener el error de la célula dentro de un módulo de una manera sencilla. La termografía, por otro lado, da mucha menos información y solo vale en caso de puntos de calor.

Otro método que se puede utilizar es el físico. Este permite detectar cual es el defecto, pero con mucho más esfuerzo que la otra alternativa. El problema de esta herramienta que solo se puede saber dónde está el fallo en caso de que la anomalía sea homogénea en todas las células porque no puedes saber exactamente en qué célula sucede, ya que las células están en serie y es inviable usar sus fórmulas.

En este proyecto se ha elegido el modelo de 9 parámetros. Este modelo no es el más ventajoso, de hecho, como se ha mencionado, es la luminiscencia. Sin embargo, esta herramienta cubre un sector que no cubre ninguna de las demás alternativas. Este modelo detecta el origen de los problemas de un módulo y muestra que células son erróneas. Y no solo eso, también es capaz de descubrir la causa de dicho error, mediante el uso de un cálculo matemático sencillo.

Para poder resumir este apartado de un modo más claro y visual, a continuación, se proporciona una tabla con las alternativas y los criterios que se han seguido durante el análisis. En la tabla se realiza una comparación, siguiendo unos criterios, de las alternativas mencionadas previamente, proporcionando un valor numérico. Estos números significan lo siguiente:

- 1 → MUY POCO
- 2 → POCO
- 3 → BASTANTE
- 4 → MUCHO

**Tabla 10: Selección de alternativas**

		<b>CRITERIOS</b>			
		<b><i>COSTE (ESFUERZO)</i></b>	<b><i>INFORMACIÓN QUE APORTA</i></b>	<b><i>CAPAZ DE ANALIZAR</i></b>	
<b><u>ALTERNATIVAS</u></b>	<b><i>ELECTROLUMINISCENCIA</i></b>		1	3	3
	<b><i>TERMOGRAFÍA</i></b>		1	1	1
		<b>FÍSICO</b>	4	4	3
	<b><i>CURVAS I-V</i></b>	<b>OPERACIÓN DE MÓDULOS</b>	2	1	1
		<b>9 PARÁMETROS</b>	2	4	4

## 8.-RESULTADOS

En este apartado se va a simular el comportamiento completo de módulos solares que incluyan células solares con algún defecto y se va a estudiar cómo afectan a la característica global de éste. Además, se va a diseñar e implementar a nivel básico de prototipo un sistema que permitan realizar la detección de los defectos en las células de un módulo. Este sistema es al que hemos llamado modelo de 9 parámetros, explicado en el apartado anterior.

Para empezar, es importante tener en cuenta que es un método numérico sencillo para la detección de fallos, por lo tanto, es importante aplicar las fórmulas correctamente. Primero se va a explicar en un Excel con un ejemplo de un fabricante de módulos (Jinco justamente) como se puede recomponer la misma curva I-V utilizando esta herramienta. Seguidamente, se va a utilizar el programa Ltspice, en la que se va a simular un módulo con varias células en serie, en el cual, se forzará una célula errónea. Gracias a este método, lograremos detectar que célula es la errónea, simulando a diferentes iluminaciones la curva de dicha célula y comprobando que nos da una curva desigual al resto.

### 8.1.- RECOMPONER CURVAS I-V

El primer lugar, se va a comprobar que es posible recomponer una curva de una célula perfectamente. Para ello, primeramente, se logra la curva I-V y se dispone a obtener los puntos clave.

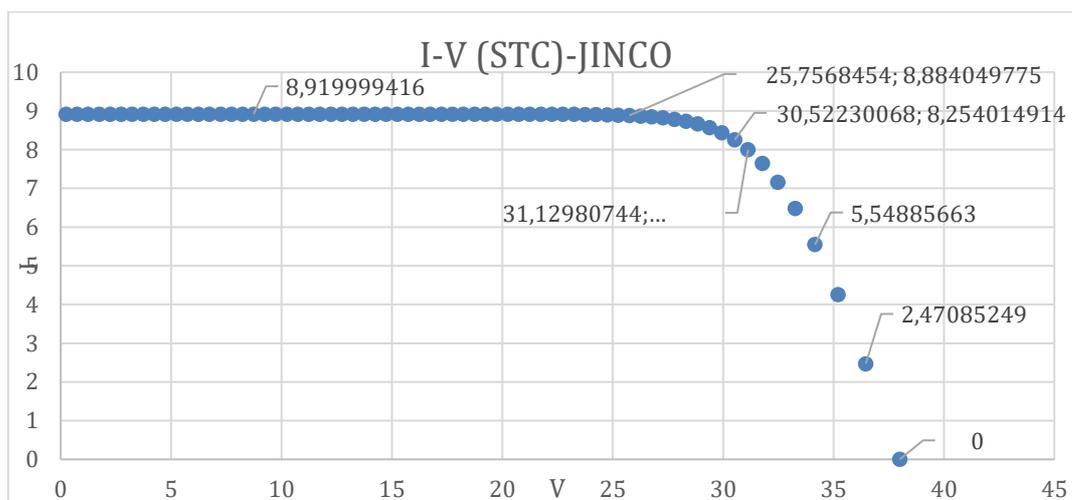


Ilustración 29: Curva I-V de Jinco que se va a recomponer

**Tabla 11: Valores de los puntos método 9 parámetros**

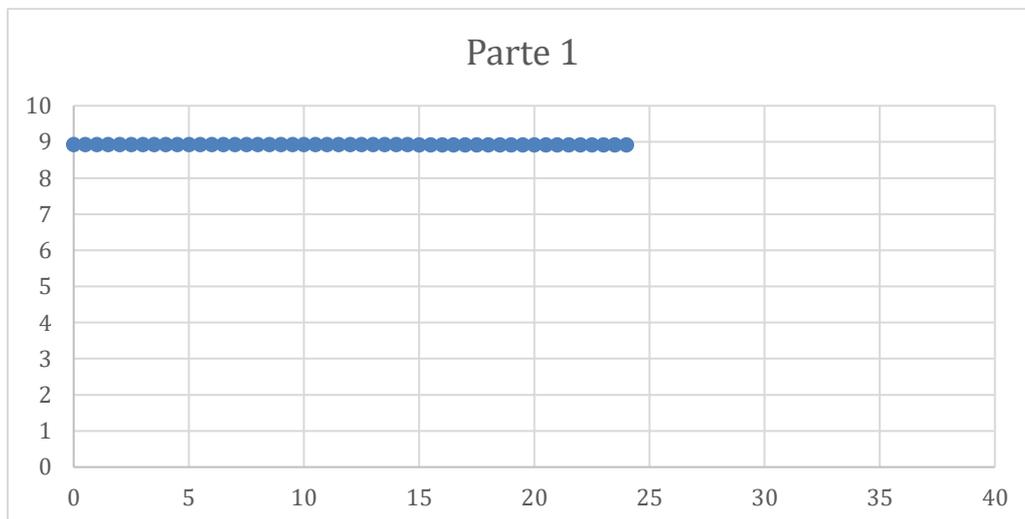
Voc	Isc	I0	$\alpha_3$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	V3	V2	V1	$\Delta I$
38	8.92	8.917	1	0.95	0.9	25.75	30.52	31.13	0.001
$\Delta V$	$\Delta \alpha$	Isc/3	Voc/3	Ipx	Vocpx	I3	I2	I1	
2.5	0.05	2.973	12.666	8.919	35.5	8.917	8.471	8.025	

Una vez hemos obtenido los puntos y los datos necesarios de la curva I-V, hay que aplicar las ecuaciones explicadas en el análisis de alternativas y recomponer la curva en 3 partes, dos lineales y una parabólica.

Para la primera parte de la curva, tenemos que aplicar esta ecuación:

$$I = I_{sc} - \frac{V}{V_{oc}} \times 3\Delta I$$

con valores de V desde 0 hasta que empiece la curva parabólica. En este caso V va desde 0 V a 24 V cada 0.5 V.

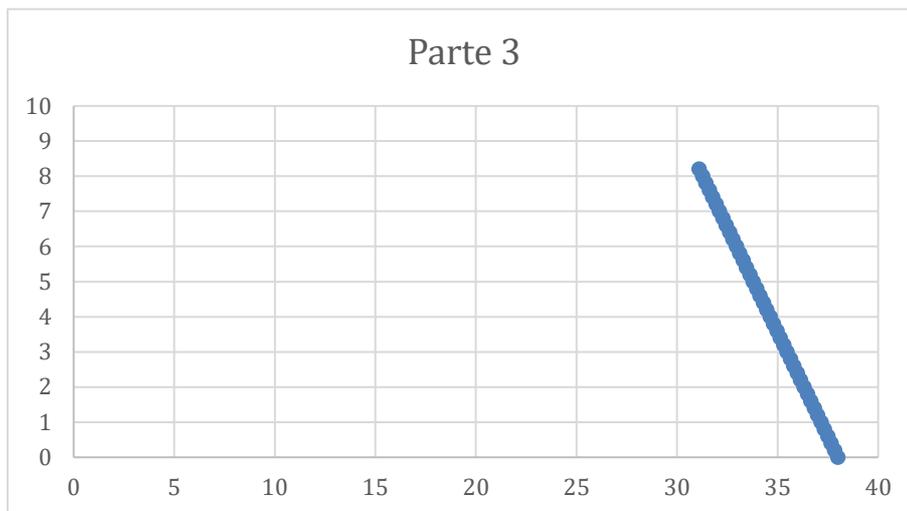


**Ilustración 30: Primera parte de la curva**

La tercera parte también es lineal, y es un símil de la primera parte. En este caso la ecuación que se usa es la siguiente:

$$V = V_{Oc} - \frac{I}{I_{sc}} \times 3\Delta V$$

con valores de I, desde que acaba la curva parabólica, hasta 0 A, es decir, es este caso, desde 8.2 A hasta 0 A, cada 0.2 A.



**Ilustración 31: Tercera parte de la curva**

Finalmente, hay que recomponer la parte parabólica. Para esta parte, es necesario utilizar los datos previamente obtenidos de la curva I-V (representados en la tabla 10) y aplicar las fórmulas para obtener los parámetros a, b y c.

$$a = \frac{V_3(\alpha_1\alpha_2^2) + V_1(\alpha_3\alpha_2^2) - 2V_2(\alpha_1\alpha_2\alpha_3)}{(\alpha_1\alpha_2^2) + (\alpha_3\alpha_2^2) - 2(\alpha_1\alpha_2\alpha_3)} = -669.25$$

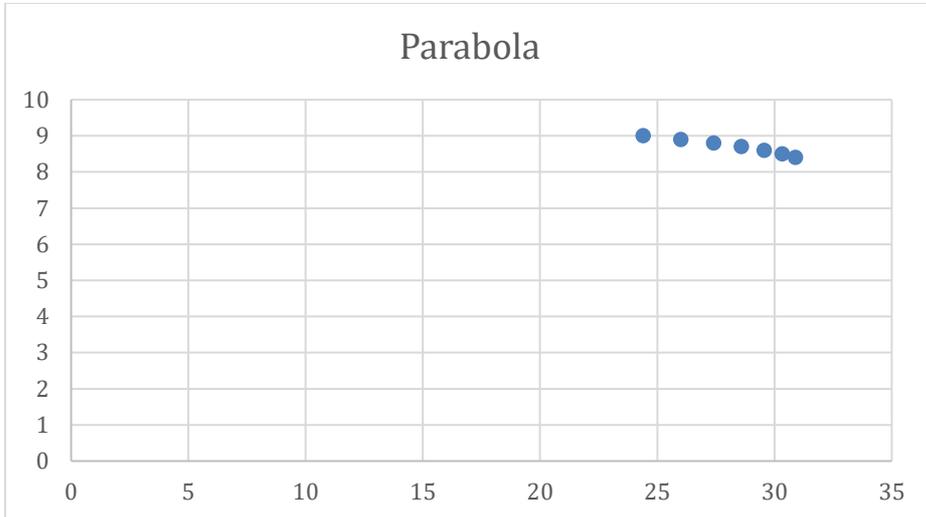
$$b = -\frac{V_3(\alpha_1 + \alpha_2) + V_1(\alpha_3 + \alpha_2) - V_2(\alpha_1 + 2\alpha_2 + \alpha_3)}{2(\Delta\alpha)^2 I_0} = 171.25$$

$$c = \frac{V_3 + V_1 - 2V_2}{2(\Delta\alpha)^2 I_0^2} = -10.46$$

Una vez obtenidos estos parámetros, nos disponemos a sacar la tensión con la ecuación

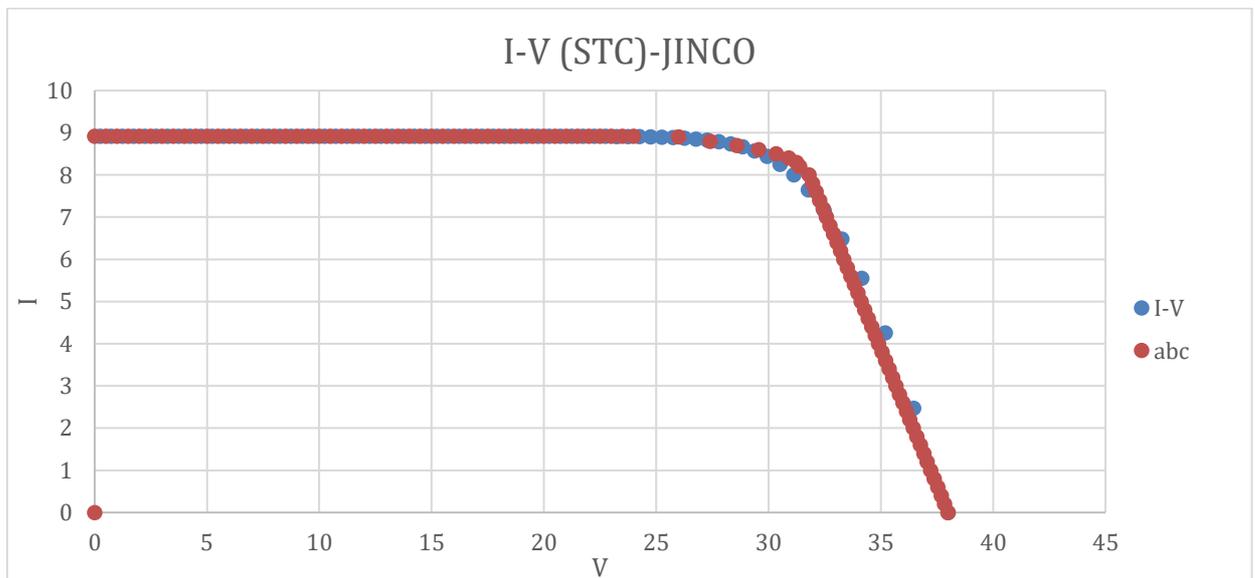
$$V = a + b \times I + c \times I^2$$

con I desde  $I_{sc}$  hasta que termina la parábola, en este ejemplo, va desde 8.9 A hasta 8.4 A cada 0.1 A.



**Ilustración 32: Parte parabólica de la curva**

Una vez obtenidos los 3 partes, es sencillo construir la gráfica. En conclusión, se ha demostrado que es una herramienta capaz de reconstruir una curva I-V con un mínimo error.



**Ilustración 33: Curva recompuesta con  $\Delta\alpha= 0.05$**

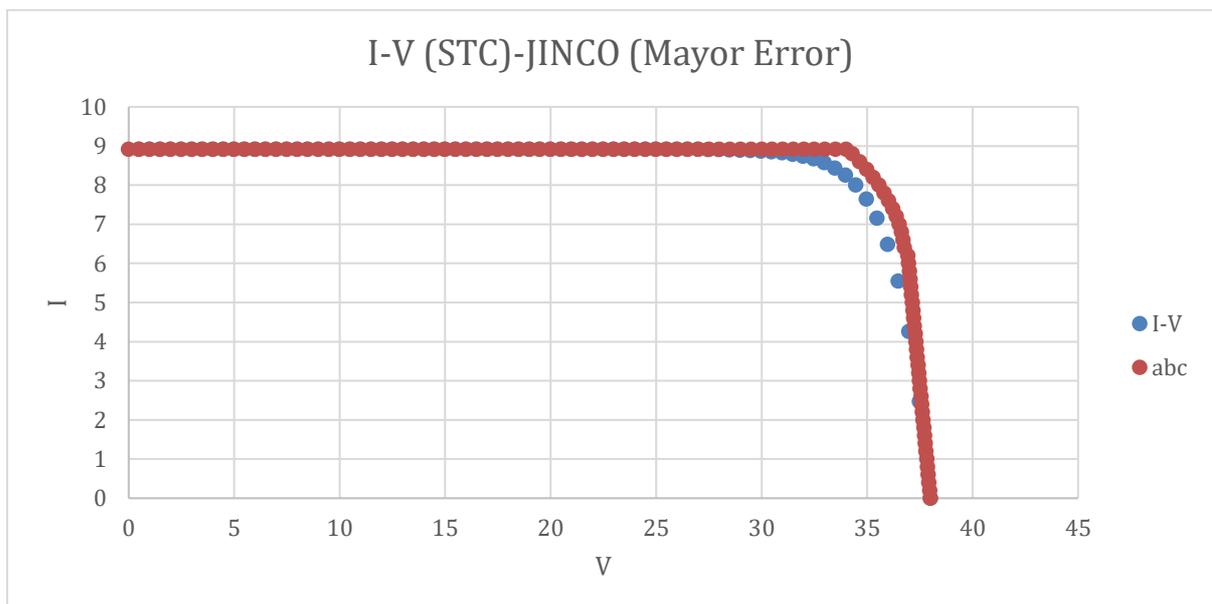
Para validar de una manera más clara, se puede obtener  $I_m$  e  $V_m$  y comprobar si los resultados son correctos.

$$I_m = \frac{b + \sqrt{b^2 - 3ac}}{-3c} = 8.36 \text{ A}$$

$$V_m = I_m \frac{b}{3} + \frac{2}{3}a = 31 \text{ V}$$

Como podemos comprobar en la ilustración 25, en las especificaciones del fabricante, se puede ver que son los valores correctos.

Una parte importante de este mecanismo numérico es elegir bien los  $\alpha$ , ya que, si los elegimos muy grandes, el error es bastante grande. La mejor opción es utilizar un  $\Delta\alpha = 0.05$ . En la ilustración siguiente, se utilizó el mismo proceso, pero con una  $\Delta\alpha = 0.1$ , y se puede apreciar que el error es bastante más grande.



**Ilustración 34: Curva recompuesta con  $\Delta\alpha = 0.1$**

También podemos ver como varían los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ , dependiendo de la iluminación y la temperatura y recomponer sus gráficas. Si comparamos estas curvas con las ilustraciones 26 y 27, vemos que el error es muy pequeño.

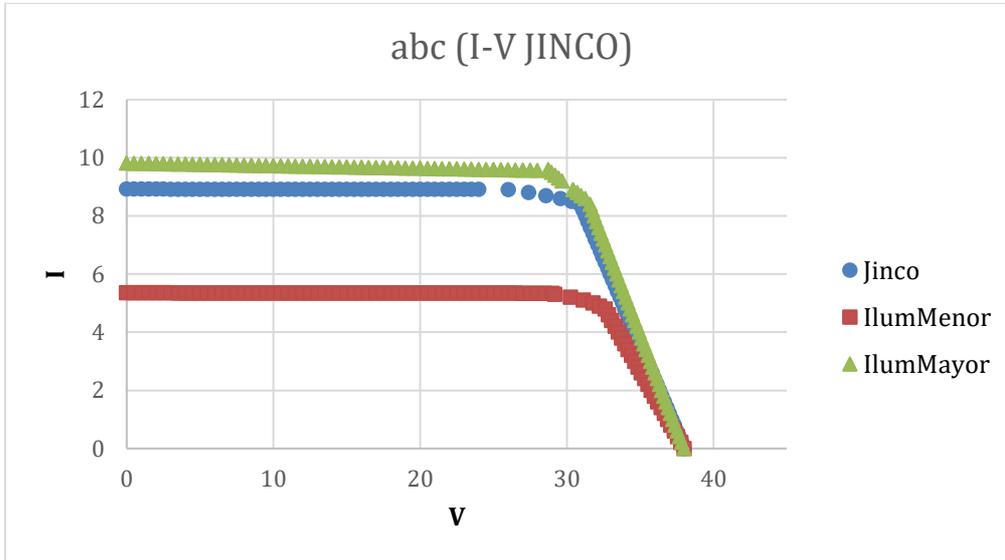


Ilustración 35: Curvas recompuestas con variación de iluminación

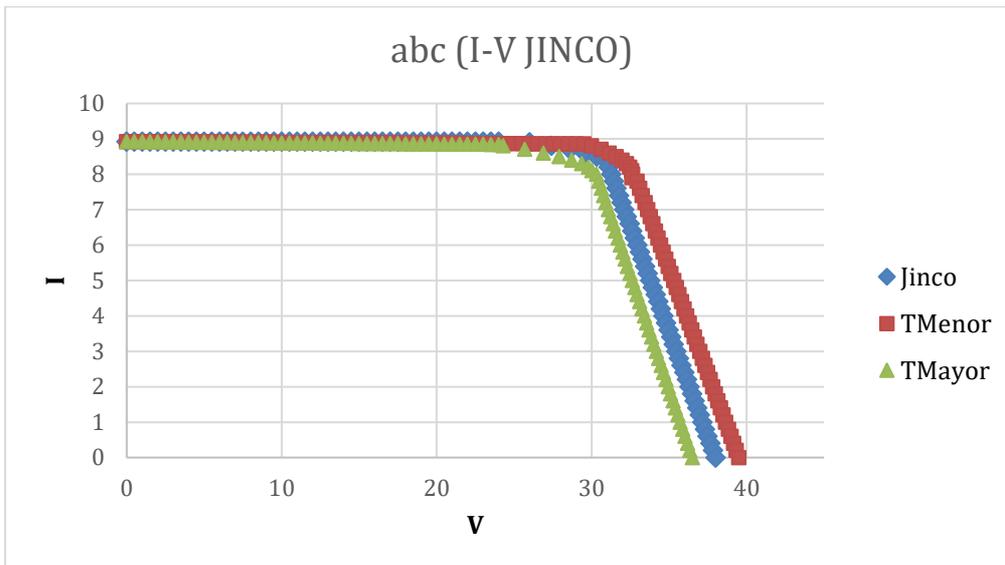


Ilustración 36: Curvas recompuestas con variación de temperatura

Tabla 12: Variación de los parámetros a,b,c según la temperatura y la iluminación

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
<b>Jinco</b>	-669.25	171.25	-10.46
<b>IlumMayor</b>	78.62	-8.19	0.31
<b>IlumMenor</b>	-198.73	97.77	-10.33
<b>TMayot</b>	-584.7	153.3	-9.56
<b>TMenor</b>	-226.21	64.78	-4.05

## 8.2.- CURVA I-V DE LA CÉLULA DEFECTUOSA MEDIANTE LTSPICE

Por otra parte, este método es capaz de detectar una célula errónea dentro de un módulo y cuantificar el error de una manera sencilla. Para poder validar y comprobar que efectivamente funciona, vamos a utilizar el programa Ltspice en el que simularemos un módulo con una célula errónea provocada por nosotros y comprobaremos como se detecta el error. Lo vamos a comprobar en 2 casos: para detectar Rsh e Isat2.

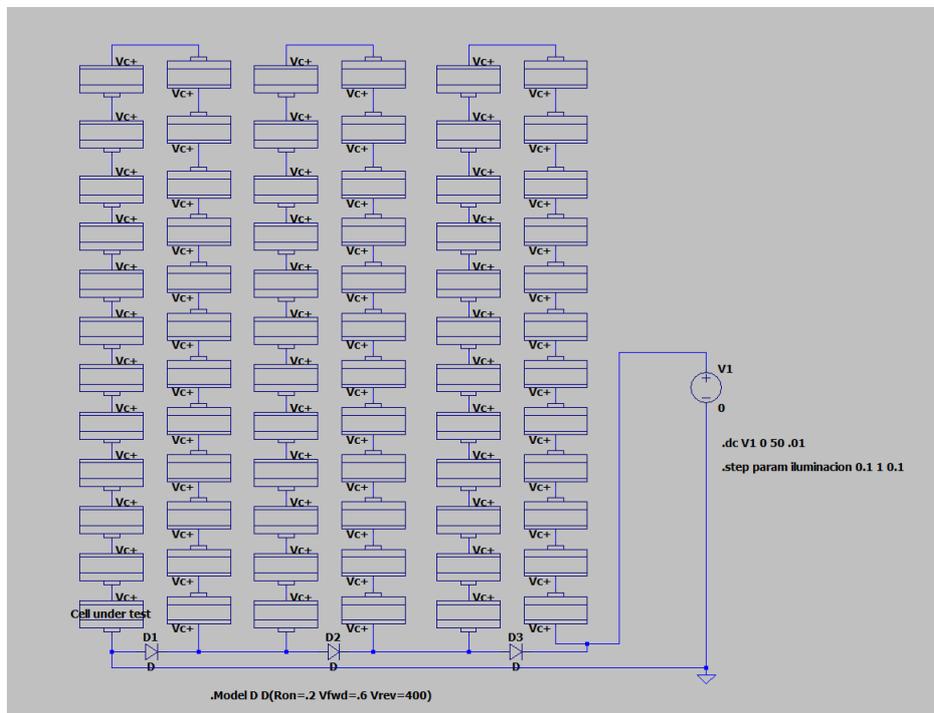


Ilustración 37: Circuito del módulo con Ltspice

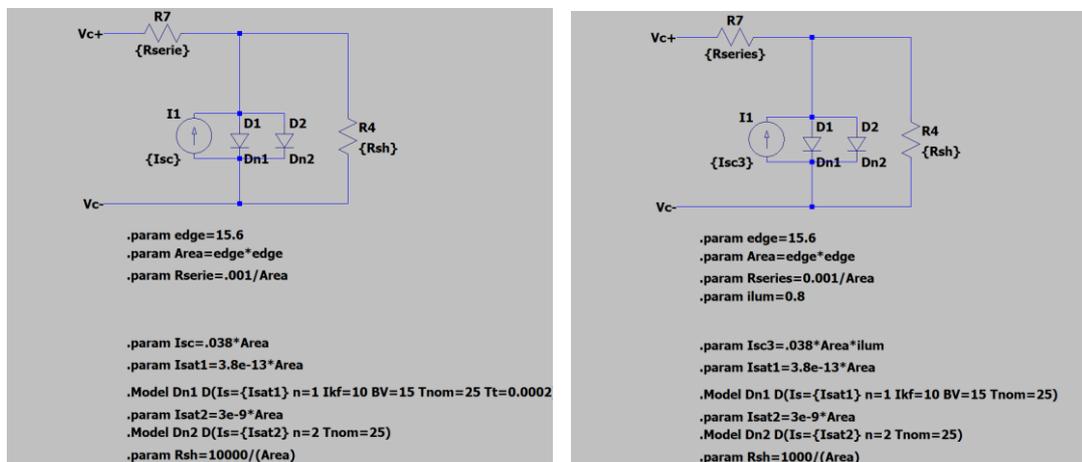
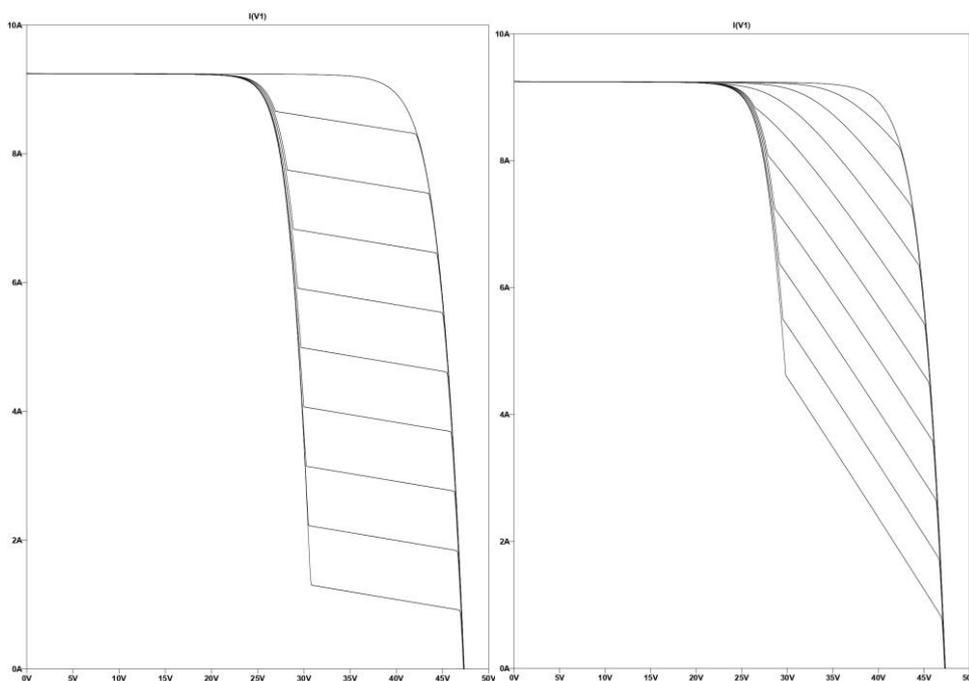


Ilustración 38: Circuitos de las células- izquierda: célula, derecha: célula test con Rsh menor

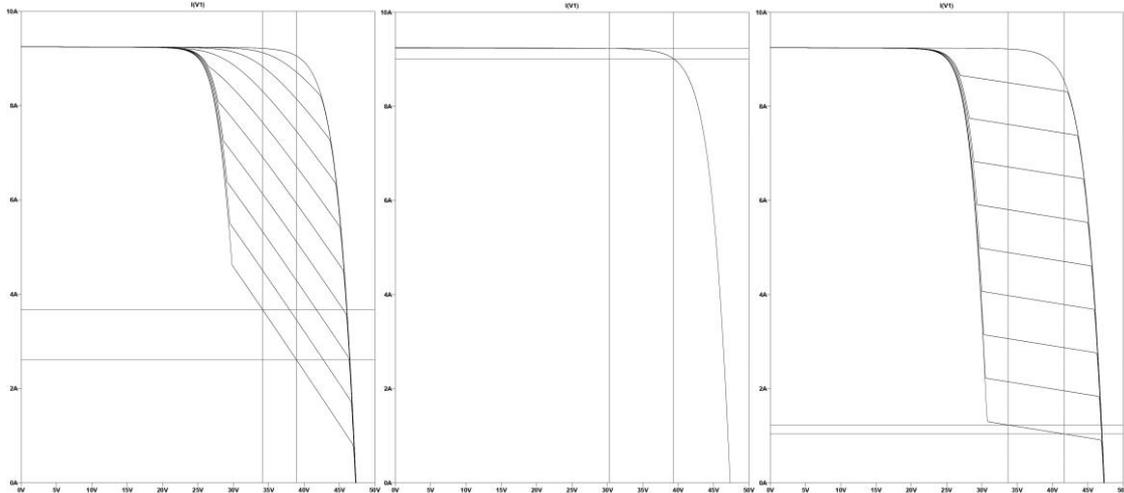
Para empezar, se va a simular un módulo con 72 células en serie, en el que una de ellas la iremos variando y de esta manera, poder cuantificar esa variación, que, a efectos prácticos, es un error. Primeramente, se va a empezar variando la resistencia paralelo y ver como esta afecta a las curvas I-V. Para la realización de las curvas, se va a simular con diferentes iluminaciones la célula bajo test, desde 0.1 que es la menor iluminación, hasta 1 que es la más iluminada, por tanto, en este último caso, todas las células están iluminadas por igual y la curva que observamos es la del módulo.



**Ilustración 39: Curvas I-V - izquierda: todas las células con la misma Rsh, derecha: con la célula test con Rsh menor**

En las curvas de la ilustración 39, se logra observar de que modo cambia la pendiente de la célula cuando la Rsh no sufre ningún cambio, lo que equivaldría a una célula correcta, o cuando sufre un cambio, y es ese caso tendría un fallo. Visualmente, ya podríamos saber que esa célula tiene un error, e incluso sabemos que el error es la Rsh.

Sin embargo, con esta alternativa, también somos capaces de cuantificar el error, y descubrir que valor de Rsh tiene cada célula. Para ello, necesitamos sacar las pendientes. En la ilustración 40 vemos las curvas con marcadores, con los cuales, somos capaces de sacar los puntos necesarios para obtener las pendientes. En el primer caso, examinamos la pendiente de la menos iluminada, y en cambio, en el segundo caso, sacamos la pendiente de la más iluminada, es decir, del módulo. En la tercera imagen, vamos a sacar la pendiente de la curva cuando todas las células son correctas, y de este modo comprobar que la pendiente es la que corresponde.



**Ilustración 40: Gráficas para sacar la pendiente- izquierda: curva menos iluminada Rsh menor, medio: curva más iluminada, derecha: curva menos iluminada Rsh igual en todas**

Como se ha explicado previamente, tenemos que sacar las pendientes. En este caso lo vamos a hacer de la más iluminada: Los puntos son  $y_2=9.232$ ,  $y_1= 9.012$ ,  $x_2=30.30$  y  $x_1= 39.34$  y la pendiente:

$$pendiente = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = 0.024$$

A continuación, la pendiente de la menos iluminada. Los puntos son  $y_2=2.60$ ,  $y_1= 3.67$ ,  $x_2=38.94$  y  $x_1= 34.14$

$$pendiente = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = 0.22$$

Por último, la pendiente de la menos iluminada cuando todas las células son correctas. Los puntos son  $y_2=1.04$ ,  $y_1= 1.23$ ,  $x_2=41.68$  y  $x_1= 33.73$

$$pendiente = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = 0.024$$

Aquí ya podemos comprobar que la pendiente es la misma que la del módulo, con todas las células iluminadas por igual.

Una vez tenemos las pendientes, tenemos que obtener las resistencias de este modo:

$$Rsh_{célula} = Area \times \frac{1}{pendiente} = 15.6^2 \times \frac{1}{0.024} \cong 10000 \Omega cm^2$$

$$Rsh_{célula} = Area \times \frac{1}{pendiente} = 15.6^2 \times \frac{1}{0.22} \cong 1000 \Omega cm^2$$

En conclusión, hemos cuantificado las resistencias, y efectivamente la resistencia de la célula test es  $1000 \Omega cm^2$  como ya sabíamos, y la de las demás de  $10000 \Omega cm^2$ .

El segundo ejemplo que vamos a utilizar para validar esta metodología es cambiar la  $I_{sat2}$  en la célula test, es decir, la corriente de saturación que pasa por el segundo diodo a un valor mayor.

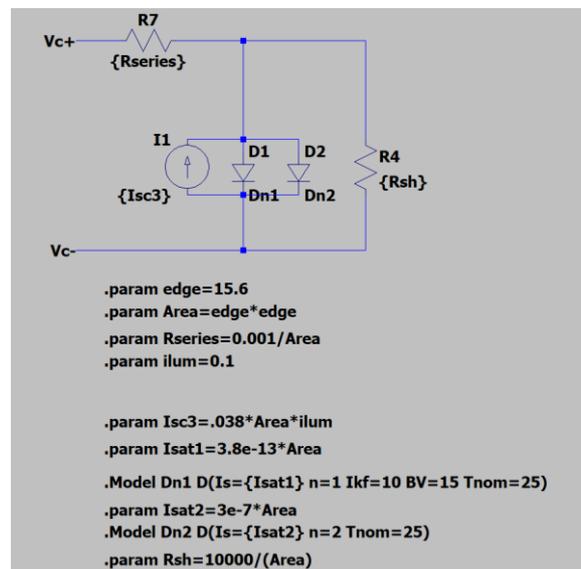
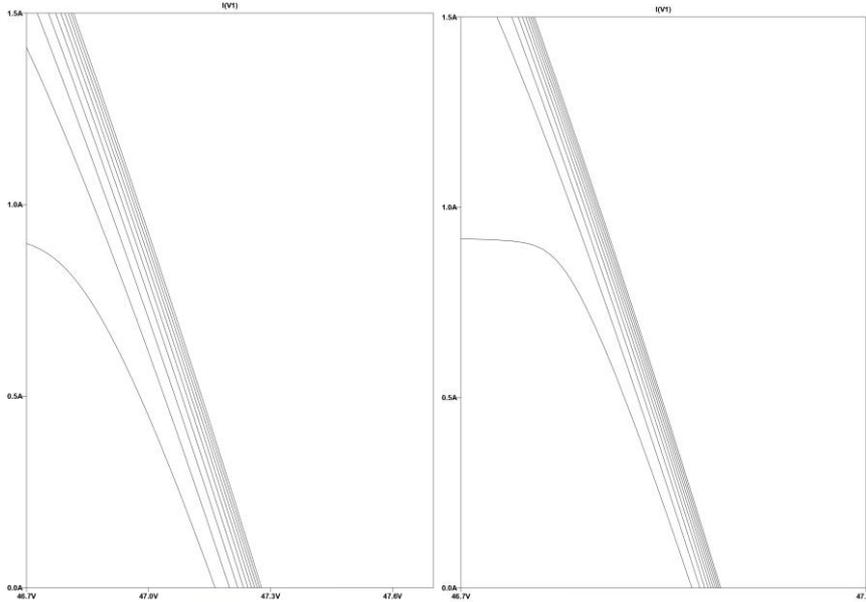


Ilustración 41: Célula test con  $I_{sat2}$  mayor

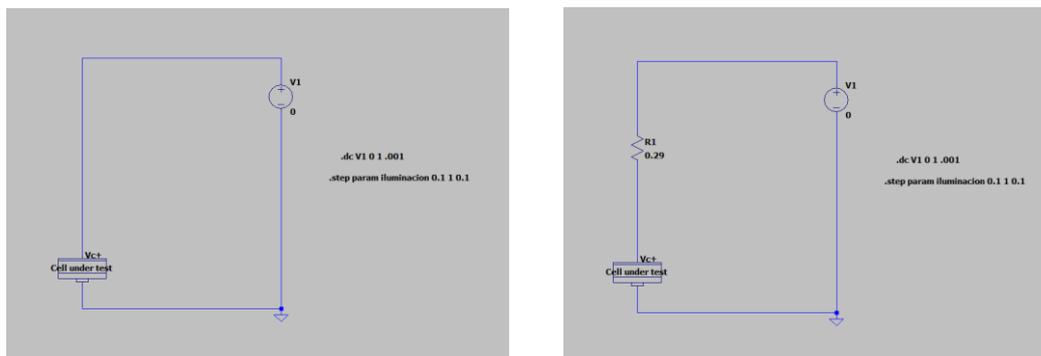
En este ejemplo, al igual que en el anterior, vamos a simular la célula test con diferentes iluminaciones y observar sus curvas. De una manera muy visual somos capaces de examinar que las dos curvas son distintas (una con todas las células iguales y la otra con la célula test). En las curvas de la ilustración 42, podemos ver este fenómeno claramente.

Para ser más precisos y comprobar que la curva que observamos es la de la célula test y no otra, seguidamente, se va a visualizar solamente la curva de la célula y se va a comparar con la obtenida con el módulo. De este modo, comprobaremos que son exactamente iguales y validaremos que somos capaces de obtener la curva de la célula que deseamos.

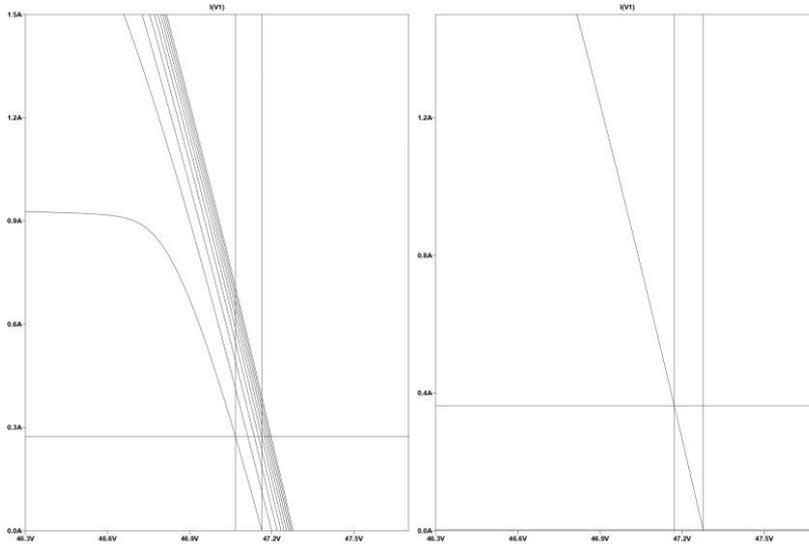


**Ilustración 42:** Gráficas de las células- izquierda: Isat2 mayor en la célula test, derecha: todas las células con el mismo Isat2

Como hemos explicado, vamos a visualizar la curva de la célula exclusivamente. Sin embargo, hay un problema, y es que la curva de la célula con el módulo, al estar en serie, tiene una pendiente distinta por la influencia de la  $R_s$  que está en serie. Por ello, vamos a obtener la pendiente y colocar una resistencia con ese valor para poder observar la curva real.



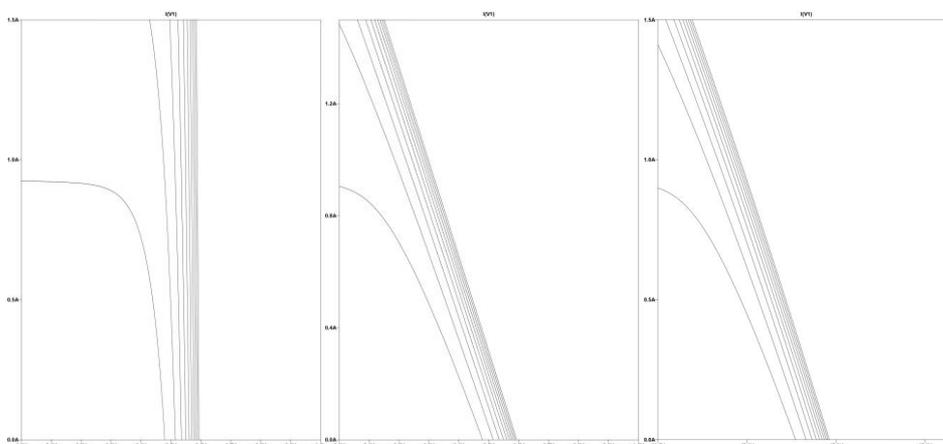
**Ilustración 43:** Circuito de solo la célula test- izquierda: sin resistencia, derecha: con resistencia



**Ilustración 44: Curvas I-V para sacar la pendiente- izquierda: curva menos iluminada, derecha: curva más iluminada**

A la hora de obtener la pendiente, es importante elegir la curva. En la ilustración 44 podemos observar las dos curvas, pero la más iluminada es la que tiene más pendiente y más lineal. Por consiguiente, es mejor obtener la pendiente de esa curva. Una vez obtenido el valor, colocamos en serie una resistencia de ese valor (ilustración 43).

$$pendiente = \frac{47.27 - 47.17}{0.345} = 0.29$$



**Ilustración 45: Curvas I-V- izquierda: curva célula sin añadir la R, medio: curva célula con la R, derecha: curva test del módulo**

En la ilustración 45, podemos examinar el cambio que se aprecia al añadir la resistencia. Además, se demuestra que las curvas obtenidas con el módulo y con la célula independiente, son las mismas. Podemos concluir que somos capaces de simular cualquier curva de cualquier célula con solo los terminales del módulo.

Por otra parte, somos capaces de reconstruir la gráfica de la célula que deseemos dentro de ese módulo, obteniendo los parámetros a,b y c de la curva de la célula y aplicando las fórmulas y la metodología explicada previamente.

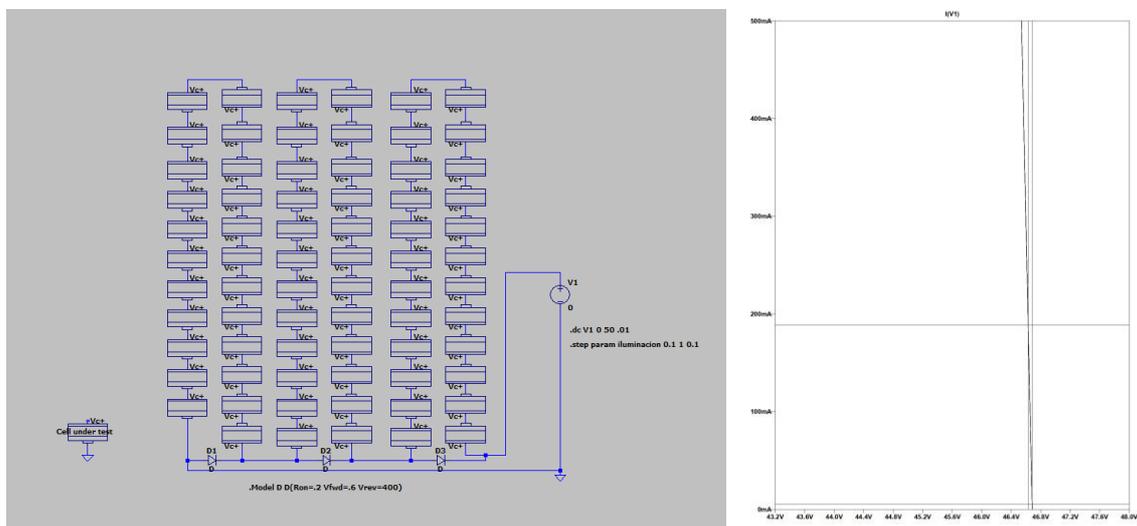


Ilustración 46: Circuito cortocircuitado- izquierda: circuito módulo, derecha: curva I-V con la pendiente de ese circuito

Para obtener los parámetros, tenemos que obtener la  $V_{oc}$  y la pendiente de todas las células, sin contar con la célula de la que queremos obtener la curva. Para ello, se cortocircuita dicha célula y la curva que se obtiene es la de todas las demás células.

$$pendiente = \frac{46.685 - 46.635}{0.170} = 0.29$$

$$V_{menosilum} = am + bm \times I + cm \times I^2$$

$$ak = am - \sum_{j \neq k} Vocj = -290.7 - 46.684 = -337.381$$

$$bk = bm + pendiente = 1548.92 + 0.29 = 1549.209$$

$$ck = cm = -1774.8$$

De este modo obtenemos los parámetros de la célula que queremos, en este caso, la de test. Una vez obtenidos, aplicamos el método explicado en la primera parte de este apartado.

## 9.-METODOLOGÍA

En este apartado se va a explicar el desarrollo de la metodología que se ha seguido durante el desarrollo del proyecto. Exactamente, primero se van a dar detalles del grupo de trabajo y de los recursos que son necesarios y seguidamente se va a proporcionar una pequeña descripción de las diferentes fases y tareas realizadas durante todo el proceso del trabajo.

### 9.1.-GRUPO DE TRABAJO

El grupo de trabajo que ha formado parte en la realización de este proyecto es el siguiente:

**Tabla 13: Grupo de trabajo**

Nombre y Apellidos	Puesto	Cometido
Izaskun Díaz de Corcuera Urretavizcaya	Ingeniera Junior	Realizar lo propuesto por el director y redactar el documento del proyecto
Juan Carlos Jimeno Cuesta	Director	Establecer un plan de trabajo, determinar objetivos y dirigir y corregir el proyecto

### 9.2.- RECURSOS

Para el desarrollo del proyecto, es necesario planificar la elección de recursos, ya que, sin ellos, no podría llevarse a cabo el desarrollo del mismo. Cuando se analiza el material necesario para realizar el proyecto, hay que tener en cuenta que cada integrante del grupo de trabajo ha necesitado los suyos propios. Los recursos materiales que han sido utilizados en este proyecto son los siguientes:

**Tabla 14: Recursos**

<b>Material</b>
Ordenador
Conexión WIFI
Impresora
Material de oficina

## 9.3.-FASES DEL PROYECTO

A continuación, se muestra cada fase incluyendo una pequeña descripción de lo que consta cada una y las tareas que incluyen cada fase.

### 9.3.1.- DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Esta primera tarea se centra en estructurar unas bases solidadas sobre las que construir el resto del proyecto. En esta fase se elige el tema del proyecto, se consulta, compra o pide la documentación necesaria para poder formarse en la materia. Esta fase consiste en la elección del objetivo final y a su vez, esto conlleva la identificación de los beneficios que va a tener el proyecto y a quién va dirigido. Por último, se acordarán los recursos, tecnologías y herramientas para su desarrollo.

### 9.3.2.- ESTUDIO INICIAL

La segunda fase consiste en profundizar los conceptos fundamentales del tema del que se desarrollará el trabajo. En este caso, entender las diferentes estructuras de células solares y sus implicaciones en términos de cómo afectan sus características eléctricas. Además, también consiste en realizar un estudio de las herramientas a utilizar en el desarrollo del proyecto. Una vez determinadas las herramientas a utilizar, se estudia y se practica con ellas.

### 9.3.3.- DESARROLLO Y DISEÑO

Esta fase denominada como fase de diseño y desarrollo consiste en realizar el proyecto siguiendo los objetivos, haciendo uso de los recursos, herramientas y tecnologías necesarias. La mayoría de tiempo empleado para todo el proyecto se centra en esta fase, ya que es el desarrollo del mismo. En este proyecto, primeramente, se implementan modelos de células solares, analíticos y numéricos que puedan ser implementadas en LTSpice o en hojas Excel. A continuación, se estudia el origen de fallos, que consiste en investigar las diferentes causas de fallos o degradaciones en células solares y como repercuten en sus características eléctricas. Finalmente, se realiza una simulación de los defectos en módulos, en la cual se puede ver el comportamiento completo de módulos solares que incluyan células solares con algún defecto y se puede estudiar cómo afectan a la característica global de éste.

### 9.3.4.- PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta tarea se evalúan diferentes casos del desarrollo utilizando diferentes valores para poder validar el planteamiento presentado en el proyecto. Para ello, se diseña e implementa a nivel básico de prototipo sistemas que permitan realizar la detección de los defectos en las células de un módulo. Una vez diseñado el demostrador, se evalúa con diferentes casos y se obtienen los resultados, los cuales se analizan y posteriormente, se usan para concluir de forma favorable.

### 9.3.5.- DOCUMENTACIÓN

En esta última fase se documenta cada uno de los pasos realizados en el proyecto. Esta fase se ha desarrollado paralelamente a cada una de las fases descritas anteriormente. Durante toda esta fase se va redactando el avance diario realizado en el proyecto. También se irá anotando todo el proceso y guardando cada una de las versiones, además de ir añadiendo las explicaciones e ilustraciones necesarias. Con todos los datos y con el análisis de los resultados obtenidos se consigue redactar el informe final.

### 9.3.6.- WBS

Para una correcta visión de las fases y tareas mencionadas anteriormente, se ha elaborado una gráfica, en la que se descomponen las fases del proyecto. A esta estructura, se le denomina Estructura de Descomposición de Trabajo (Work Breakdown Structure, WBS).

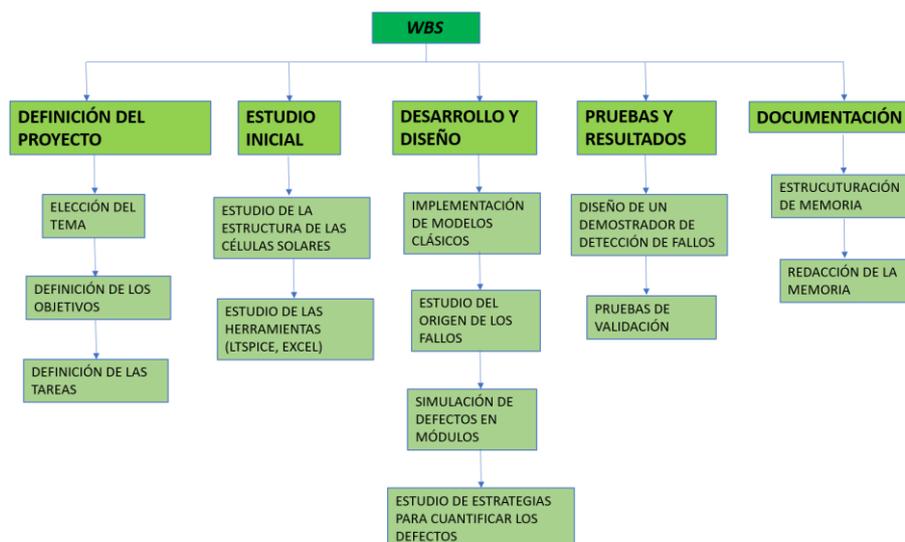


Ilustración 47: Descomposición del Trabajo (WBS)

## 9.4.-PLANIFICACIÓN

La planificación es uno de los momentos más importantes del desarrollo de un proyecto. La planificación se realiza al comienzo del proyecto para organizar el trabajo y crear una estructura de tareas que marcan el progreso de este.

Para describir las tareas se ha optado por utilizar un diagrama de GANTT. Este diagrama es una herramienta útil para planificar proyectos porque proporciona una vista general de las tareas programadas. También se indica cual es la duración programada de dichas tareas, así como los momentos de inicio y finalización de cada una de las tareas que componen el proyecto. Principalmente está formado por 2 ejes:

- El eje horizontal es un calendario en el que se representan las unidades temporales
- El eje vertical representa las tareas a realizar mediante barras horizontales que representan la duración de la tarea

Activity	Inicio	Final	Días
<b>DEFINICIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>19-02-20</b>	<b>05-03-20</b>	<b>14.0</b>
Elección del tema	19-02-20	21-02-20	3.0
Definición de objetivos	21-02-20	27-02-20	5.0
Definición de las tareas	27-02-20	05-03-20	6.0
<b>ESTUDIO INICIAL</b>	<b>05-03-20</b>	<b>06-04-20</b>	<b>24.0</b>
Estudio de la estructura de las células solares	05-03-20	30-03-20	18.0
Estudio de las herramientas (Excel, Ltpice)	30-03-20	06-04-20	6.0
<b>DESARROLLO Y DISEÑO</b>	<b>06-04-20</b>	<b>23-06-20</b>	<b>60.0</b>
Implementación de los modelos clásicos	06-04-20	28-04-20	17.0
Estudio del origen de los fallos	28-04-20	12-05-20	11.0
Simulación de defectos en módulos	12-05-20	02-06-20	16.0
Estudio de estrategias para cuantificar los defectos	02-06-20	23-06-20	16.0
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>02-06-20</b>	<b>07-07-20</b>	<b>27.0</b>
Diseño de un demostrador de detección de fallos	02-06-20	30-06-20	21.0
Pruebas de validación	30-06-20	07-07-20	6.0
<b>DOCUMENTACIÓN</b>	<b>03-03-20</b>	<b>15-07-20</b>	<b>97.0</b>
Estructuración de la memoria	03-03-20	06-03-20	4.0
Redacción de la memoria	09-03-20	14-07-20	92.0
Fin del proyecto	15-07-20	15-07-20	1.0

Ilustración 48: Descripción de las tareas del proyecto

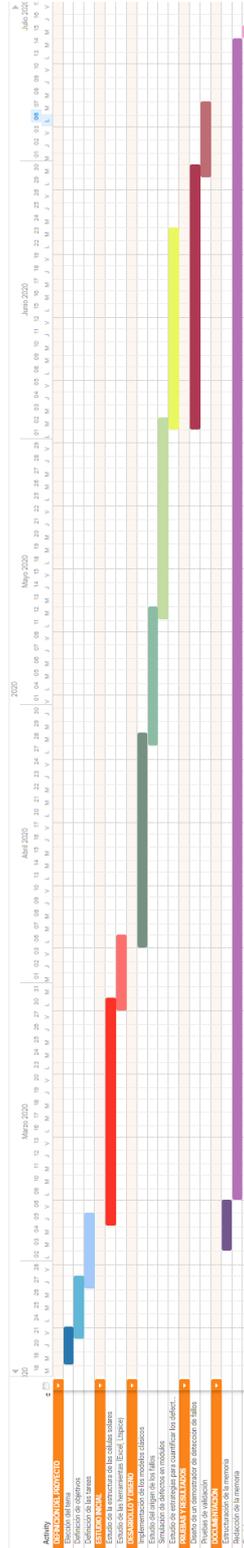


Ilustración 49: Diagrama de Gantt

## 10.- PRESUPUESTO

Es fundamental incluir un análisis de los costes del proyecto, tanto del desarrollo técnico como del despliegue del mismo.

Los costes del proyecto se dividen en diferentes secciones: horas internas, amortizaciones y gastos.

- Horas internas: son el balance de las horas que empleadas por los miembros del equipo de trabajo para la realización del proyecto (recursos humanos).
- Amortizaciones: son los activos fijos que se utilizan para el proyecto.
- Gastos: son los costes de los recursos utilizados en el proyecto y que no se puede volver a utilizar

### 10.1.-HORAS INTERNAS

Tabla 15: Recursos humanos

<i>Puesto</i>	<i>N.º de horas (h)</i>	<i>Coste (€/h)</i>	<i>Coste total (€)</i>
<b>Ingeniero Junior</b>	300	30	9000
<b>Director</b>	80	60	4800
<b>Subtotal</b>			<b>13800</b>

### 10.2.-AMORTIZACIONES

Tabla 16: Amortizaciones

<i>Recursos</i>	<i>Coste inicial (€)</i>	<i>Vida útil (h)</i>	<i>N.º de horas (h)</i>	<i>Total (€)</i>
<b>Licencia Microsoft office</b>	150	7500	200	4
<b>Ordenador portátil</b>	1000	43800	300	25
<b>Conexión internet (wifi)</b>	40 euros/mes	-	6 meses	240
<b>Impresora</b>	90	43800	1	1
<b>Subtotal</b>				<b>270</b>

### 10.3.-GASTOS

Tabla 17: Gastos

<i>Concepto</i>	<i>Coste (€)</i>
<b>Material oficina (folios, bolis, ...)</b>	25
<b><u>Subtotal</u></b>	<b>25</b>

### 10.4.-COSTE TOTAL

Tabla 18: Coste total

<i>Concepto</i>	<i>Coste (€)</i>
<b>Horas internas</b>	13800
<b>Amortizaciones</b>	270
<b>Gastos</b>	25
<b><u>Subtotal</u></b>	<b>14095</b>

En esta última tabla se representan los gastos totales necesarios para poder llevar a cabo este proyecto. En total se necesitarán aproximadamente 14095 €.

## 11.-ANÁLISIS DE RIESGOS

---

Todo proyecto está expuesto a una serie de riesgos, los cuales deben ser analizados para poder anticipar las soluciones. Los riesgos se definen como aquellos eventos que pueden tener un efecto sobre el proyecto, ya dependan directamente de los miembros del equipo de trabajo o tengan su origen fuera del equipo.

Tras su identificación se procederá a evaluar la probabilidad de ocurrencia y el impacto de cada riesgo para posteriormente representarlos en una tabla. Esto resulta de especial interés porque permite estudiar las causas y las consecuencias directas e indirectas de circunstancias que pueden reducir significativamente el éxito y futuro del proyecto.

Por último, se explicarán los planes de contingencia de cada riesgo. El objetivo de estos planes es disminuir la probabilidad de ocurrencia de los riesgos o en caso de que estos se den, establecer un plan para llevarlos a cabo.

### 11.1.-ERRORES EN EL DESARROLLO MATEMÁTICO (A)

La creación errónea del desarrollo matemático provocaría serios problemas. El tener un sistema que muestre resultados erróneos afecta a todo el proyecto. A parte de obtener resultados erróneos e incoherentes, conlleva a la incorrecta elección del mejor método para la detección de fallos, ya que se estarían empleando falsos resultados y evidencias para dicha elección.

- Probabilidad de ocurrencia: 75 %
- Impacto: 75 %

Plan de Contingencia: Una posible solución sería comprobar primeramente el desarrollo y dejar un amplio margen antes de la fecha límite del proyecto. De este modo, se tendría tiempo suficiente para corregir los errores pertinentes. Sin embargo, la mejor opción es realizar comprobaciones cada vez que se añada una nueva fórmula.

### 11.2.-SUPERACIÓN FECHA LÍMITE (B)

Siempre que se efectúa un proyecto, es muy importante el factor tiempo. Hay que tener siempre en cuenta la fecha límite, ya que, si hay retrasos y se va acercando la fecha, puede conllevar a una mala realización y ejecución del trabajo o a un cambio de planificación que repercute a todo el equipo y al trabajo en sí.

- Probabilidad de Ocurrencia: 50 %
- Impacto: 75 %

**Plan de Contingencia:** La mejor solución es establecer una planificación en la que se identifiquen, de manera clara, las tareas a realizar y las fechas de finalización de las mismas. De este modo, pueden quedar días de margen, los cuales se pueden emplear en revisiones o mejoras. Asimismo, es importante mantener un contacto con los integrantes del equipo semanalmente para un seguimiento correcto del trabajo.

### **11.3.-PERDIDA DE DATOS (C)**

En este proyecto existe el riesgo de perder los documentos o los datos de los programas utilizados. La pérdida de estos implicaría tener que volver a empezar con el proyecto. Esto dependiendo en las fechas que suceda puede conllevar al fracaso. Las posibles causas de este riesgo son: fallos del ordenador, un accidente o el no realizar un guardado después de cada cambio.

- Probabilidad de ocurrencia: 50 %
- Impacto: 100 %

**Plan de Contingencia:** La mejor solución es realizar copias de seguridad de toda la información del proyecto, como, por ejemplo, guardarlo en diferentes dispositivos o en la nube. Es importante guardar cada cambio realizado y también es recomendado que todos los miembros del equipo poseen el documento o archivo.

### **11.4.-REQUERIMIENTOS INCOMPLETOS (D)**

Uno de los riesgos más altos, es tener los requerimientos ambiguos. Las causas pueden ser no tener una idea clara y ordenada del objetivo o una comprensión errónea de este. Otra causa probable es tener una idea difusa e incompleta de los requerimientos.

- Probabilidad de ocurrencia: 50 %
- Impacto: 50 %

**Plan de Contingencia:** La solución consiste en realizar reuniones de una manera disciplinada y siempre consultar cualquier cuestión con el director del proyecto.

## 11.5.-MATRIZ PROBABILIDAD-IMPACTO

Para el claro análisis de los riesgos se va realizar una tabla llamada Matriz de Probabilidad e Impacto que se utiliza para clasificar riesgos en proyectos con base en el impacto y la probabilidad de que suceda.

Como se puede ver en la siguiente tabla, la matriz se compone de dos ejes: un eje vertical en donde se establecen los valores de probabilidad (entre bajo y alto) y un eje horizontal en donde se establecen los valores del impacto del riesgo sobre los objetivos de nuestro proyecto (en donde bajo implica que ese riesgo no repercutiría en los objetivos y alto que dificultaría en gran medida el cumplimiento de los mismos). Los colores representan la gravedad del riesgo siendo los riesgos verdes de una gravedad pequeña y a medida que se vuelven más naranja, el riesgo es más peligroso y grave, hasta llegar al color rojo.

Esta matriz es una herramienta muy útil para la gestión de proyectos ya que permite priorizar de forma muy visual los riesgos existentes en nuestro proyecto, identificando de forma clara aquellos sobre los que es necesario prestar más atención y establecer medidas de respuesta antes de que estos ocurran para intentar minimizar las repercusiones que puedan tener.

**Tabla 19: Matriz Probabilidad-Impacto**

		<i>IMPACTO</i>			
		Bajo (25 %)	Bajo-Medio (50%)	Medio-Alto (75 %)	Alto (100 %)
<i>PROBABILIDAD</i>	Bajo (25 %)				
	Bajo-Medio (50 %)		(D)	(B)	(C)
	Medio-Alto (75 %)			(A)	
	Alto (100 %)				

## 12.-CONCLUSIONES

---

El principal objetivo de este proyecto, como ya se ha mencionado con anterioridad, es desarrollar una metodología sencilla y fiable que permita cuantificar y detectar la causa de un fallo de una célula en un panel o módulo fotovoltaico. Por un lado, se ha concluido que es una metodología que permite evaluar células embebidas en un módulo con un set-up muy sencillo. También, se ha comprobado que es una herramienta muy visual y que, sin mucho esfuerzo, se es capaz de detectar cualquier anomalía pertinente. Por otro lado, una metodología de detección de defectos supondrá el reconocimiento temprano de dichos fallos iniciando así lo antes posible una reparación. La rapidez en la toma de decisión implicaría minimizar las grandes pérdidas económicas.

En este proyecto, se considera que se ha realizado un método eficaz que es capaz de obtener la curva I-V de cualquier célula dentro de un módulo y es capaz de recomponer dicha curva. Es importante también mencionar, que es un desarrollo matemático que funciona con agrupaciones de módulos o de células en serie y es el único método del mercado capaz de hacerlo. Además, se han verificado mediante dos ejemplos (tanto visualmente, como numéricamente), que es apto para cualquier tipo de situación.

En cuanto al futuro del proyecto, se considera que la metodología validada, supondrá una gran mejora en el mundo fotovoltaico, lo que hará que el uso de esta energía se eleve y de este modo, provocará que ocurra una mayor implicación de la energía renovable en el mundo. Este suceso provocará una mejora medioambiental y, además, la fotovoltaica desempeñará un papel fundamental en el cambio de modelo energético. En especial, esta alternativa está centrada en el mercado de mantenimiento de plantas fotovoltaicas, que es un mercado con mucho futuro e influyente globalmente.

En definitiva, en este proyecto, se verifica que el método de detección de la causa de los defectos es lo suficientemente fiable como para suplantar las demás alternativas comerciales, ya que muestra muy buenos resultados valiéndose únicamente de los terminales de los módulos y de un set-up muy simple.

Por último, en el proceso seguido para el desarrollo de este proyecto se ha realizado una labor de investigación sobre las células y módulos solares que ha servido para aprender nuevas técnicas de energía y la importancia de la energía solar.

## 13.-REFERENCIAS

---

[1] Energía solar - Significados.com - Octubre 2019 - <https://www.significados.com/energia-solar/>

[2] Crystalline Silicon Solar Cells Article - Martin Green – Chapter 4- Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales - September 2015

[3] Las células solares fotovoltaicas - Es Energía - Diciembre 2019 - <https://esenergia.es/celulas-solares-tercera-generacion/>

[4] Fabricación y caracterización de celdas fotovoltaicas de Pervskita de nueva Composición - Susana Ramos Terrón- Master Universitario en Ciencia y Tecnología de nuevos materiales - Junio 2018 - <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/investiga/ccs/documentos/TFM-Susana-Ramos-Terron.pdf>

[5] La célula fotovoltaica - Eloy Sobrino - Memoria - <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5493/Mem%C3%B2ria.pdf?sequ>

[6] Como funciona una célula fotovoltaica - ATERSA - <https://atersa.shop/como-funciona-una-celula-fotovoltaica/>

[7] ¿Cómo se fabrican las células solares de silicio? - Ignacio Mártel - Catedrático de electrónica de la Universidad Complutense de Madrid y miembro de la Real Sociedad Española de Física - Febrero 2018 - <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2018/02/01/como-se-fabrican-las-celulas-solares-de-silicio/>

[8] ¿Cómo funcionan las celdas fotovoltaicas? – Iluminet – Octubre 2016 -Energías Alternas -<https://www.iluminet.com/funcionamiento-paneles-fotovoltaicos-energia-solar/>

[9] ¿Cuál es la composición de un panel fotovoltaico? - Energía solar - Oriol Planas - Ingeniero Técnico Industrial especialidad en mecánica - Marzo 2020 - <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/estructura-de-un-panel-fotovoltaico>

[10] Energía Solar fotovoltaica - Energía solar - Oriol Planas - Ingeniero Técnico Industrial especialidad en mecánica - Mayo 2020 - <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica>

[11] Distribución de la cuota de mercado de las empresas fabricantes de paneles solares en 2017 - Statista - Beatriz Sevilla - Julio 2019 - <https://es.statista.com/estadisticas/600384/cuota-de-mercado-de-los-fabricantes-de-paneles-solares/>

[12] Energía solar fotovoltaica: panorama mundial - Ignacio Mártir - Noviembre 2019 - <https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/11/25/energia-fotovoltaica-panorama-mundial/>

[13] Visión Artificial - Un método muy efectivo en el control de calidad y eficiencia de células y paneles solares - INFAIMON - Junio 2019 - <https://blog.infaimon.com/vision-artificial-control-calidad-de-celulas-paneles-solares/>

[14] Análisis de la curva I-V en paneles fotovoltaicos - Eliseo Sebastián - Agosto 2018 - <https://eliseosebastian.com/analisis-de-la-curva-iv-en-paneles-fotovoltaicos/>

[15] La curva de intensidad-voltaje y la de potencia-voltaje de un panel solar - El papel del regulador de carga - Auto solar - Agosto 2018 - <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga>

[16] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering - Antonio Luque and Steven Hegedus - The Physics of the Solar Cell - Chapter 3 - Solar Cell I - V Characteristics

[17] Los problemas de los paneles solares a los que se enfrenta el poseedor de un sistemas fotovoltaico - Energy News - Esther de Aragón - Febrero 2020 - <https://www.energynews.es/problemas-de-los-paneles-solares-para-poseedor-de-sistema-fotovoltaico/#:~:text=El%20primer%20problema%20y%20uno,en%20las%20propias%20%C3%A9lulas%20solares.>

[18] Problemas que pueden afectar a la instalación solar - Hogar Sense - Christian Abele - Abril 2020 - <https://www.hogarsense.es/energia-solar/problemas-paneles-solares#dano1>

[19] Paneles Solares: defectos más frecuentes (2) - Cambio Energético - José Alonso - Abril 2020 - <https://www.cambioenergetico.com/blog/paneles-solares-defectos-mas-frecuentes-2/>

[20] Electroluminiscencia al servicio de una mayor calidad - Energías Renovable - Periodismo de las energías limpias - Diciembre 2010 - <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/electroluminiscencia-al-servicio-de-una-mayor-calidad>

[21] Utilización de la termografía en mantenimiento de plantas fotovoltaicas - FLUKE - Roberto Poyato - <https://es.rs-online.com/es/pdf/RSFLUKEELECTRICIDAD04.pdf>