



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Eléctrica

Desarrollo de un prototipo para medidas de electroluminiscencia en paneles solares

Autor:

Martín Buenaposada, Álvaro

Tutor:

González Rebollo, Miguel Ángel
Dpto. Física de la Materia
Condensada, Cristalografía y
Mineralogía

Cotutor:

Moretón Fernández, Ángel

Valladolid, Julio de 2021

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer tanto a mis padres, Jose Luís Martín Álvarez y Luisa Fernanda Buenaposada Cantalapiedra, como a mi hermana Rocío Martín Buenaposada, por todo su esfuerzo, apoyo y la confianza en mí a lo largo de todos estos años de carrera, sin ellos nada de esto habría sido posible.

Al grupo de investigación GdS Optronlab, en particular a mi tutor Miguel Ángel González Rebollo y cotutor Ángel Moretón Fernández, por darme la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado, por su ayuda y por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de todo el proceso de elaboración.

Al departamento de Ingeniería Eléctrica por su atención a lo largo de todos estos años, y en particular quiero agradecer a los profesores Julián Manuel Pérez García y José Manuel González de la Fuente por su ayuda y respuestas a todas las dudas.

A mis amigos, por ser un pilar fundamental de apoyo y acompañarme durante todos estos años.

A todos ellos, mil gracias por hacer realidad este sueño.

Resumen

Con el propósito de controlar el rendimiento de las plantas solares fotovoltaicas, existe en la actualidad un método de inspección basado en imágenes de electroluminiscencia (EL) con el principal objetivo de detectar posibles defectos en módulos fotovoltaicos para poder determinar si el panel está en condiciones óptimas para su producción o si, de lo contrario, debe reemplazarse.

El método de inspección EL es una técnica que ofrece gran cantidad de información acerca del estado del módulo, pero se debe realizar en condiciones ambientales nocturnas u oscuras originando una serie de riesgos tanto para el operario como para el módulo.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un prototipo que permite trabajar con niveles de tensión superiores a los del prototipo de partida para realizar medidas de inspección de EL diurna, reduciendo el número de conexiones y desconexiones para llevarlo a cabo, reduciendo el tiempo de inspección y adaptado para trabajar en planta.

Palabras clave: electroluminiscencia diurna (EL diurna), módulo fotovoltaico, control de polarización, inspección, prototipo.

Abstract

In order to control the efficiency of photovoltaic solar plants, it exists nowadays an inspection method based on electroluminescence (EL) images with the main objective of detecting possible defects in photovoltaic modules. In this way it is determined if the panel is in optimum condition for production or if it should be replaced if it has defects.

The EL inspection method is a technique that provides closest information about the condition of the panel, but it must be performed at night or in dark environmental conditions, which can cause certain risks for the operator and for the module.

In this Final Project a prototype has been developed with the purpose of working with higher voltage levels than those of the starting prototype. It is designed to perform daylight EL inspection measurements, reducing the number of connections and

disconnections to carry it out, shortening the inspection time and adapted to work in plant.

Keywords: daylight electroluminescence (daylight EL), photovoltaic module, polarization control, inspection, prototype.

Índice de contenidos

1. Justificación y objetivos	1
2. Fundamento teórico.....	3
2.1. La célula solar	3
2.1.1. Estructura de la célula solar	3
2.1.2. Parámetros característicos de la célula solar	4
2.1.3. Tipos de células fotovoltaicas de Silicio	6
2.2. Módulos fotovoltaicos.....	7
2.3. Métodos de inspección para identificar fallos en módulos fotovoltaicos.....	9
2.3.1. Inspección visual	9
2.3.2. Curvas I-V	10
2.3.3. Termografía infrarroja (TIR).....	12
2.3.4. Electroluminiscencia (EL).....	14
2.4. Electroluminiscencia diurna	18
2.4.1. Método desarrollado para la toma de imágenes de EL.....	19
3. Diseño de partida OPTRONBOX V1	21
3.1. Placa microcontroladora programable	23
3.2. Placa modular (shield)	25
3.3. Dispositivos de comunicación inalámbrica	25
3.4. Relé de estado sólido (SSR)	29
3.5. Radiador o disipador.....	30
3.6. Otros componentes: caja, batería, hub y conexiones.....	30
4. Construcción del prototipo OPTRONBOX V2.....	33
4.1. Componentes existentes del prototipo de partida.....	36
4.2. Nuevos componentes	37
4.2.1. Ventiladores	37
4.2.2. Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT).....	37

4.2.3. Radiador del IGBT.....	39
4.2.4. Convertidor CC/CC elevador.....	44
4.2.5. Circuito “snubber”.....	46
4.2.6. Batería solar de alimentación.....	48
4.3. Ventajas de Optronbox V2.....	49
5. Pruebas de funcionamiento realizadas.....	51
5.1. Ensayo con carga resistiva en laboratorio.....	51
5.1.1. Ensayo a 100 V:.....	52
5.1.2. Ensayo a 200 V.....	52
5.1.3. Ensayo a 300 V.....	53
5.1.4. Ensayo a 400 V.....	53
5.1.5. Ensayo a 500 V.....	53
5.2. Ensayo con módulo fotovoltaico en laboratorio.....	54
5.3. Ensayo con varios módulos fotovoltaicos en una instalación real.....	56
6. Resultados, conclusiones y trabajo futuro.....	63
7. Bibliografía.....	65

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de una célula solar de unión pn. Fuente: [1].	4
Figura 2. Curva característica IV de una célula fotovoltaica. Fuente: [1].	5
Figura 3. Estructura de los componentes que forman un módulo fotovoltaico. Fuente: [3].	8
Figura 4. Módulo fotovoltaico de silicio monocristalino (izquierda). Módulo fotovoltaico de silicio policristalino (centro). Módulo fotovoltaico de silicio amorfo (derecha). Fuente: [3].	8
Figura 5. Especificaciones principales de un módulo fotovoltaico. Fuente: [3].	9
Figura 6. Curva I-V de un módulo fotovoltaico. Fuente: [8].	11
Figura 7. Saltos en la curva IV. Fuente: [2].	11
Figura 8. Pendiente alta en tramo horizontal (HL). Fuente: [2].	11
Figura 9. Pendiente baja en el tramo descendente (DL). Fuente: [2].	12
Figura 10. Voltaje en circuito abierto menor. Fuente: [2].	12
Figura 11. Pendiente alta de HL y bajo voltaje en circuito abierto. Fuente: [2].	12
Figura 12. Imagen termográfica de un módulo fotovoltaico. Fuente: [24].	13
Figura 13. Curva de sensibilidad para los sensores CCD de Si (azul) e InGaAs (rojo) con respecto a la emisión del Si. Fuente: [11].	15
Figura 14. "Set up" para ensayo de EL en laboratorio. Fuente: [15].	17
Figura 15. Dos imágenes en cada estado de polarización. Fuente: [12].	19
Figura 16. Esquema del sistema para medición de EL. 1- Radiación solar. 2- Corriente continua inyectada al módulo fotovoltaico. 3- Filtro óptico pasa banda. 4- Cámara InGaAs. 5- Software de tratamiento de imágenes. 6- Sistema de control de la polarización del módulo fotovoltaico. 7- Fuente de alimentación. 8-Imagen final de la electroluminiscencia del módulo fotovoltaico. Fuente: [12].	20
Figura 17. Estructura interna del prototipo de partida V1 Optronbox. Fuente: propia.	21
Figura 18. Esquema unifilar del prototipo Optronbox V2. Fuente: propia.	22
Figura 19. Partes de un Arduino. Fuente: [25].	24
Figura 20. Código de programación del Arduino. Fuente: propia.	25
Figura 21. Interfaz de usuario software XCTU. Fuente: propia.	26
Figura 22. Opciones para añadir un módulo. Fuente: propia.	26
Figura 23. Ventana del icono 1 (izquierda) y ventana del icono 2 (derecha). Fuente:	

propia.	27
Figura 24. Parámetros de configuración de un módulo. Fuente: propia.....	28
Figura 25. Dirección MAC: DH (izquierda). DL (derecha). Fuente: propia.	28
Figura 26. Montaje de la placa microcontroladora, placa modular y dispositivo de comunicación inalámbrica. Fuente: propia.	29
Figura 27. Relé montado sobre el radiador y conectado al Arduino Fuente: propia.	29
Figura 28. Caja del prototipo (izquierda). Sistema de alimentación batería-hub para el Arduino (derecha). Fuente: propia.....	31
Figura 29. Estructura interna del prototipo Optronbox V2. Fuente: propia.....	34
Figura 30. Esquema unifilar del prototipo Optronbox V2 conectado a unos paneles fotovoltaicos y a una fuente de alimentación de corriente continua. Fuente: propia.	35
Figura 31. Relación entre la tensión en la puerta y la corriente que circula de colector a emisor. Fuente: [18].....	39
Figura 32. Transistor IGBT y sus terminales de conexión. Fuente: propia.	39
Figura 33. Caída de tensión puerta-emisor. Fuente: [18].	41
Figura 34. Analogía térmica con la eléctrica. Fuente: [19].	42
Figura 37. Transistor IGBT montado sobre el radiador. Fuente: propia.	44
Figura 36. Resistencias térmicas unión - encapsulado y encapsulado - radiador. Fuente: [18].	44
Figura 35. Analogía térmica con eléctrica y resistencias en serie. Fuente: [19].	44
Figura 38. Modelo eléctrico convertidor CC-CC Boost. Fuente: [26]	45
Figura 39. Convertidor CC-CC utilizado en el prototipo. Fuente: propia.	45
Figura 40. Valores de capacidad parásita para una frecuencia de 1 MHz y una tensión de puerta 25V. Fuente: [18]	47
Figura 41. Valores de capacidad parásita para una frecuencia de 1 MHz y diferentes tensiones de puerta. Fuente: [18].....	47
Figura 42. Batería solar para la alimentación del prototipo. Fuente: propia.	49
Figura 43. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 100 V. Fuente: propia.	52
Figura 44. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 200 V. Fuente: propia.	52
Figura 45. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para	

una tensión de 300 V. Fuente: propia.	53
Figura 46. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 400 V. Fuente: propia.	53
Figura 47. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 500 V. Fuente: propia.	54
Figura 48. Módulo fotovoltaico para examinar (izquierda). Imagen de EL obtenida (derecha). Fuente: propia.....	56
Figura 49. String de 44 paneles fotovoltaicos (izquierda) y estructura con seguidor (derecha). Fuente: propia.....	57
Figura 50. Motor de corriente continua para el desplazamiento de los módulos fotovoltaicos (izquierda). Sensor calibrado para el seguimiento de los módulos fotovoltaicos (derecha). Fuente: propia.	57
Figura 51. Características técnicas del módulo fotovoltaico. Fuente: propia.....	58
Figura 52. Conexión del grupo electrógeno con la fuente de alimentación de 15 kW (izquierda). Conexión del prototipo diseñado (derecha). Fuente: propia.	58
Figura 53. Vista en detalle de la pantalla de control y visualización de la fuente de alimentación. Fuente: propia.....	59
Figura 54. Imagen de EL a 1 módulo fotovoltaico con 50 (izquierda), 100 (centro) y 500 ciclos (derecha). Fuente: propia.	59
Figura 55. Imagen de EL a 12 módulos fotovoltaicos 50 (izquierda) y 100 ciclos (centro). Vista en detalle de 2 de los 12 módulos fotovoltaicos polarizados. Fuente: propia.	60
Figura 56. Imagen de EL a 6 módulos fotovoltaicos con 50 (izquierda), 100 (centro) y 500 ciclos (derecha). Fuente: propia.	60
Figura 57. Imagen de EL a 24 módulos fotovoltaicos con 50 (izquierda) y 250 ciclos (derecha). Fuente: propia.....	61
Figura 58. Vista en detalle de un módulo en concreto dentro del string de 24 módulos fotovoltaicos polarizados. Fuente: propia.	61

Índice de tablas

Tabla 1. Valores obtenidos tras el ensayo. Fuente: propia.	51
---	----

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Curva característica de una célula solar. Fuente: [1].	5
Ecuación 2. Factor de forma. Fuente: [1].	6
Ecuación 3. Eficiencia de conversión energética. Fuente: [1].	6
Ecuación 4. Potencia disipada en el semiconductor. Fuente: [19].	40
Ecuación 5. Temperatura máxima reducida. Fuente: [19].	41
Ecuación 6. Relación entre la potencia disipada y la temperatura máxima. Fuente [19].	42
Ecuación 7. Resistencia térmica unión-ambiente. Fuente: [19].	42
Ecuación 8. Relación entre la potencia disipada y la temperatura máxima, con resistencias en serie. Fuente: [19].	43

1. Justificación y objetivos

Este Trabajo fin de grado ha pretendido desarrollar un sistema de control de la polarización de módulos fotovoltaicos para la realización de medidas de electroluminiscencia en plantas solares fotovoltaicas. Este desarrollo se ha llevado a cabo en el seno del grupo de investigación GdS Optronlab del departamento de física de la materia condensada, cristalografía y mineralogía de la Universidad de Valladolid.

En primer lugar, se ha expuesto un marco teórico en el que se ha hecho un estudio bibliográfico acerca de las células solares y de los paneles fotovoltaicos, tanto de su estructura como de sus parámetros característicos, ya que se trata del elemento principal en una instalación solar fotovoltaica y al campo al que este trabajo pertenece.

Además, se ha realizado un estudio bibliográfico acerca de los métodos de inspección existentes actualmente para la caracterización de los módulos fotovoltaicos, debido a que el prototipo que aquí se va a desarrollar es imprescindible para realizar uno de estos métodos, la electroluminiscencia. Respecto a este método, se ha explicado en que consiste y más en concreto, se ha expuesto el método para la realización de medidas de electroluminiscencia diurna, en el que hoy en día muchas empresas y grupos de investigación centran su estudio debido a grandes ventajas que este método aporta.

Posteriormente, se han explicado los componentes que constituyen el prototipo ya existente desarrollado y diseñado por el grupo de investigación GdS Optronlab ya que es el dispositivo del cual se va a partir para el desarrollo del nuevo equipo.

Descrito este diseño de partida, como este Trabajo de Fin de Grado tiene el propósito de desarrollar un dispositivo para medidas de electroluminiscencia diurna, se explicarán exhaustivamente cada uno de los componentes que lo constituyen, así como la función que desempeñan.

Finalizado su desarrollo, se han realizado varios ensayos en laboratorio para comprobar que el dispositivo estaba bien construido y ningún componente presentaba problemas para soportar unos ciertos niveles de tensión y para finalmente realizar un ensayo en una instalación real con el propósito de confirmar

que el dispositivo funciona correctamente en niveles de tensión elevados para los cuales está diseñado.

Por lo anterior descrito, el principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el desarrollo de un dispositivo que permita controlar la corriente que se debe de inyectar a los módulos fotovoltaicos para polarizarlos y poder realizar medidas de inspección de electroluminiscencia en condiciones ambientales diurnas.

Como esta técnica de medida permite realizar controles durante el día, se reducen enormemente los riesgos asociados al trabajo nocturno, tanto para los encargados de realizar la inspección como para los módulos que se deseen examinar.

Como el prototipo de partida no es capaz de soportar niveles de tensión elevados y por lo tanto el número de paneles que permite polarizar es bajo, otro de los principales objetivos de este proyecto es la construcción de un dispositivo que permita la polarización de un gran número de paneles, reduciendo los tiempos asociados para realizar esta inspección y disminuyendo el número de conexiones y desconexiones que es necesario efectuar.

Por último, otro de los objetivos es desarrollar un dispositivo autónomo, fiable y ligero para que se pueda trasladar con facilidad.

2. Fundamento teórico

En este epígrafe se va a detallar la composición estructural de una célula solar, sus parámetros característicos y las diferentes tecnologías de células solares de silicio (Si). Se explicarán también las diferentes partes de las que está formado un módulo fotovoltaico de Si y las diferentes tecnologías para este material. Posteriormente se explicarán las medidas de inspección existentes hoy en día, desde las más usuales hasta la técnica más novedosa y que más información aporta acerca del estado del panel.

2.1. La célula solar

La célula solar es el elemento principal que constituye una planta solar fotovoltaica. Es el encargado de la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente sobre ella, efecto fotoeléctrico anteriormente detallado.

2.1.1. Estructura de la célula solar

Los principales elementos que forman una célula fotovoltaica tradicional se muestran en la Figura 1. La estructura de una célula solar fotovoltaicas está compuesta por [1]:

- ✚ Capa antireflexiva, también denominada capa AR: esta capa está principalmente diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. Se diseñan de tal forma que la reflectancia sea lo más pequeña posible en unas longitudes de onda determinadas.
- ✚ Malla de metalización, debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible a su interior, pero sin introducir una resistencia eléctrica. Un parámetro característico de este elemento es el factor de sombra, F_s , que representa la relación entre la superficie ocupada por la malla con respecto al área total.
- ✚ Capas activas del material semiconductor, normalmente montadas sobre un sustrato más grueso para aumentar la resistencia mecánica. Las dos regiones que forman esta capa son la unión p-n. Al tratarse de materiales semiconductores, el tipo de tecnología, la calidad, y la concentración de impurezas determinarán su rendimiento.

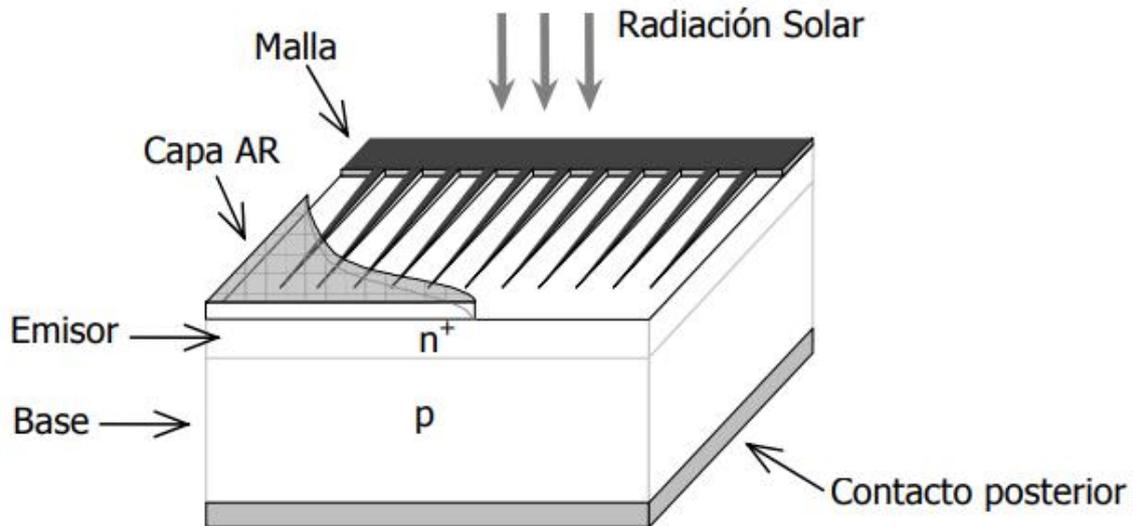


Figura 1. Estructura de una célula solar de unión pn. Fuente: [1].

- ✚ En células monofaciales, al no ser necesario que reciba luz por la cara posterior, el contacto metálico posterior se realiza sobre toda la superficie.

Con el fin de conseguir mejores rendimientos y como alternativa se han hecho modificaciones al modelo tradicional de células de silicio. Nuevos tipos de células como las de lámina fina o “*Thin-Film*”, depositadas sobre un sustrato una o varias capas delgadas de semiconductor de diferentes tecnologías para la captación de la luz solar, y aunque generalmente no tienen mejores rendimientos que las de silicio policristalino convencional, sí que tienen costes económicos inferiores y son más ligeras y flexibles. Otra de las modificaciones que se puede realizar es formar una o varias uniones p-n de distintos materiales semiconductores (*heterounión*) [1].

2.1.2. Parámetros característicos de la célula solar

Al incidir luz sobre una célula solar, si esta está conectada a una carga externa, la célula funcionará como un generador de energía con unos valores de tensión y corriente que variaran en función de las condiciones en las que se encuentre.

Las condiciones que se pueden ver en las hojas de características de un módulo solar suelen estar dadas en condiciones estándar de medida (*CES* o *STC-standard test conditions*) y están definidas a una determinada irradiancia de 1000 W/m^2 , con una distribución espectral AM1.5G y a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [2]. Estas condiciones generalmente no suelen coincidir con las que se miden en una instalación real ya que, dependiendo del día, se tiene una irradiancia y una temperatura diferente.

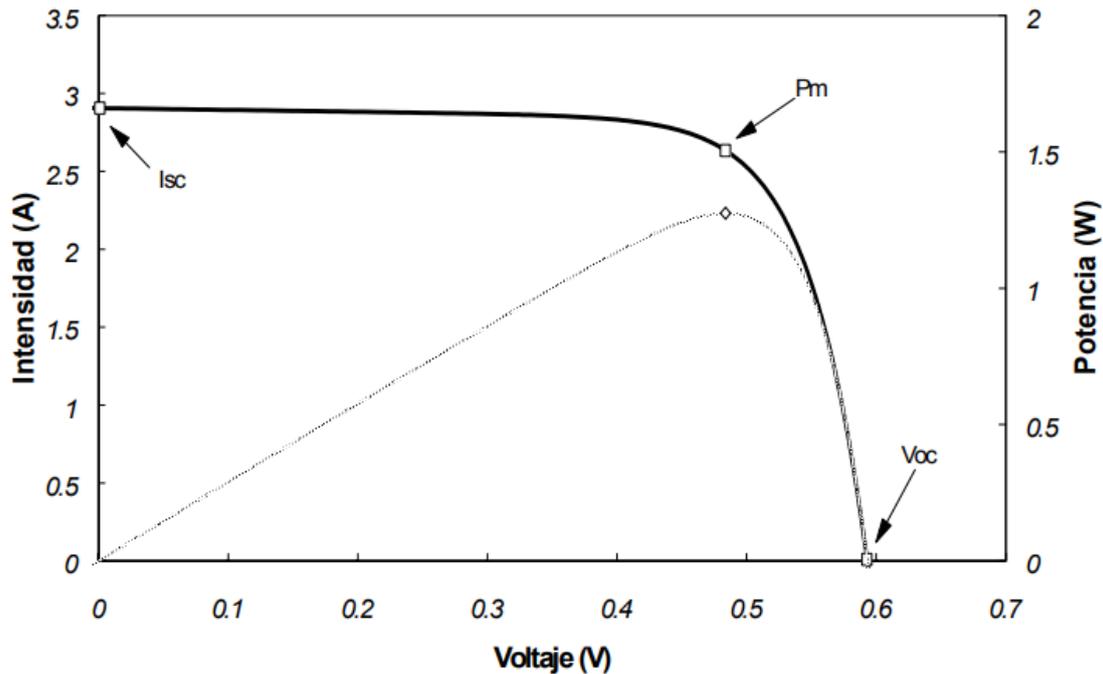


Figura 2. Curva característica IV de una célula fotovoltaica. Fuente: [1].

La curva característica intensidad-tensión de una célula fotovoltaica se muestra en la Figura 2.

Los parámetros más importantes de la curva son los siguientes:

- ✚ V_{OC} , tensión de circuito abierto: máximo valor de tensión que se puede obtener del panel. Este término se obtiene en circuito abierto.
- ✚ I_{SC} , corriente de cortocircuito: máximo valor de corriente que puede circular por el interior de la célula. Este término se obtiene cuando los terminales de la célula están cortocircuitados, es decir, para una $V_{OC} = 0$.
- ✚ P_m : es el punto de trabajo para el cual la potencia capaz de suministrar a una carga conectada a ella es máxima.

La anterior curva característica responde a la Ecuación 1., teniendo en cuenta el principio de superposición para el cual la corriente por la célula resulta de la diferencia entre la corriente producida por la luz incidente y a la corriente por el diodo [1].

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right)$$

Ecuación 1. Curva característica de una célula solar. Fuente: [1].

siendo:

- ✚ I_L , corriente fotogenerada: es la intensidad que se produce cuando la irradiación solar incide sobre la región n del material semiconductor, en amperios.
- ✚ I_D , corriente de oscuridad o de diodo: es la intensidad debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se producen en el interior del material semiconductor, en amperios.
- ✚ I , corriente neta, diferencia algebraica de la corriente fotogenerada y la corriente de oscuridad, en amperios.
- ✚ I_0 , corriente inversa de saturación del diodo, en amperios.
- ✚ q , carga del electrón, en Culombios.
- ✚ m , factor de idealidad del diodo, $m \in \{1,2\}$.
- ✚ k , constante de Boltzmann.
- ✚ T , temperatura absoluta.

Existe algún parámetro más a destacar como:

- ✚ FF, factor de forma: se trata de un coeficiente adimensional que relaciona la potencia máxima con el producto de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto.

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC} \times V_{OC}} = \frac{I_{pto\ máxima\ potencia} \times V_{pto\ máxima\ potencia}}{I_{SC} \times V_{OC}}$$

Ecuación 2. Factor de forma. Fuente: [1].

Una célula de buena calidad suele tener un factor de forma superior a 0,7 y cuanto más agudo es el codo de la curva más alto es su valor [1].

- ✚ η , eficiencia de conversión energética: se trata de un rendimiento que relaciona la potencia eléctrica que puede entregar la célula con la potencia de la radiación que le llega (ideal).

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_{pto\ máxima\ potencia} \times V_{pto\ máxima\ potencia}}{P_L} = \frac{FF \times I_{SC} \times V_{OC}}{P_L}$$

Ecuación 3. Eficiencia de conversión energética. Fuente: [1].

2.1.3. Tipos de células fotovoltaicas de Silicio

Existen tres tipos de tecnologías para las células solares de silicio cristalino [3].

- ✚ Silicio monocristalino: el silicio que forma la célula posee una estructura

cristalina uniforme, todos los átomos están alineados y forman un único cristal.

- ✚ Silicio policristalino: están formados por redes cristalinas ordenadas por regiones, en la que sus átomos presentan diferentes direcciones.
- ✚ Silicio amorfo: no existe una red cristalina, el material se deposita como película fina en distintos soportes.

2.2. Módulos fotovoltaicos

Una célula solar suele tener unas tensiones del orden de 0,6 V y 7A, dependiendo del tipo y de la tecnología que sea, por lo tanto, para conseguir tensiones superiores y adaptarse a los niveles convencionales, se asocian en serie y en paralelo formando un panel o módulo fotovoltaico [4] [5]. La estructura de un módulo fotovoltaico es la que se muestra en la Figura 3 y consta de las siguientes partes:

- ✚ Vidrio templado: generalmente de vidrio para facilitar lo máximo posible la captación de la radiación solar. Debe tener también una buena resistencia al impacto y a la abrasión.
- ✚ Encapsulante: se encarga de proteger a las células frente a la humedad. Se utilizan productos transparentes y que no se degradan con el tiempo, como por ejemplo productos a bases de siliconas (EVA, Teflón)
- ✚ Placa de apoyo: suele ser también de vidrio (TEDLAR) y sirve para proteger al módulo por su cara posterior.
- ✚ Caja de conexiones: suelen estar colocadas en la parte posterior del módulo, deben ser accesibles y garantizar la estanqueidad.
- ✚ Marco de aluminio: generalmente de aluminio o acero inoxidable, que sirve para proteger a todo el conjunto de posibles golpes. Tiene que ser una estructura estanca.

Como se ha explicado anteriormente, existen tres tecnologías diferentes de células de Silicio, por lo tanto, existirán tres tipos de módulos fotovoltaicos. En la Figura 4 se pueden ver estas tres tipologías.

Cada panel solar posee sus especificaciones principales en su parte posterior [3]. Las condiciones en las que se dan estos parámetros, como se ha explicado anteriormente, son condiciones STC. Todos estos parámetros característicos del

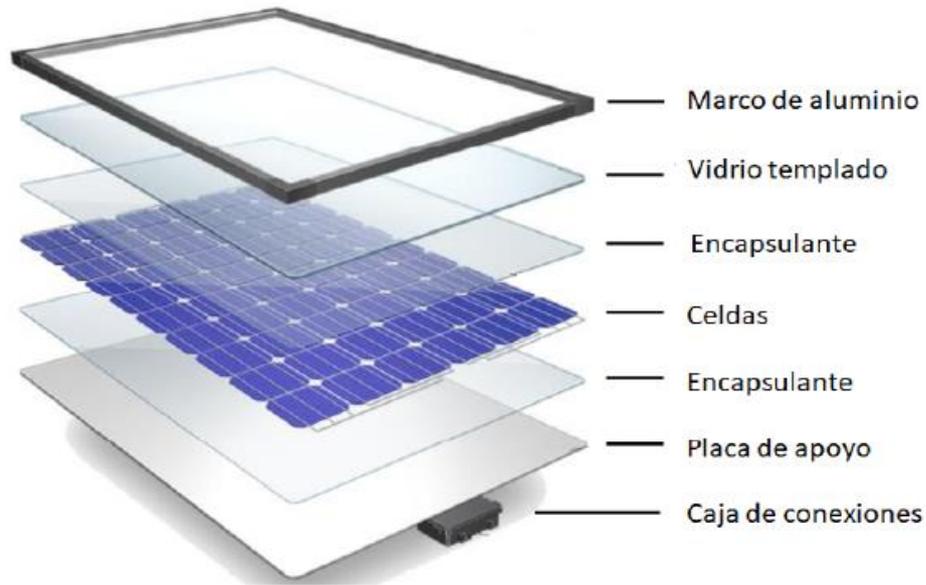


Figura 3. Estructura de los componentes que forman un módulo fotovoltaico. Fuente: [3].

módulo fotovoltaico tienen el mismo significado que para la célula solar.

La tensión V_{mp} y corriente I_{mp} son los puntos de trabajo para una potencia de $100 W_p$ para el modelo que se muestra en la Figura 5.

Finalmente, el conexionado de los módulos fotovoltaicos puede realizarse tanto en serie como en paralelo, según se desee obtener mayor tensión o corriente. Una asociación de paneles se denomina cadena o string, de tal forma que las plantas solares suelen estar formadas por varios string de módulos fotovoltaicos conectados entre sí. Para realizar este conexionado, los módulos fotovoltaicos poseen dos cables de salida, el terminal positivo (+) y el negativo (-) con unos conectores especiales en sus extremos que garantizan la estanqueidad y el buen contacto entre ellos. Los más



Figura 4. Módulo fotovoltaico de silicio monocristalino (izquierda). Módulo fotovoltaico de silicio policristalino (centro). Módulo fotovoltaico de silicio amorfo (derecha). Fuente: [3].

comunes son los denominados conectores MC4 [3].

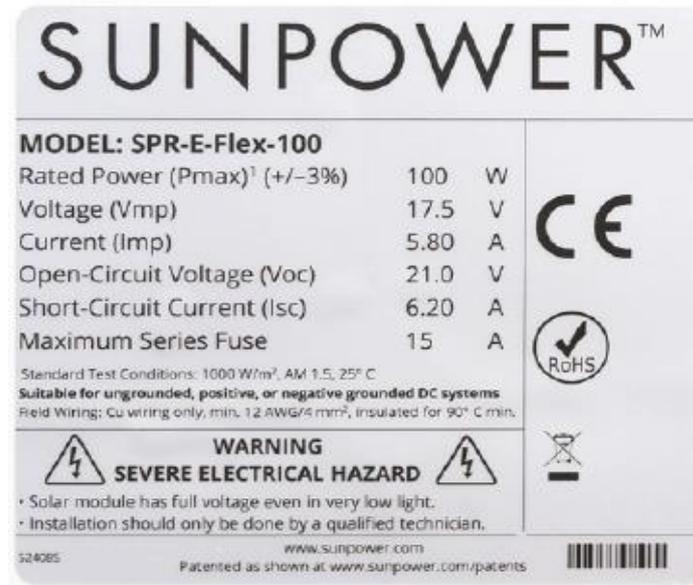


Figura 5. Especificaciones principales de un módulo fotovoltaico. Fuente: [3].

2.3. Métodos de inspección para identificar fallos en módulos fotovoltaicos

2.3.1. Inspección visual

La inspección visual es uno de los métodos más eficaces y rápidos para encontrar fallos y defectos en los paneles fotovoltaicos. La norma IEC 61215 [6], expone que la inspección visual se debe realizar antes y después de que el módulo se haya expuesto a pruebas de resistencia medioambientales, eléctricas o mecánicas. Habitualmente las pruebas de resistencia que se utilizan para evaluar el diseño de los módulos y comprobar la calidad para así poder realizar una estimación de la vida útil del mismo son: ciclos térmicos, ciclos de humedad-congelación, exposición a calor húmedo, irradiación UV, granizo, carga mecánica, exposición exterior y resistencia a puntos calientes. Para simplificar la inspección visual, el módulo puede ser dividido en las partes que lo forman, de tal manera, que cada parte será inspeccionada y documentada por separado. Según la norma IEC anteriormente citada, la inspección visual se debe realizar a más de 1000 lux y solo deberán tenerse en cuenta los defectos apreciables a simple vista.

Los defectos visuales definidos en la norma IEC 61215 [6] son:

- ✚ Superficies externas, marcos y cajas curvadas o desalineadas
- ✚ Cable del módulo en contacto con un diodo, produciendo riesgo de arco

eléctrico

- ✚ Fragmento de una célula en el laminado del modulo
- ✚ Fractura de una célula
- ✚ Burbujas o delaminaciones formando un camino continuo desde cualquier parte del circuito eléctrico hasta el borde del módulo
- ✚ Pérdida de la integridad mecánica

Muchos cambios en el rendimiento son imperceptibles a simple vista y deben ser estudiados mediante técnicas de caracterización mucho más sofisticadas y que se detallaran más adelante. Aun así, este método de inspección es muy eficaz para la identificación de puntos calientes, delaminación, aparición de burbujas, encapsulante amarillento, fallos en las conexiones, etcétera.

2.3.2. Curvas I-V

Mediante esta técnica de caracterización se determina la corriente de cortocircuito, I_{SC} y el voltaje de circuito abierto, V_{OC} entre otros datos.

El sistema típico empleado para una medición de curvas I-V consta de luz natural o un simulador solar, un sensor de temperatura del módulo, un sistema de almacenamiento de datos y un pirómetro o sensor de irradiancia solar.

Bajo condiciones de luz natural, se recurre a un trazador portátil para medir las curvas I-V del módulo. El problema que presenta este tipo de inspecciones es que se realizan in situ, sin estar bajo las condiciones de medida estándar (STC, 1000 W/m², 25°C y AM 1.5 G, según recoge la norma IEC 60904-3 [7]). Por lo tanto, los valores que se recogen deben corregirse para poder establecer una comparación de los parámetros eléctricos en condiciones OTC (operational test conditions) con los que el fabricante proporciona en su hoja de características en condiciones STC nominal. Para poder corregir estos datos se utiliza, como se ha dicho anteriormente, un pirómetro para registrar la irradiancia solar en el momento de la medición, un sensor de temperatura del módulo y un sistema de almacenamiento de datos.

En la Figura 6, se muestra en la una curva I-V con sus parámetros más importantes.

A continuación, se detallarán algunos ejemplos de la interpretación de las desviaciones entre la curva IV en STC (rojo) y en OTC corregida (azul) que tiene como consecuencia una reducción en la potencia máxima producida por el módulo

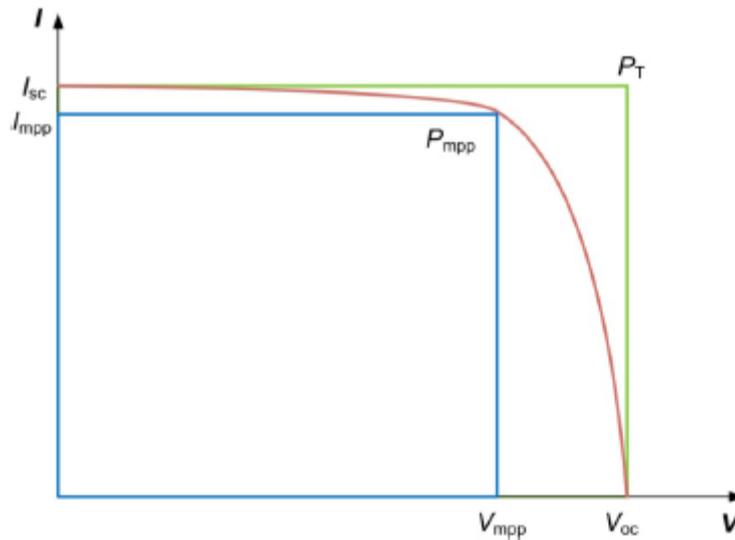


Figura 6. Curva I-V de un módulo fotovoltaico. Fuente: [8].

fotovoltaico [2].

En la Figura 7 se observan saltos en la curva con una corriente menor a la I_{sc} pueden

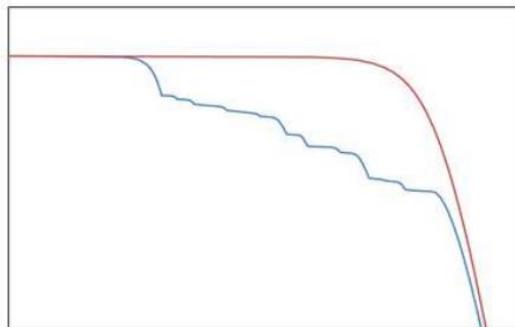


Figura 7. Saltos en la curva IV. Fuente: [2].

deberse a sombreados no uniformes en el área de un módulo o string.

Como se muestra en Figura 8, una pendiente alta en el tramo horizontal puede deberse a diferente orientación de los módulos de un string, suciedad irregular o

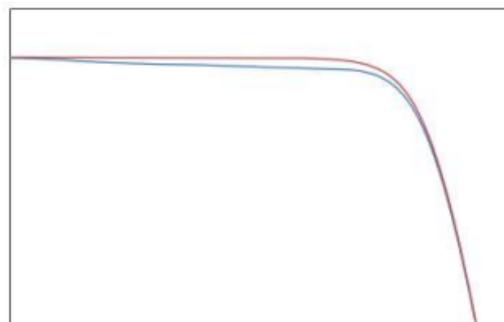


Figura 8. Pendiente alta en tramo horizontal (HL). Fuente: [2].

grietas.

En la Figura 9, se observa una pendiente baja en el tramo descendente que puede ser debida a un incremento de la resistencia serie del string.

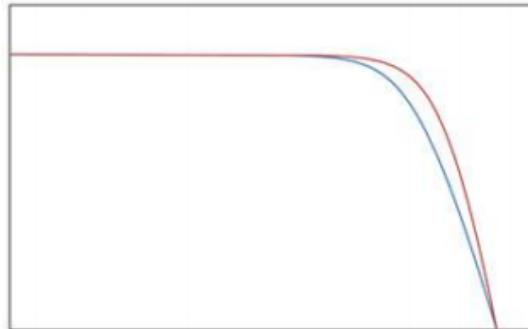


Figura 9. Pendiente baja en el tramo descendente (DL). Fuente: [2].

En la Figura 10, se puede ver un menor voltaje en circuito abierto que puede deberse a fallos en la instalación, diodos bypass defectuosos, defectos en la fabricación del módulo, celdas sombreadas, etc.

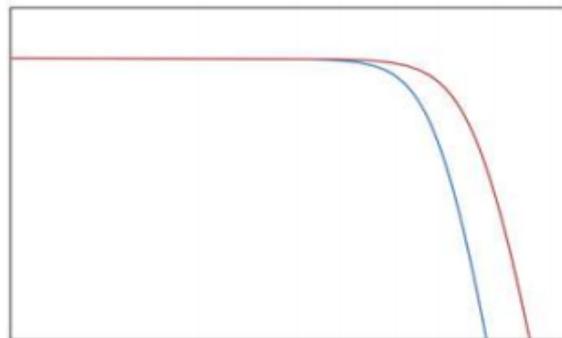


Figura 10. Voltaje en circuito abierto menor. Fuente: [2].

La Figura 11 muestra una curva IV afectada por de defectos tipo *Potential Induced Degradation* (PID), un voltaje menor en circuito abierto y una pendiente alta de la línea horizontal (HL).

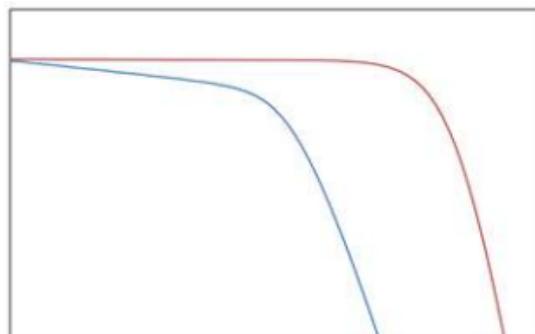


Figura 11. Pendiente alta de HL y bajo voltaje en circuito abierto. Fuente: [2].

2.3.3. Termografía infrarroja (TIR)

La termografía infrarroja (TIR) es un método de inspección para paneles fotovoltaicos no destructiva, que proporciona la distribución de los rasgos característicos de los

módulos de una manera rápida y en tiempo real [8].

Al tratarse de una técnica que no requiere contacto directo, las mediciones se pueden realizar durante funcionamiento normal tanto de módulos individuales como de *strings* completos. Se utiliza como método de diagnóstico de algunos tipos de fallos térmicos y eléctricos [8].

Al incidir la luz sobre el módulo fotovoltaico se genera una corriente eléctrica y como consecuencia calor, ocasionando que la temperatura del módulo sea heterogénea en su superficie. Esta distribución de temperaturas se mide con cámaras infrarrojas donde se utilizan longitudes de onda que oscilan entre 8 y 14 μm [8].

Las termografías medidas al aire libre deben realizarse, según la norma IEC TS 62446-3:2017 [9], con una irradiación mínima de 700 W/m^2 , con velocidades de viento bajas y temperatura ambiente de aproximadamente $25 \text{ }^\circ\text{C}$. La toma de imágenes debe realizarse lo más cerca posible del módulo, por el lado de la lámina posterior y con un ángulo de visión lo más próximo a 90° y no menos de 60° . Se debe tener especial cuidado con reflexiones como nubes, sombras, etcétera. También, para una correcta medición de temperatura, se debe ajustar la temperatura ambiente y el valor de emisividad para la superficie a inspeccionar (0,92 para el vidrio) [8] [9].

Si un módulo presenta defectos en su interior, las variaciones de temperatura entre un punto caliente y un punto en correcto funcionamiento pueden llegar a ser de varias decenas de grados. Se debe tener en cuenta también un gradiente de temperatura dentro de la planta fotovoltaica debido a la transferencia de calor por convección entre módulos [8].

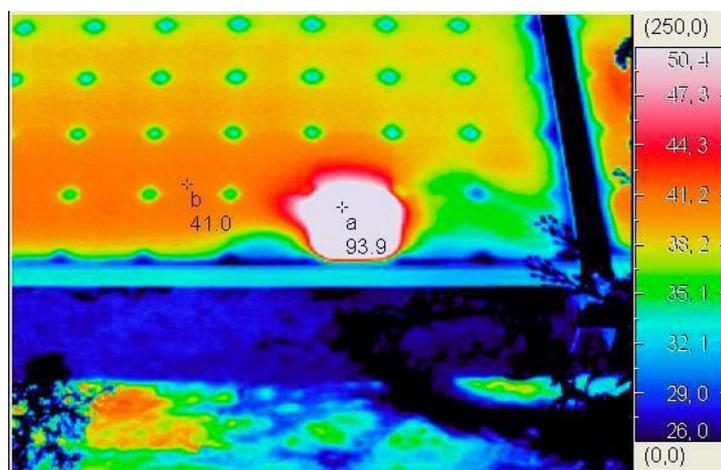


Figura 12. Imagen termográfica de un módulo fotovoltaico. Fuente: [24].

En la Figura 12 se puede apreciar una zona de la superficie del panel con una temperatura mayor caracterizada mediante un ensayo de termografía.

2.3.4. Electroluminiscencia (EL)

Los módulos fotovoltaicos de las plantas solares están expuestos a condiciones ambientales como la lluvia, el granizo, la nieve, etcétera. Y aunque estén protegidos con un marco de aluminio y un laminado de vidrio, estos elementos no siempre pueden evitar daños como el estrés térmico al que puede estar sometido el módulo, caída de ramas sobre su superficie, o incluso golpes durante su transporte a planta. Existen también defectos debidos a su proceso de fabricación, como por ejemplo soldaduras defectuosas o cables mal conexiados entre otras, que, en definitiva, pueden dar lugar a una reducción en su eficiencia energética.

Se hace por lo tanto necesario tener un control sobre el estado de los paneles de una planta solar con el propósito fundamental de garantizar la máxima eficiencia. En la mayoría de los casos en los que existen defectos en los módulos fotovoltaicos, la identificación visual, la termografía IR o el análisis de la curva IV no es suficiente para su correcta identificación y posterior análisis.

La inspección por termografía (IR), como ya se ha mencionado en el epígrafe 2.3.3, es una técnica no destructiva y sin contacto para evaluar el estado de los paneles fotovoltaicos, sin embargo, debido a la baja resolución de las cámaras que se utilizan para esta técnica y sus fundamentos, no permite identificar gran parte de los tipos de defectos que se pueden dar en los módulos fotovoltaicos [10].

Existe otro método no destructivo para el análisis de estos defectos en los módulos fotovoltaicos, denominado electroluminiscencia (EL) que permite la identificación de muchos más tipos de defectos en los módulos fotovoltaicos, además de ofrecer imágenes de alta resolución que permiten un análisis detallado de estos [10].

Ambas técnicas se complementan y son tecnologías que se aplican de forma eficaz en los controles de calidad porque son una importante herramienta de caracterización, tanto en la industria como en la investigación [10].

La medición de EL se basan en la recombinación radiactiva de portadores de carga inyectados mediante una corriente eléctrica a la célula y por la cual al recombinarse se emite un fotón (resultado contrario al efecto fotoeléctrico). Debido a estos efectos

de recombinación, existe una emisión de luminiscencia del Si, y por tanto de las células solares, en longitudes de onda en torno a 1100 nm. Las variaciones de luminiscencia en la superficie de la célula pueden ser indicadores de algún tipo de defecto en la célula [11].

Para detectar estas longitudes de onda y por lo tanto estos defectos, existen cámaras, por ejemplo, las que tienen sensores de Si, que ofrecen una buena resolución con costes económicos relativamente bajos y una eficiencia cuántica entorno al 60% en el rango espectral 400-850 nm, aunque de menos del 10% en el rango espectral de emisión del Si, por lo tanto, para obtener una buena imagen de EL empleando este tipo de sensores, el tiempo de exposición debe ser largo [12].

La gráfica que relaciona la eficiencia cuántica de un sensor en función de la longitud de onda se denomina curva de sensibilidad. Como se puede apreciar en la Figura 13, el área del espectro de emisión del Si captado por un sensor de Si (azul) es mucho menor que el área del espectro captado por sensores de InGaAs (rojo), por lo tanto, las cámaras más apropiadas para realizar EL son las que tienen sensores de InGaAs, ya que cubren la emisión del espectro completo del Si con alta eficiencia cuántica, aunque su coste económico es superior [12]. Además, este tipo de sensores son ciegos a la luz visible, de modo que el detector se comporta como un filtro para la luz ambiental [12].

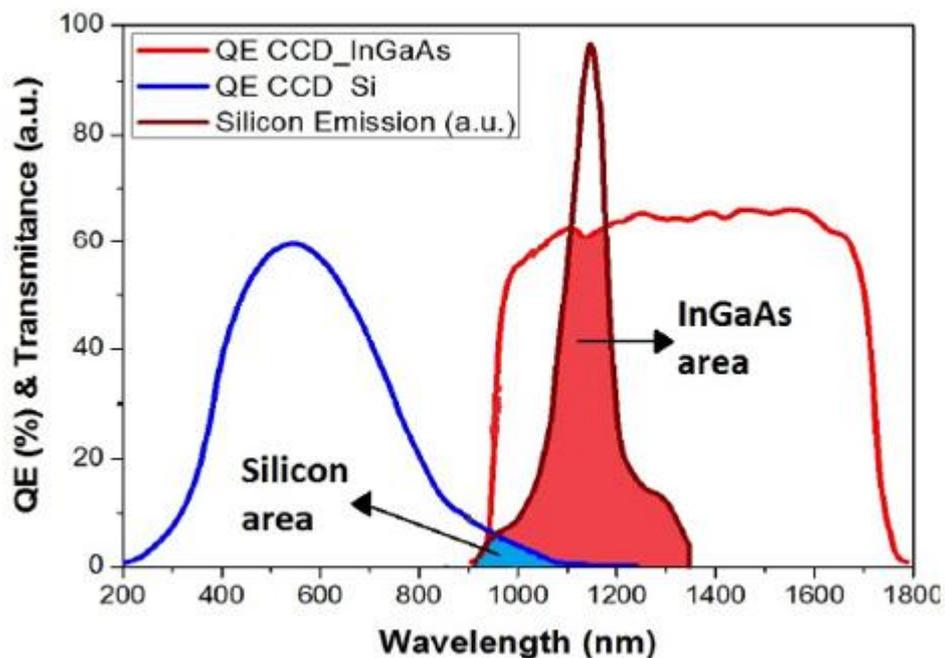


Figura 13. Curva de sensibilidad para los sensores CCD de Si (azul) e InGaAs (rojo) con respecto a la emisión del Si. Fuente: [11].

Las imágenes de EL se realizan en condiciones ambientales nocturnas o en un entorno oscuro porque la cantidad de radiación emitida por un módulo solar de Si es muy baja en comparación con la cantidad de radiación emitida por fuentes externas como por ejemplo el sol [13]. Si las medidas con sensores de Si se realizan en ambientes nocturnos u oscuros, las imágenes EL obtenidas con tiempos de exposición muy cortos sí que son buenas, ofreciendo una elevada resolución y permitiendo identificar defectos como por ejemplo los relacionados con el propio material de Si, defectos relacionados con la degradación inducida por potencial (PID), etcétera [12].

A continuación, se van a enumerar los equipos necesarios para una medida de electroluminiscencia según la norma IEC TS 60904-13-2018 [14]:

- ✚ Cámara de imágenes de electroluminiscencia
- ✚ Cuarto oscuro para la realización de imágenes
- ✚ Fuente de alimentación
- ✚ Interfaz de computadora y fuente de alimentación para la captura de imágenes
- ✚ Software de procesamiento y visualización de imágenes

En la Figura 14 se muestra un “set up” para un ensayo de EL en laboratorio.

En casi toda la cadena de valor de un proyecto fotovoltaico se puede aplicar el método de inspección EL para obtener información acerca del estado del panel. Esta técnica permite la detección de la mayor parte de defectos, entre otros, como los siguientes [15].

- ✚ Presencia de distintos tipos de grietas que pueden provocar aislamientos de una zona concreta de la célula provocando una disminución de la corriente de cortocircuito o aumentos de la resistencia serie de la zona afectada. La norma IEC TS 60904-13-2018 [14] clasifica estas grietas según su gravedad.
- ✚ Degradación inducida por potencial (PID), defectos ocasionados por corrientes parásitas que dan lugar a cortocircuitos en las células. Este tipo de defectos suele aparecer en las células cercanas al marco por la gran diferencia de potencial que existe entre ambos dado que los aislamientos no son perfectos, y aunque suelen aparecer a lo largo de los años, estos defectos se aligeran si el clima es húmedo y soleado.

- ✚ Detección de fallos en los fingers de la célula, ya sea por un error en su proceso de fabricación o de soldadura provocando de nuevo un aumento de la resistencia serie de las zonas afectadas.
- ✚ Mala resistencia de contacto

Este método de inspección ofrece ventajas, entre otras, como las que a continuación se enumeran:

- ✚ Si la medida de EL se realiza durante la noche, no existe la necesidad de desmontar los módulos y por lo tanto se disminuye el riesgo de posibles daños.
- ✚ Se evita el transporte de los módulos al laboratorio para su análisis.
- ✚ No es necesario detener la producción de energía eléctrica durante largos periodos de tiempo.
- ✚ Esta medida de inspección es particularmente interesante para la inspección de grandes plantas solares ya que permite polarizar un string, por ejemplo, de 24 paneles, y visualizar simultáneamente las imágenes de electroluminiscencia de toda la cadena. Los tiempos asociados a las medidas son, por lo tanto, muy cortos gracias al poder alimentar un string entero

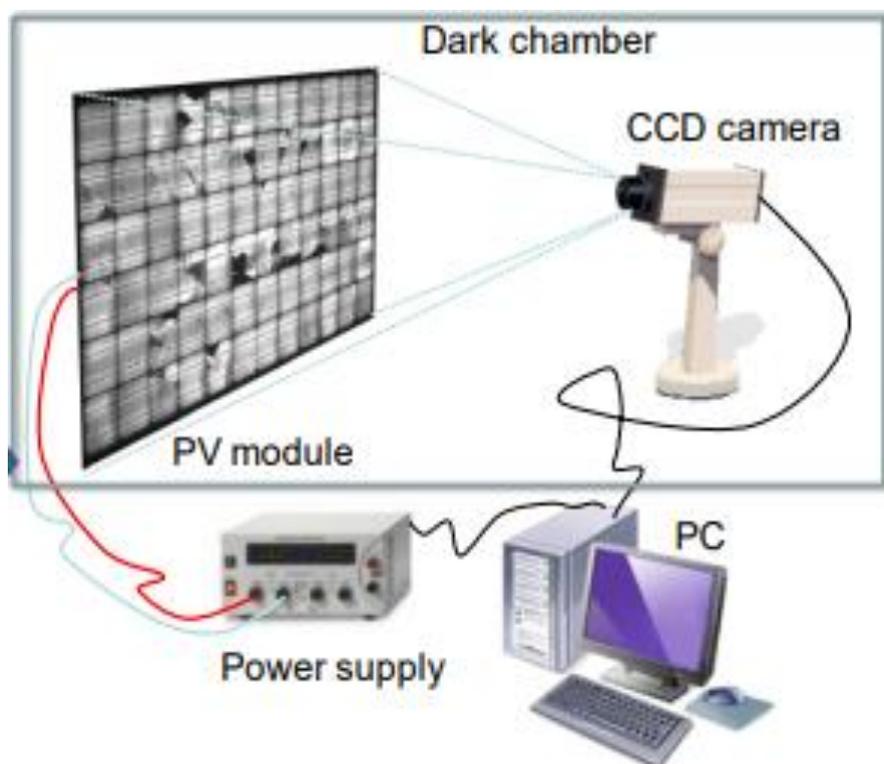


Figura 14. "Set up" para ensayo de EL en laboratorio. Fuente: [15].

El uso de cámaras con sensores de Si requiere de la condición de oscuridad para evitar cualquier luz ambiental lo que provoca una serie de inconvenientes como por ejemplo [12]:

- ✚ Si la medida de EL se quiere realizar durante el día, los módulos fotovoltaicos se deben desmontar para llevarlos a un ambiente oscuro (furgoneta o laboratorio) empleando por tanto mucho tiempo y lo que obliga a ser un método de inspección solo para una pequeña parte de una planta fotovoltaica. Asociadas a estas manipulaciones para el desplazamiento de los módulos existen también riesgos tanto para el panel como para el operario.
- ✚ La opción de realizar la medida de inspección *in situ*, obliga a tener que realizar las manipulaciones de las conexiones durante la noche, con los riesgos, dificultades y costes mucho más elevados que eso ocasiona.

2.4. Electroluminiscencia diurna

La luminiscencia emitida por un módulo fotovoltaico, al ser polarizado en directa (EL), tiene ordenes de magnitud muy inferiores a la luz solar [16]. La aparición de las cámaras con sensores de InGaAs con eficiencias cuánticas muy elevadas en la región del infrarrojo cercano (longitud de onda donde los paneles fotovoltaicos de Si emiten luminiscencia) permiten realizar medidas de EL en condiciones no estrictamente nocturnas [12].

Otra ventaja que tienen las cámaras con sensores de InGaAs es que en la mayor parte del espectro visible su eficiencia cuántica es nula y por lo tanto no recogen ningún tipo de luz en esas longitudes de onda, aunque si luz ambiental infrarroja.

Para la adquisición de una imagen de electroluminiscencia, cualquier otra fuente de luz debe rechazarse y filtrarse. En este sentido, el grupo GdS Optronlab ha desarrollado un sistema que permite obtener imágenes de EL incluso en condiciones de alta irradiación, con tiempos suficientemente cortos y de forma ágil, sin la necesidad de desmontar los módulos y con la versatilidad de poder trabajar las 24 horas del día. [12].

A continuación, se va a detallar el método desarrollado por el grupo de investigación GdS Optronlab para la captura de imágenes en una medida de EL diurna.

2.4.1. Método desarrollado para la toma de imágenes de EL

A pesar de que el uso de cámaras con sensores de InGaAs tengan una buena eficiencia cuántica en el rango del espectro de emisión del Si y se comporten como un filtro para la luz ambiental, ésta también contiene luz infrarroja que el detector captará y que por lo tanto debe filtrarse para extraer la señal de luminiscencia.

Para ello, el grupo de investigación GdS Optronlab ha desarrollado un método de filtrado para realizar medidas de EL diurna.

El procedimiento consiste en restar imágenes del módulo secuencialmente bajo polarización directa (ON) y circuito abierto (OFF). En el estado de circuito abierto o apagado, el detector recoge la luz ambiente, tanto la directa como la reflejada, así como la fotoluminiscencia (PL) emitida por el módulo fotovoltaico al estar bajo la radiación solar, este conjunto se denomina señal de fondo o background (bg) y en el estado ON el sensor recoge la luz de fondo correspondiente al estado OFF y además la emisión de EL procedente del módulo solar (bg + EL). La diferencia entre ambos estados es la imagen de EL [12].

Para mejorar el método de captura y evitar, en la medida de lo posible, dificultades cuando la señal de EL es demasiado débil en comparación con la señal de fondo, el grupo de investigación optó por la adquisición de varias imágenes en los dos estados ON/OFF y obtener un promedio de la resta de cada par de imágenes ON/OFF durante



Figura 15. Dos imágenes en cada estado de polarización. Fuente: [12].

varios ciclos como muestra la Figura 15 [12].

Cabe señalar en este sentido que es fundamental la rápida conmutación de un estado de polarización al otro, así como la adquisición correspondiente de la imagen, ya que esto garantiza que la probabilidad de que ocurran variaciones importantes de la luz ambiental es muy pequeña.

Para la implementación del método ON-OFF descrito anteriormente, el grupo de investigación desarrolló un software capaz de controlar de forma sincronizada los

diferentes equipos que forman parte del sistema de mediciones. Por un lado, el circuito destinado al control de la polarización de los módulos, y por otro, el circuito que controla la cámara de InGaAs.

Este circuito de control de la polarización de los módulos es el prototipo desarrollado para este trabajo de fin de grado y en los siguientes epígrafes se detallará exhaustivamente, tanto su diseño de partida (OprotroboxV1), que presenta una serie de limitaciones de tensión, como la versión actualizada (OptronboxV2), desarrollada para soportar niveles de tensión superiores y por lo tanto poder trabajar con fuentes de alimentación que permitan polarizar un número de paneles fotovoltaicos mayor. En Figura 16 se puede observar un esquema del sistema para medidas de EL diurna donde el número 6 es el prototipo mencionado.

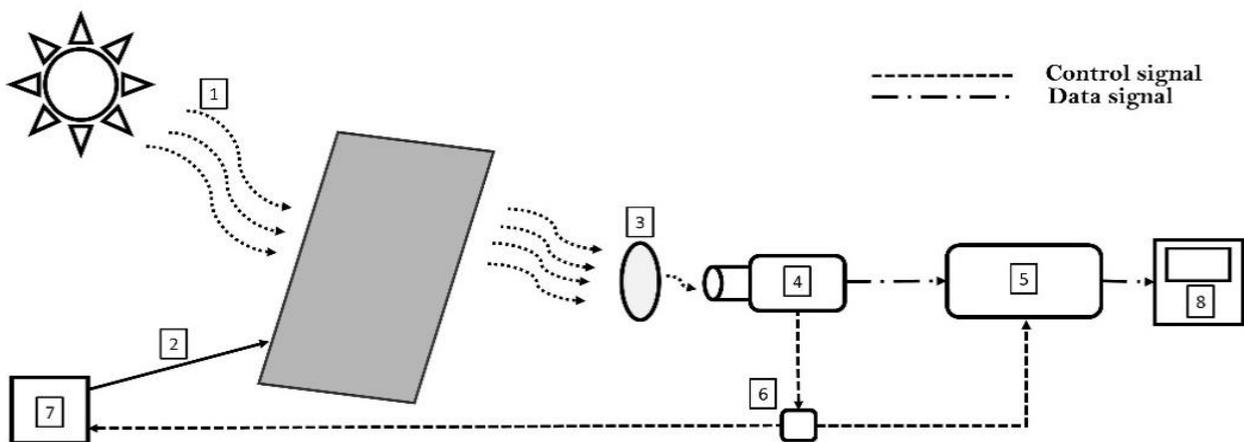


Figura 16. Esquema del sistema para medición de EL. 1- Radiación solar. 2- Corriente continua inyectada al módulo fotovoltaico. 3- Filtro óptico pasa banda. 4- Cámara InGaAs. 5- Software de tratamiento de imágenes. 6- Sistema de control de la polarización del módulo fotovoltaico. 7- Fuente de alimentación. 8-Imagen final de la electroluminiscencia del módulo fotovoltaico. Fuente: [12].

3. Diseño de partida OPTRONBOX V1

Optronbox V1, es el nombre del dispositivo de partida a partir del cual, posteriormente, se ha desarrollado el nuevo dispositivo denominado Optronbox V2, con una serie de ventajas fundamentales para su aplicación respecto a la versión anterior y que supone la redacción de este trabajo de fin de grado.

Este dispositivo permite el control de la polarización de los módulos fotovoltaicos y es uno de los elementos necesarios para llevar a cabo medidas de inspección de EL diurna sobre paneles fotovoltaicos en plantas solares, es por ello por lo que es fundamental entender y conocer cada uno de los elementos que lo forman, así como la función que desempeñan dentro de todo el conjunto.

Los diferentes componentes de los que está formado este dispositivo son:

- ✚ Placa microcontroladora programable
- ✚ Placa modular
- ✚ Dispositivos de comunicación inalámbrica
- ✚ Relé de estado sólido (SSR)
- ✚ Radiador o disipador
- ✚ Caja o envoltente
- ✚ Batería de alimentación
- ✚ Dispositivo HUB
- ✚ Otros: cables, punteras y diseños de impresora 3D

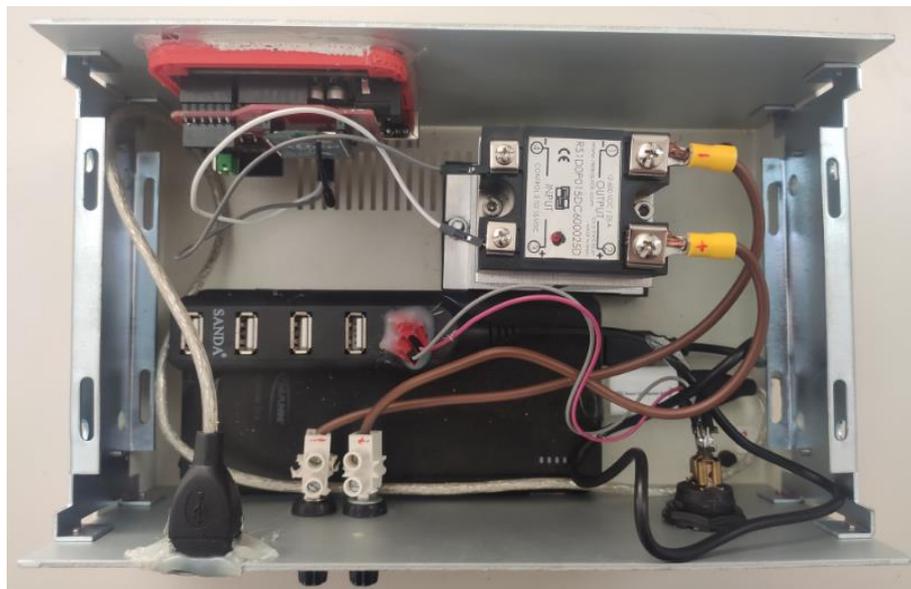


Figura 17. Estructura interna del prototipo de partida V1 Optronbox. Fuente:

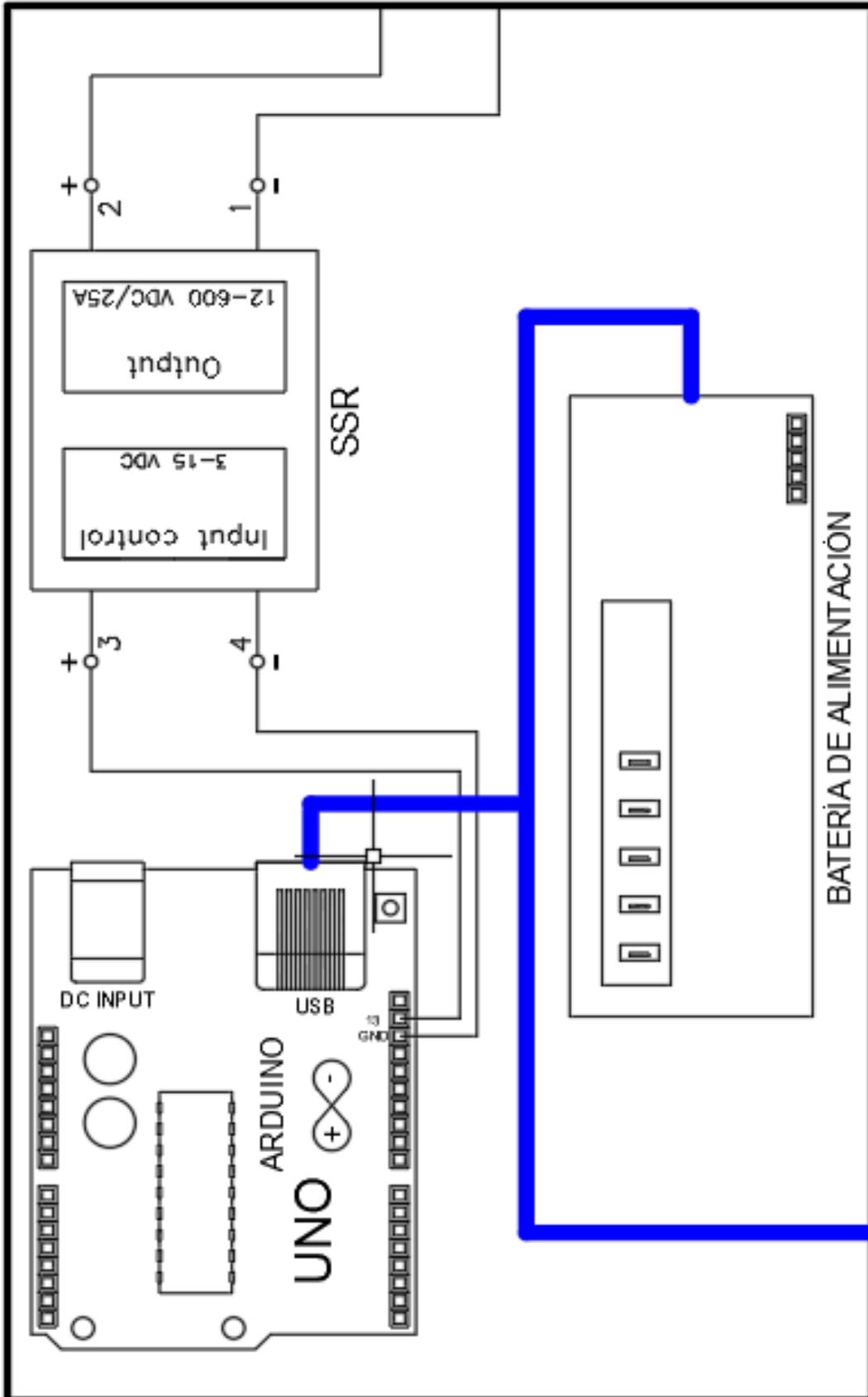


Figura 18. Esquema unifilar del prototipo Optronbox V2. Fuente: propia.

En la Figura 17 se pueden ver todos los componentes anteriormente mencionados ya montados sobre el dispositivo y conectados entre sí. En la Figura 18 se puede ver el esquema eléctrico unifilar de Optronbox V1 conectado a una placa solar y a una fuente de alimentación de corriente continua, típico de un ensayo de EL diurna.

Antes de entrar en detalle de la explicación cada uno de los componentes que forman este dispositivo, se realizará una breve explicación del funcionamiento en conjunto.

La placa microcontroladora es la encargada de proporcionar la tensión al relé de estado sólido (SSR). Cuando lea un dato por el puerto serie, activará su pin de salida (13). Esta salida irá conectada a la entrada de alimentación del SSR, de tal manera que cuando este pin se active, habrá una tensión en la entrada del SSR y se cerrará el circuito. Cuando el circuito esté cerrado, la fuente de alimentación proporcionará la tensión necesaria para polarizar el/los módulo/s fotovoltaico/s y por lo tanto se le inyectará una corriente al panel. Cuando no haya datos por el puerto serie se dejará de alimentar este pin y por lo tanto al SSR, y se abrirá el circuito. Con el circuito abierto el/los módulo/s fotovoltaico/s no estarán polarizados. Como se puede observar, este dispositivo funciona como un interruptor capaz de controlar la corriente que se inyecta al panel a través de una fuente de alimentación.

Descrito el funcionamiento del dispositivo, en los siguientes epígrafes se detallará exhaustivamente cada uno de los componentes que forman este dispositivo interruptor encargado del control de la inyección de corriente.

3.1. Placa microcontroladora programable

La plataforma que se va a utilizar para programar el dispositivo es una placa microcontrolador de código abierto desarrollado por Arduino. Dentro de esta marca existe una gran variedad de modelos, en nuestro caso la que se va a utilizar es Arduino Uno. La alimentación de esta placa microcontroladora se realizará a través de USB, bus de comunicaciones que dará la tensión de 5 V necesaria para que funcione. Este modelo en concreto consta de 14 pines de entrada/salida digital, de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM.

En este prototipo de partida, y en el siguiente, solo va a ser necesario hacer uso de un par de pines (en el caso que nos ocupa será el 13 y GND, pero podría ser cualquier otro) porque lo único que se necesita es mandar una señal desde el ordenador al

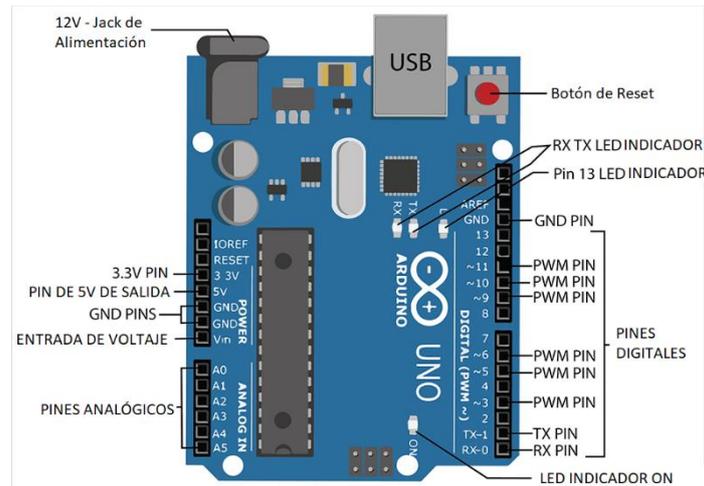


Figura 19. Partes de un Arduino. Fuente: [25].

Arduino para que éste active o no dicho pin.

Asociado a este par de pines irá conectado el relé de estado sólido (SSR) que más adelante se detallará y al cual le llegará una tensión entre sus bornes de control de 5V para que abra o cierre el circuito en función de lo que corresponda en cada momento. En la Figura 19 se pueden observar las diferentes partes de un Arduino. Para mandar esta señal y que el Arduino sea capaz de interpretarlo, se necesita programar este mediante un lenguaje de programación similar al conocido lenguaje C como se muestra en la Figura 20.

Se definen las variables, char rxChar para recibir datos del puerto serie e int ledpin=13 para indicar al programa que el contacto del Arduino con el que se va a trabajar es el número 13. Se asocia a este último pin como salida y se introduce el número de símbolos por segundo (baudios) en 115.200. Finalmente, en el programa principal se introduce el bucle, se comprueba si existen datos por el puerto serie, si los hay se leen y se almacenan en la variable de tipo char rxChar, en caso contrario se vuelve a comprobar repetidamente. Para el caso en el que haya datos, si es un '1' se ordena encender el pin (digitalWrite (ledpin, HIGH)), si es un '0' se apaga.

El hecho de ordenar encender un pin se traduce en alimentar un relé de estado sólido que se encargará de abrir o cerrar el circuito al que irán conectados el resto de los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo.

```
char rxChar;    // Variable para recibir datos del puerto serie
int ledpin = 13;
// Configurar el arduino
void setup()
{
  // Pin 13 como salida
  pinMode(ledpin, OUTPUT);
  // Comunicación serie a 115200 baudios
  Serial.begin(115200);
}
// Ciclo infinito, programa principal
void loop()
{
  // Si hay datos disponibles en el buffer
  if ( Serial.available() )
  {
    // Leer un byte y colocarlo en variable
    rxChar = Serial.read();
    // Procesar comando de un solo byte
    if ( rxChar == '1' )
    {
      digitalWrite(ledpin, HIGH);
    }
    else if ( rxChar == '0' )
    {
      digitalWrite(ledpin, LOW);
    }
  }
}
```

Figura 20. Código de programación del Arduino. Fuente: propia.

3.2. Placa modular (shield)

Un shield en Arduino es una placa que se apila sobre otra o sobre el propio Arduino como se hará en este caso y sirve para dar funcionalidad extra. En nuestro caso se utilizará para montar sobre ella el dispositivo de comunicación inalámbrica y así poder interconectar el ordenador donde está el software para realizar EL y el prototipo.

3.3. Dispositivos de comunicación inalámbrica

El objetivo principal de utilizar dispositivos de comunicación inalámbrica es reducir el cableado que es necesario llevar a cabo en medidas de inspección en planta

permitiendo realizar estas medidas de una forma más cómoda, rápida y con menores riesgos.

El módulo que se va a utilizar para la comunicación utiliza el protocolo Zigbee y está fabricado por Digi. Estos microcontroladores permiten realizar interconexiones entre dispositivos y para poder enlazarlos se necesita un software que proporciona el fabricante, llamado XCTU. Con este software libre se configurarán los dos módulos que se comunicarán para enviar y recibir las señales desde el programa de EL. Uno de ellos, el que se conecta al ordenador, irá configurado como coordinador, y será el que envíe datos al otro (end device, dispositivo final). A continuación, se indican los pasos a seguir para el enlace de ambos módulos.

La interfaz de usuario al iniciar el programa XCTU tiene un aspecto como el que se muestra en la Figura 21.

Para añadir el módulo al software XCTU para su posterior configuración de los

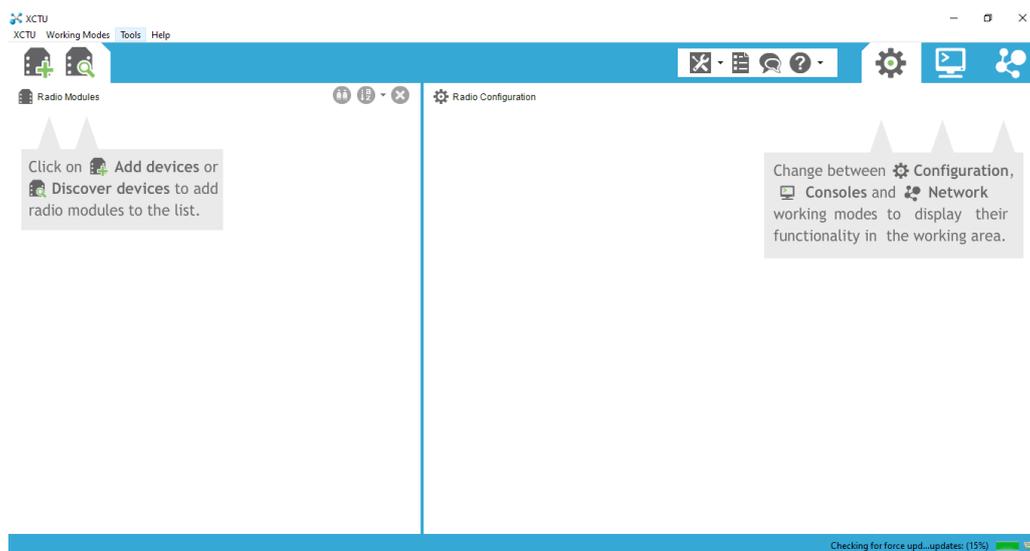


Figura 21. Interfaz de usuario software XCTU. Fuente: propia.



Figura 22. Opciones para añadir un módulo. Fuente: propia.

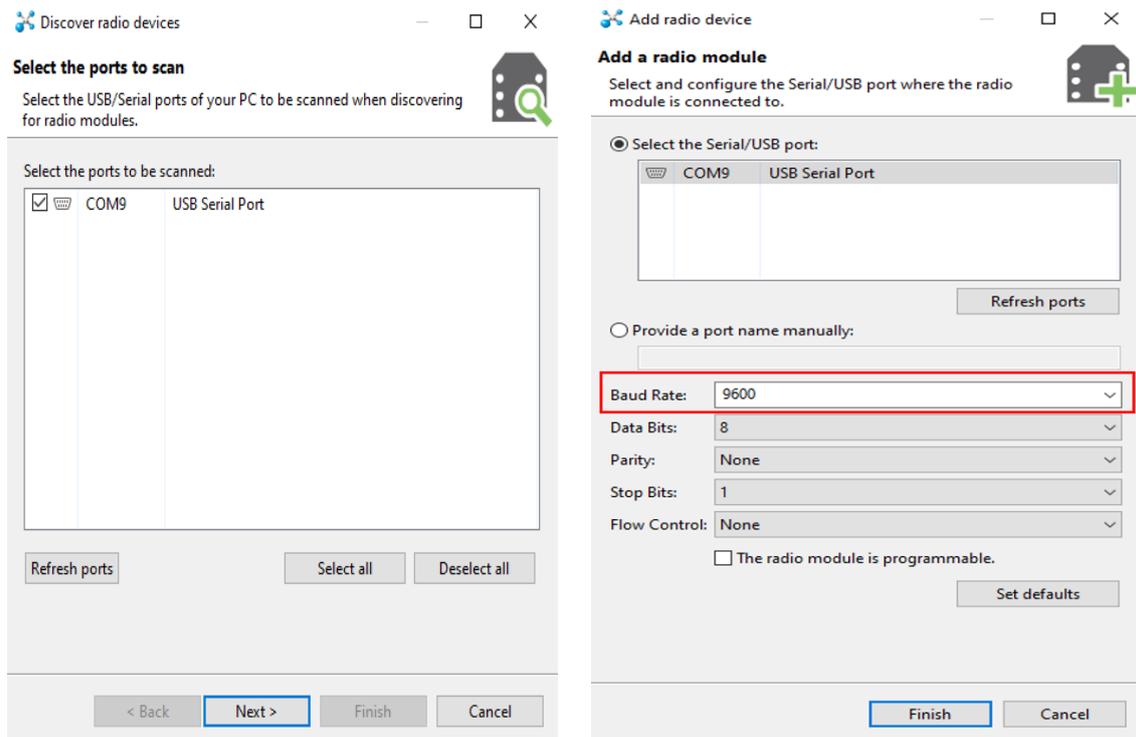


Figura 23. Ventana del icono 1 (izquierda) y ventana del icono 2 (derecha). Fuente: propia.

diferentes parámetros se tienen dos opciones, o manualmente sobre el icono 1 o escaneando los puertos conectados al ordenador (icono 2), como se muestra en la Figura 22. Según se elija un icono u otro, aparecerán diferentes ventanas, pero los parámetros son los mismos. En la Figura 23 se muestran las ventanas según se haya elegido el icono 1 o el 2 respectivamente.

En la ventana del icono 1 el parámetro que se tiene que modificar es el marcado como “Baud Rate” y representa la velocidad en número de símbolos por segundo. Dicho parámetro debe coincidir con el que lleve el código de Arduino. Si se elige el icono 2, en la siguiente pestaña se podrá modificar dicho parámetro como en el caso anterior. Finalizado este proceso por el cual el software reconoce el módulo en el puerto COM en el que esté conectado, el siguiente paso es configurar los módulos que se quieren comunicar, para ello se muestra la Figura 24, donde se señalan los parámetros que se tienen que modificar.

PAN ID: es el nombre de la red de comunicación. Para que dos dispositivos se puedan comunicar entre sí, deben llevar el mismo nombre de la red.

Destination Address High (DH) y Destination Address Low (DL): son las direcciones de destino. Como se quieren comunicar dos módulos diferentes, cada uno tendrá su dirección MAC propia. Esta dirección MAC se subdivide en estas dos direcciones

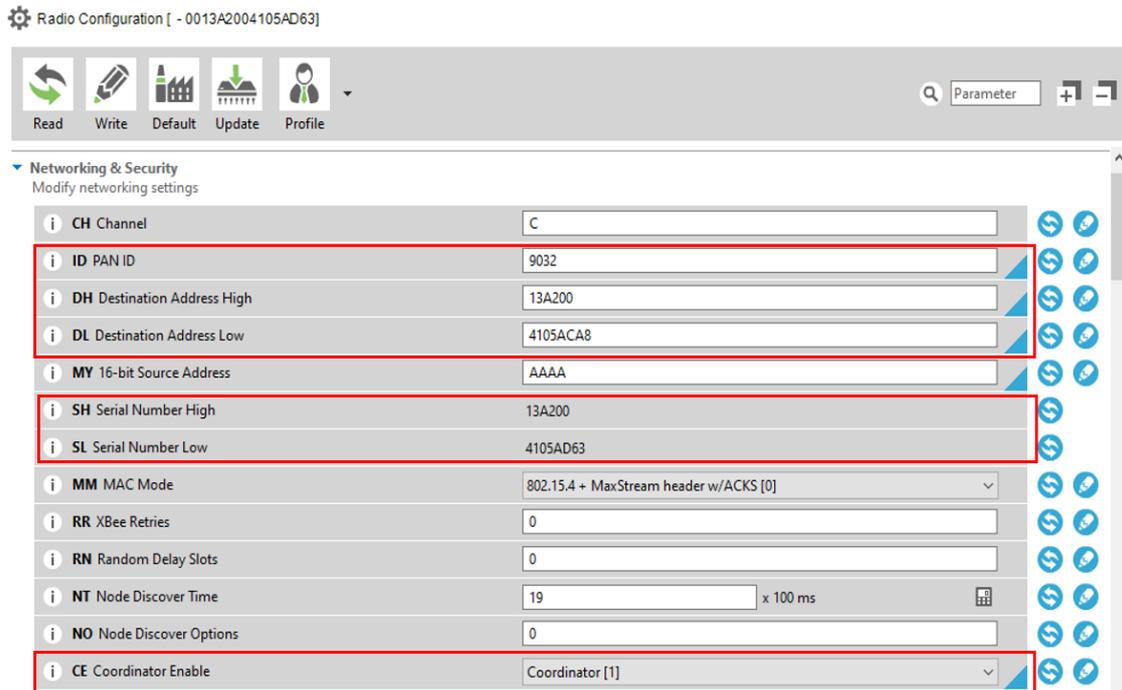


Figura 24. Parámetros de configuración de un módulo. Fuente: propia.

llamadas DH y DL, los 8 primeros dígitos se corresponden con DH y los 8 siguientes con DL. Por tanto, para la configuración de un módulo se introducirá la MAC del otro

Coordinador Enable (CE): este parámetro define la función que va a tener el módulo dentro de la red. En una red de comunicación deben existir tanto un coordinador como un dispositivo final, aunque si la red presenta problemas de comunicación debidas a largas distancias, se puede hacer uso de módulos configurados en modo router como intermediario entre un coordinador y un dispositivo final, de tal modo que conectando sucesivamente entre el coordinador y el dispositivo final varios router podemos alcanzar las distancias que se deseen. El coordinador se encarga de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos, los dispositivos finales solo tienen la función de comunicarse con su nodo padre (coordinador o router) pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. Para esta aplicación en concreto es indiferente como definamos a cada uno, por lo tanto, uno estará como coordinador y otro como dispositivo final (End Device). En la Figura 25 se puede observar dentro de la dirección MAC, la DH y la DL descritas anteriormente, así como en la Figura 26, el montaje de estos tres últimos.

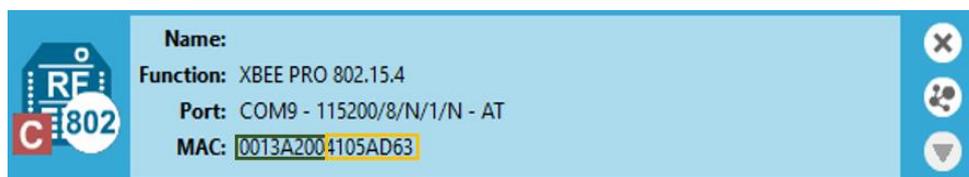


Figura 25. Dirección MAC: DH (izquierda). DL (derecha). Fuente: propia.

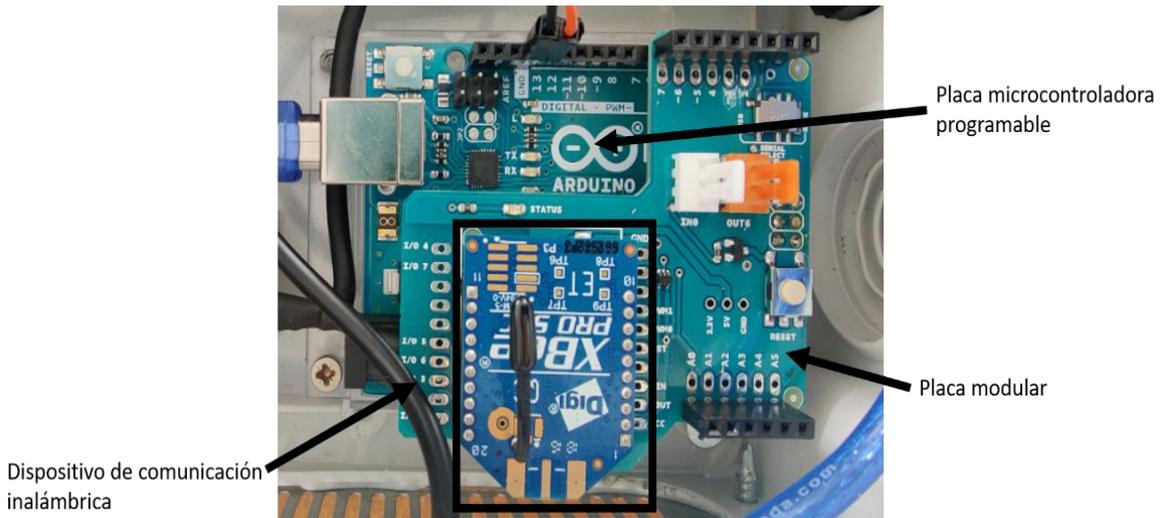


Figura 26. Montaje de la placa microcontroladora, placa modular y dispositivo de comunicación inalámbrica. Fuente: propia.

3.4. Relé de estado sólido (SSR)

Es un dispositivo electrónico de conmutación que realiza la conexión o desconexión de una carga o circuito al que esté asociado cuando circula por sus terminales de control una corriente eléctrica determinada. Es similar al funcionamiento que tiene un relé electromecánico convencional, pero con la ventaja de no tener partes móviles, lo que permite poder alcanzar tiempos de conexión y desconexión del orden del milisegundo, mucho mejores que con un relé electromecánico donde sus contactos sí que lo son. Otra de las ventajas de estos dispositivos es que, con una pequeña corriente de control, se pueden llegar a controlar grandes potencias [17].

La utilidad que tiene este componente dentro de nuestro prototipo es la de abrir y/o cerrar el circuito cuando el Arduino se lo indique, por lo tanto, como se ha indicado anteriormente, se conectarán mediante dos cables los pines del Arduino a los bornes de control del relé como muestra la Figura 27.

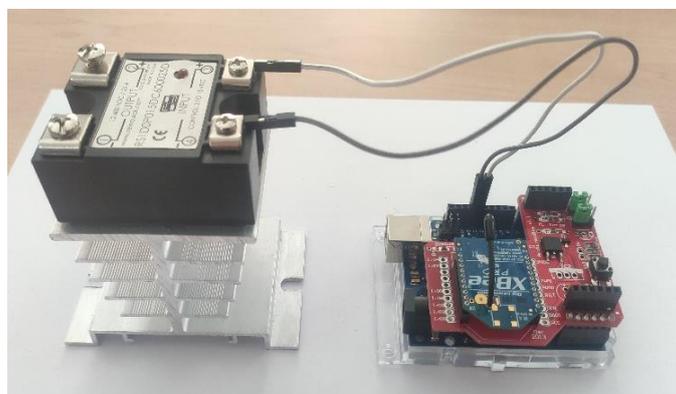


Figura 27. Relé montado sobre el radiador y conectado al Arduino. Fuente: propia.

Para este prototipo de partida se utilizará este tipo de relé como dispositivo conmutador, pero para el siguiente prototipo que estará dimensionado para conmutar potencias mucho mayores, se necesitará un interruptor electrónico con otras características que se detallarán en otro epígrafe.

3.5. Radiador o disipador

Se encarga de transferir la energía por calor hacia el entorno para evitar aumentos de temperaturas indeseados en los componentes electrónicos, en nuestro caso en el relé de estado sólido. Para que esta transferencia de calor sea eficaz la conductividad térmica del material debe ser buena. En el prototipo de partida el disipador no se ha dimensionado según ningún criterio, fue directamente proporcionado por el propio fabricante. En la Figura 27 se muestra tanto la estructura del radiador como su montaje.

3.6. Otros componentes: caja, batería, hub y conexiones

La caja sobre la que están montados todos los dispositivos es una caja de aluminio, ventilada y sobre la que se ha mecanizado varios agujeros, uno para un interruptor que permita encender o apagar el HUB, otro para la carga de la batería, dos (positivo y negativo) para la conexión de la placa solar al prototipo y un último para poder encender y apagar la batería.

El uso de la batería en este dispositivo proporciona una gran autonomía y sencillez ya que de esta forma no va a ser necesario trasladar a planta un sistema de generación de energía alternativo para alimentarlo. Para este prototipo de partida se ha utilizado una Powerbank que podrá ser cargada a través de uno de los agujeros practicados sobre la caja del dispositivo. El objetivo por lo tanto es mediante la batería alimentar un HUB que irá montado sobre ella, para que posteriormente éste alimente al Arduino.

El HUB es dispositivo encargado de alimentar, a través de USB, el Arduino. Su uso nos permite tener un mayor número de puertos USB además de contar con un interruptor que se llevará sobre uno de los lados de la caja para su conexión y desconexión. En la Figura 28 se muestra la caja que aloja el dispositivo y el sistema de alimentación batería-HUB para el Arduino. La conexión del relé de estado sólido

al módulo fotovoltaico se realiza a través unos bornes pasamuros empotrados sobre uno de los laterales de la caja y con cable de cobre de 1,5 mm² de sección. También se utilizaron terminales y punteras de conexión para un mejor contacto entre partes activas, así como un diseño con una impresora 3D sobre la que irá colocada el Arduino



Figura 28. Caja del prototipo (izquierda). Sistema de alimentación batería-hub para el Arduino (derecha). Fuente: propia.

4. Construcción del prototipo OPTRONBOX V2

En el presente apartado se van a detallar cada uno de los elementos del prototipo OPTRONBOX V2, así como las funcionalidades que tienen dentro del dispositivo y las ventajas que presenta frente a la versión de partida detallada en el epígrafe anterior. Para ello, en primer lugar, se van a enumerar cada uno de estos elementos, aunque alguno de ellos como coinciden con los del dispositivo anterior y ya se han explicado, simplemente se mencionarán los ligeros cambios que se han tenido que efectuar sin entrar de nuevo en su explicación.

- ✚ Placa microcontroladora programable
- ✚ Placa modular
- ✚ Dispositivos de comunicación inalámbrica
- ✚ Relé de estado sólido, SSR
- ✚ Caja o envolvente
- ✚ Ventiladores
- ✚ IGBT
- ✚ Radiador del IGBT
- ✚ Convertidor CC/CC
- ✚ Circuito amortiguador snubber
- ✚ Batería de alimentación solar

En la Figura 29 se observan todos los componentes anteriormente mencionados y montados sobre el dispositivo desarrollado Optronbox V2. En la Figura 30 se puede ver el esquema eléctrico unifilar del dispositivo conectado a una placa solar y a una fuente de alimentación de corriente continua.

En este caso se pueden conmutar mayores tensiones (1700 V) que en el dispositivo anterior (600 V), por lo tanto, el dispositivo encargado de abrir y cerrar el circuito de los paneles y la fuente en lugar de ser el SSR, será un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). Para que este transistor abra o cierre el circuito conectado a él, se debe de aplicar una tensión determinada sobre su puerta, como se explicará más adelante. Para realizar este control, el SSR será el encargado de abrir y cerrar el circuito de alimentación a la puerta. Además, como la tensión de alimentación que se tiene del Arduino y por lo tanto del SSR son 5 V, y la tensión de alimentación

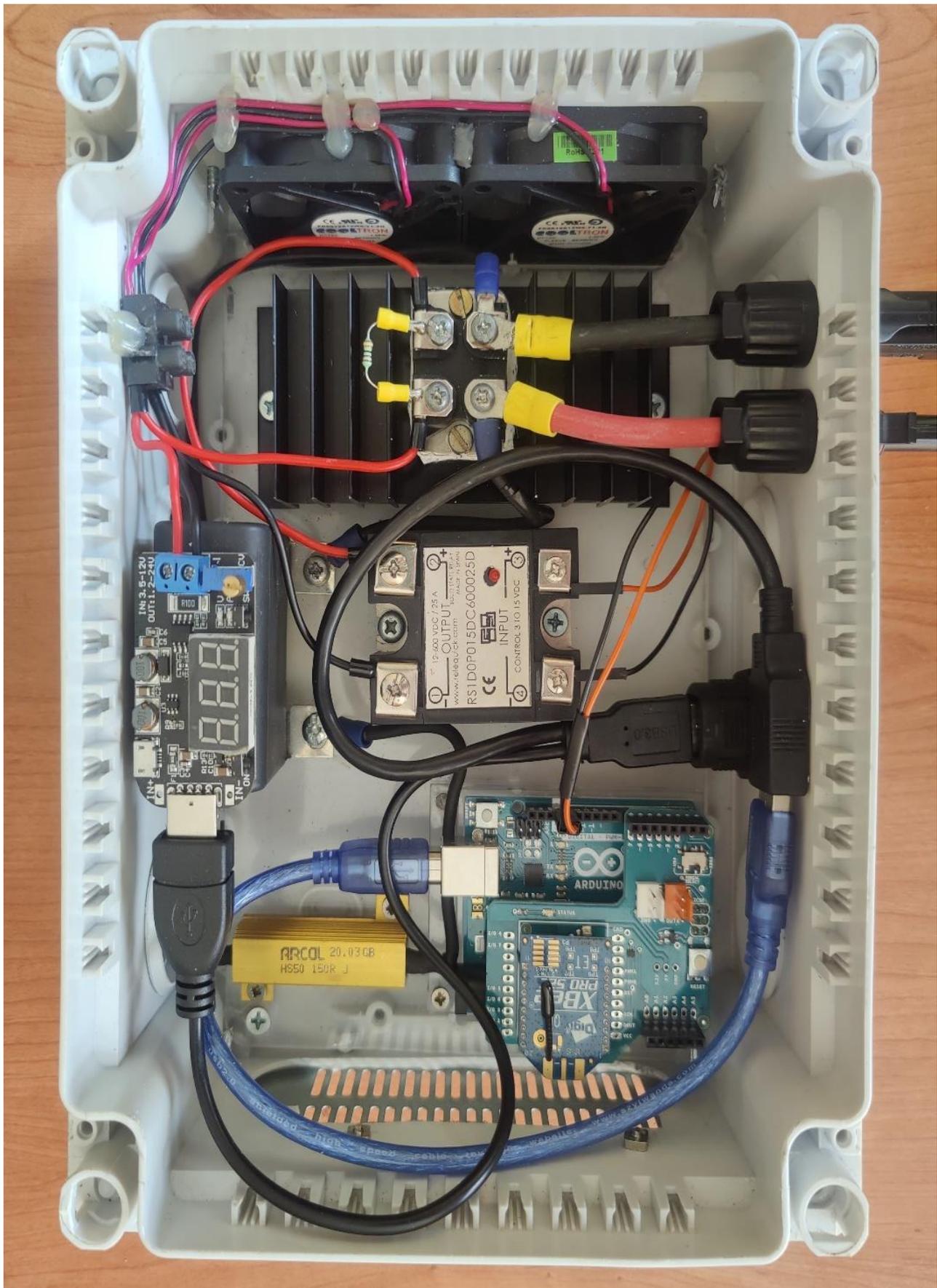


Figura 29. Estructura interna del prototipo Optronbox V2. Fuente: propia.

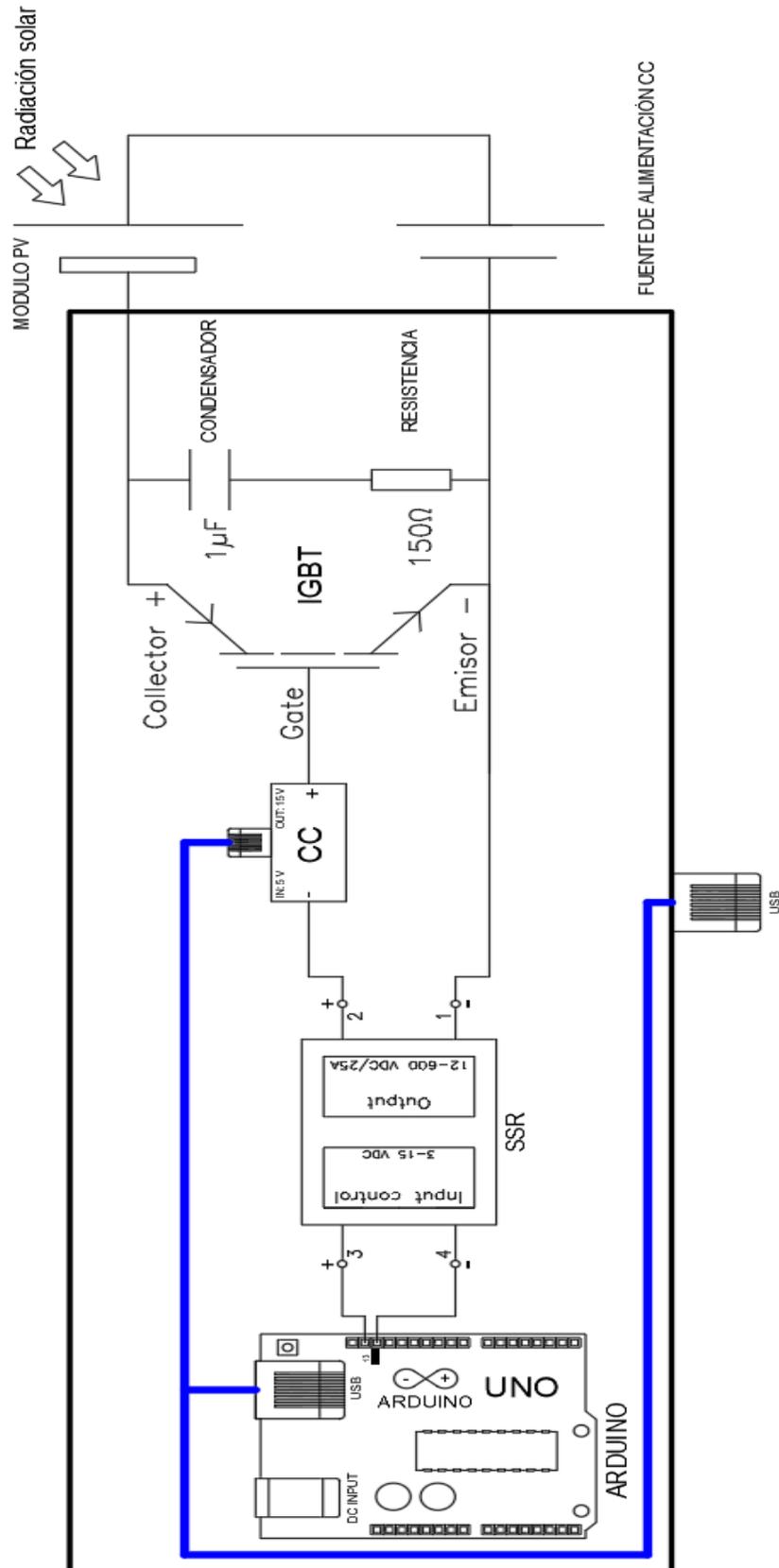


Figura 30. Esquema unifilar del prototipo Optronbox V2 conectado a unos paneles fotovoltaicos y a una fuente de alimentación de corriente continua. Fuente: propia.

necesaria en la puerta del IGBT es más elevada, es necesario utilizar un convertidor CC-CC capaz de elevar la tensión desde los 5 V hasta los 15 V que se van a tener en los terminales de puerta del IGBT. Controlando la alimentación de la puerta del IGBT se tendrá control sobre la corriente que se inyecta a los módulos por parte de la fuente de alimentación, de tal forma que cuando la puerta esté alimentada, el IGBT permitirá el paso de corriente y cuando no lo esté, bloqueará.

4.1. Componentes existentes del prototipo de partida

En primer lugar, la placa microcontroladora programable que se ha utilizado para este dispositivo tiene las mismas características que las del prototipo de partida y el código de programación asociado a esta placa es idéntico excepto una pequeña modificación que se ha tenido que realizar para que funcionara correctamente y que se detallará a continuación.

En el caso de la placa modular, tiene las mismas características y funcionalidades que la utilizada anteriormente salvo que, por su año de fabricación, no admite velocidades de transmisión de 115.200 baudios como en el anterior dispositivo, por lo tanto y como se ha dicho anteriormente, se debe reducir esta velocidad a 9600 baudios en el código de programación.

Los dispositivos de comunicación inalámbrica utilizados son del mismo fabricante Digi, aunque se trata en este caso de un modelo más reciente con una serie de ventajas como un mayor rango de distancia para la comunicación llegando incluso a los 3.200 metros en línea vista o 90 metros en interiores.

El relé de estado sólido es también el mismo, aunque en este caso, como no va a ser el componente encargado de soportar los altos niveles de tensión correspondientes a la parte del circuito de potencia, no será necesario colocar un disipador de temperatura sobre él, reduciendo por lo tanto algo de peso y tamaños.

La caja o envoltente utilizada para este prototipo tiene unas medidas similares a la utilizada anteriormente y en lugar de ser metálica, se ha utilizado una caja de plástico para reducir el peso y evitar cualquier tipo de derivación que pudiera producirse y por lo tanto aumentar la seguridad. Sobre la caja se han practicado dos agujeros para la colocación de unas rejillas de ventilación por las que circulará el flujo de aire impulsado por los ventiladores y reducir así lo máximo posible las temperaturas en

su interior. Se ha instalado también en uno de los tetones que tiene la propia caja un pasamuros USB para la alimentación del dispositivo, o a través de la batería o del ordenador como se ha dicho anteriormente. Para la colocación de los diferentes componentes dentro de la caja, se han atornillado sobre la base de ésta una placa de metacrilato para una mejor sujeción.

4.2. Nuevos componentes

4.2.1. Ventiladores

Los ventiladores instalados para mejorar el flujo de aire por el interior del dispositivo y por lo tanto la refrigeración, son dos ventiladores de 12 V colocados en un lado de la caja. Estos ventiladores son aprovechados de una impresora 3D y se les proporcionará una tensión ligeramente superior, del orden de los 15V (en las pruebas que se han realizado con estos niveles, los ventiladores no han presentado ningún tipo de problema). La razón por la que se va a alimentar a una tensión superior viene de la necesidad de alimentar otro dispositivo que a continuación se explicará y que necesita estos niveles para su correcto funcionamiento. El aumento de tensión desde los 5V que se tenía en el prototipo de partida y que son proporcionados por el Arduino, a los 15 V que se va a tener en esta parte del circuito se tendrá gracias al uso de un convertidor elevador CC/CC.

4.2.2. Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)

En el prototipo anterior el componente encargado de abrir y cerrar el circuito asociado era un relé de estado sólido. Este relé, como se mencionó anteriormente, no es capaz de conmutar circuitos de alta tensión, y como el objetivo de este nuevo prototipo es la de trabajar con tensiones mucho más altas y, por lo tanto, poder realizar medidas de EL a un mayor número de paneles, se ha hecho uso de un transistor capaz de soportar estos niveles.

El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) es el elemento principal de nuestro prototipo, ya que va a ser el encargado de conmutar el circuito de alta potencia conectado entre sus terminales. Este dispositivo es la combinación de un transistor MOSFET y un BJT. Los transistores MOSFET tienen tiempos de conmutación muy cortos lo que les permite trabajar a altas frecuencias, superiores a 100 kHz en algunos casos, en cambio, los transistores BJT manejan altos niveles de potencia,

pero a frecuencias de conmutación más bajas, inferiores a 10 kHz. Es por tanto el IGBT una combinación de altas frecuencias de conmutación propias del MOSFET con altos niveles de potencia del BJT.

Al igual que el MOSFET, el IGBT dispone de una puerta aislada, por lo que el control únicamente se realiza mediante tensión, sin necesidad de corriente por la puerta. Por lo tanto, para abrir y cerrar el circuito se necesita dar un valor de tensión positivo en la puerta y negativo en el emisor, que según el fabricante para nuestro IGBT en concreto es como máximo de ± 20 V, y siempre superior a la tensión umbral para que permita el paso de corriente eléctrica de colector a emisor, en caso contrario el IGBT se comportaría como un circuito abierto.

En la Figura 31 extraída de la hoja de características del fabricante [18], se observa la tensión mínima que hay que aplicar a la puerta (tensión umbral) para que deje circular corriente, aproximadamente 4,5.

<https://docs.rs-online.com/b7e7/0900766b815e9d40.pdf>

Cuando se aplique una tensión a la puerta V_{GE} , el IGBT permitirá el paso de corriente eléctrica I_C de colector a emisor y entre la puerta y el emisor no circulará corriente excepto en las conmutaciones. Este fenómeno es debido a que en un transistor MOSFET entre la puerta y la fuente hay una pequeña capacidad, por lo tanto, como el IGBT está formado por este tipo de transistores, también tendrá esa pequeña capacidad entre la puerta y el emisor y es este condensador el que se tiene que cargar y descargar para que el IGBT trabaje en conmutación. Cuando este condensador esté cargado, no circulará ninguna corriente por la puerta, únicamente circulará corriente por la puerta mientras se está cargando o descargando, y este proceso dura muy poco tiempo.

Por lo anterior descrito, cuando el IGBT sea alimentado con V_{GE} y deje circular corriente I_C de colector a emisor, esta capacidad entre puerta y emisor se cargará y formará un circuito cerrado por sus terminales, por lo tanto, cuando se deje de alimentar la puerta, como el condensador está cargado, en lugar de abrir e interrumpir el paso de corriente, el circuito permanecerá cerrado y mantendrá al IGBT en conducción. Para solventar este problema, se debe conectar una resistencia de pulldown entre la puerta y el emisor que permita la descarga del condensador a

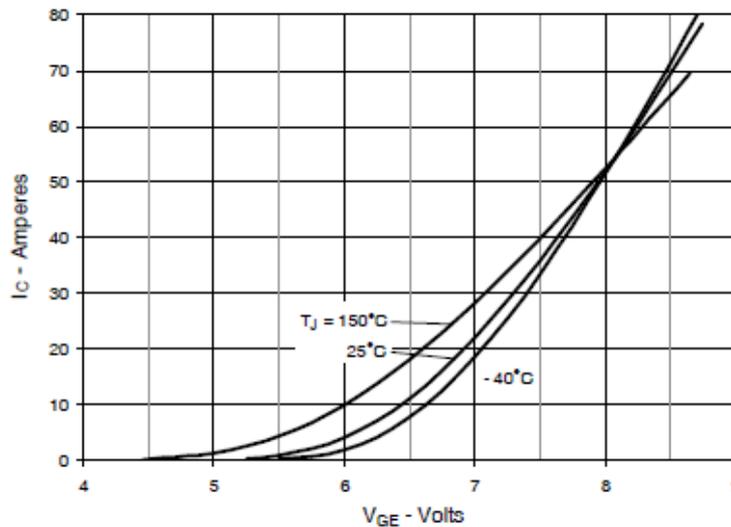


Figura 31. Relación entre la tensión en la puerta y la corriente que circula de colector a emisor. Fuente: [18].

través de ella, para que una vez este cargado y se quiera realizar la conmutación, este condensador no lo impida y se pueda cambiar el estado a corte.

Como se indicará en el siguiente apartado del dimensionado del radiador, cuanto mayor sea la tensión de alimentación que se aplique a la puerta, menor será la caída de tensión cuando se encuentre en saturación (conducción) para una misma intensidad, que, según el fabricante, será siempre $\leq 4\text{V}$. El valor de tensión V_{GE} que se aplicará por tanto será de 15 V y obtendremos una caída de tensión de colector a emisor, según las gráficas del fabricante, de 3,1 V, para una intensidad de 10 A.

4.2.3. Radiador del IGBT

Las pérdidas energéticas ocasionadas en el interior de un semiconductor se convierten en importantes aumentos de temperatura. Cualquier semiconductor tiene unas temperaturas máximas y mínimas para su correcto funcionamiento, si estas temperaturas son sobrepasadas, el material semiconductor puede dañarse y por lo tanto la fiabilidad se ve afectada. Es por esto por lo que, a diferencia del prototipo de

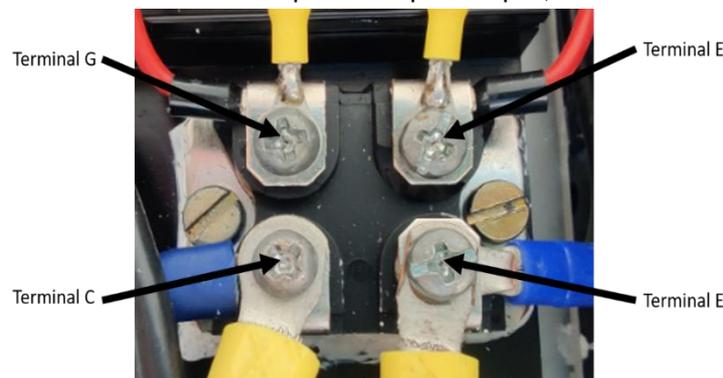


Figura 32. Transistor IGBT y sus terminales de conexión. Fuente: propia.

partida, en el diseño de este prototipo que trabajará con tensiones muy superiores y con el fin de evitar estas temperaturas, se ha dimensionado un radiador que permita limitar temperaturas máximas que se pudieran alcanzar en función de la potencia que va a disipar el IGBT cuando esté conduciendo [19]. La potencia que se debe disipar en el radiador viene expresada en la Ecuación 4 [20].

$$P_D = V_{CE} \times I_C$$

Ecuación 4. Potencia disipada en el semiconductor. Fuente: [19].

donde:

- ✚ P_D : Potencia disipada en el semiconductor, en vatios (W)
- ✚ V_{CE} : Diferencia de tensión entre los terminales colector y emisor, en voltios (V)
- ✚ I_C : Corriente eléctrica que circula del terminal colector al emisor, en amperios (A)

Para ello, en primer lugar, se debe conocer la intensidad que va a circular a través del IGBT de colector a emisor, I_C . Esta intensidad va a ser la que circule por cada panel y por lo tanto por cada string, ya que están dispuestos en serie. La intensidad que circula por cada panel en condiciones estándar de medida (STC- standard test conditions) será la que nos proporciona el fabricante para sus módulos fotovoltaicos, como cada tipo de panel tendrá unas intensidades diferentes dependiendo de diferentes parámetros como por ejemplo la tecnología del semiconductor (monocristalino, policristalino, amorfo), disposición de las obleas, etcétera se va a elegir una intensidad sobredimensionada de tal forma que el cálculo quede, por seguridad, más desfavorable. Además, se ha visto que la gran mayoría de los paneles fotovoltaicos del mercado actual no superan este valor. La intensidad elegida por tanto será de 10 A, $I_C = 10$ A.

El otro término que se debe definir es la caída de tensión entre los terminales colector y emisor, para ello, se debe recurrir a la hoja de características proporcionada por el fabricante para el IGBT y definir antes tanto la temperatura máxima de funcionamiento como la tensión de control aplicada en la puerta del semiconductor.

Según esta hoja, la temperatura máxima en funcionamiento de la unión es de 175°C., para sobredimensionar el cálculo y aumentar la seguridad, se ha multiplicado esta temperatura por un factor $k = 0.8$, de tal manera que la temperatura máxima que pueda soportar se va a limitar y reducir como se muestra en la Ecuación 5

$$T_j = T_{j \text{ máx}} \times k$$

Ecuación 5. Temperatura máxima reducida. Fuente: [19].

siendo:

- T_j : temperatura máxima de la unión del semiconductor, en grados centígrados (°C).
- k : factor de seguridad, adimensional.

Por tanto, queda:

$$T_j = T_{j \text{ máx}} \times k = 175 \times 0,8 = 144 \text{ °C.}$$

Como se observa en las curvas características del IGBT, concretamente en la página 3, para una temperatura de 150°C, ligeramente superior a la anteriormente calculada, según la tensión de alimentación, V_{GE} y la corriente que circula por el interior del semiconductor, I_C , se tiene una caída de tensión diferente entre colector y emisor V_{CE} . Se puede observar también, que cuanto más tensión se proporcione a la puerta, para una misma intensidad, la caída de tensión que se tiene V_{CE} es inferior, por lo tanto, se ha decidido alimentar la puerta del IGBT a una tensión de 15 V.

En la Figura 33 se muestra la caída de tensión que se va a tener para este caso, que aproximadamente va a ser $V_{CE} = 3,1 \text{ V}$.

Ya se tienen todos los términos de la Ecuación 4, por lo tanto, la potencia disipada es:

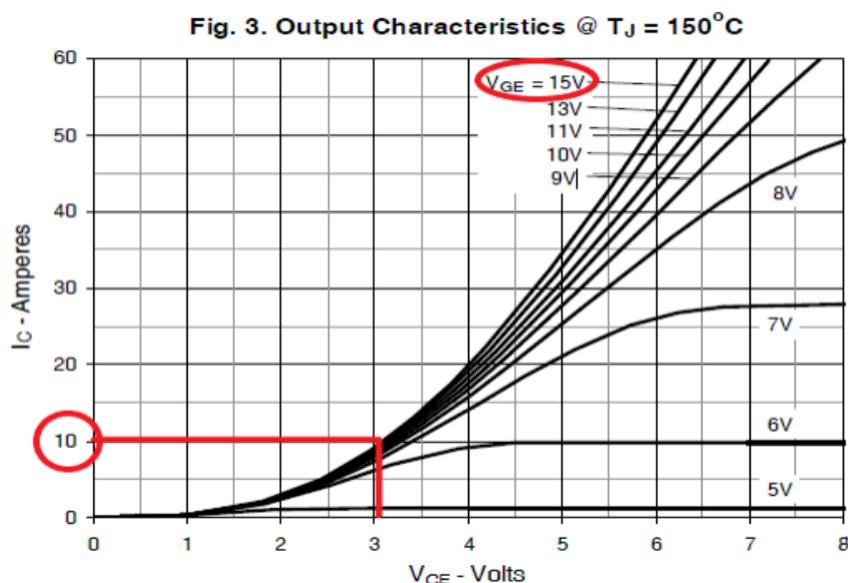


Figura 33. Caída de tensión puerta-emisor. Fuente: [18].

$$P_D = V_{CE} \times I_C = 3,1 \times 10 = 31$$

Los procesos de transmisión de calor desde el interior del semiconductor hasta el ambiente son la conducción, convección y radiación, este análisis térmico tiene una similitud o analogía con el análisis eléctrico, es decir, las caídas de tensión representan diferencias de temperatura, los elementos resistivos corresponden con resistencias térmicas entre componentes y la intensidad se asocia a la potencia. En la Figura 34 se representa un diagrama con esta analogía [19].

Finalmente, la Ecuación 6 que relaciona la potencia disipada en el semiconductor con la temperatura máxima en la unión es [19]:

$$P_D = \frac{T_j - T_a}{R_{th-ja}}$$

Ecuación 6. Relación entre la potencia disipada y la temperatura máxima. Fuente [19].

siendo:

- ✚ P_D : potencia disipada en el semiconductor, en vatios (W).
- ✚ T_j : temperatura máxima de la unión del semiconductor, en grados centígrados (°C).
- ✚ T_a : temperatura ambiente, en grados centígrados (°C).
- ✚ R_{th-ja} : resistencia térmica entre la unión del semiconductor y el ambiente, en °C/ W.

La resistencia térmica entre la unión del semiconductor y el ambiente se puede descomponer en varias resistencias conectadas en serie como muestra la Ecuación 7.

$$R_{th-ja} = R_{j-c} + R_{c-s} + R_{s-a}$$

Ecuación 7. Resistencia térmica unión-ambiente. Fuente: [19].

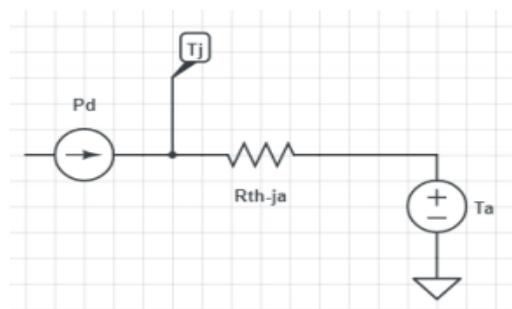


Figura 34. Analogía térmica con la eléctrica. Fuente: [19].

siendo:

- ✚ R_{j-c} : resistencia térmica entre la unión y el encapsulado del dispositivo semiconductor, en °C/W.
- ✚ R_{c-s} : resistencia térmica entre el encapsulado y el radiador o disipador, en °C/W.
- ✚ R_{s-a} : resistencia térmica entre el radiador y el ambiente, en °C/W.

Sustituyendo en la Ecuación 6 la resistencia térmica total por la suma individual de unión-encapsulado, encapsulado-radiador y radiador-ambiente y despejando la diferencia de temperaturas entre la unión y el ambiente se obtiene la Ecuación 8.

$$P_D = \frac{T_j - T_a}{R_{j-c} + R_{c-s} + R_{s-a}}$$

Ecuación 8. Relación entre la potencia disipada y la temperatura máxima, con resistencias en serie. Fuente: [19].

En la Figura 37 se representa un esquema de cada una de estas resistencias.

Las resistencias térmicas tanto de la unión con el encapsulado como del encapsulado con el radiador también las proporciona el fabricante en su hoja, como muestra la Figura 36.

Finalmente, el único valor que no se tiene y el cual se quiere hallar para dimensionar el radiador que se debe instalar para cumplir las exigencias descritas por el fabricante y por lo tanto asegurar un buen funcionamiento térmico es la resistencia térmica entre el radiador y el ambiente, R_{s-a} .

Desarrollando la Ecuación 8 se tiene:

$$T_j - T_A \geq P_D \cdot (R_{jC} + R_{cS} + R_{SA})$$

sustituyendo los datos y tomando una temperatura ambiente desfavorable de 40°C:

$$144^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} \geq 31\text{W} \cdot \left(0,22 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0,05 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + R_{SA}\right)$$

se obtiene un valor de resistencia térmica del radiador de $R_{SA} \leq 3.08$ °C/W. Por motivos económicos y para un mejor sobredimensionamiento, el radiador que se debe instalar para el semiconductor IGBT va a tener una resistencia térmica de 2,5°C/W, inferior y por lo tanto ventajoso, del necesario teóricamente. En la Figura 35 se muestra el radiador sobre el que se ha montado el IGBT.

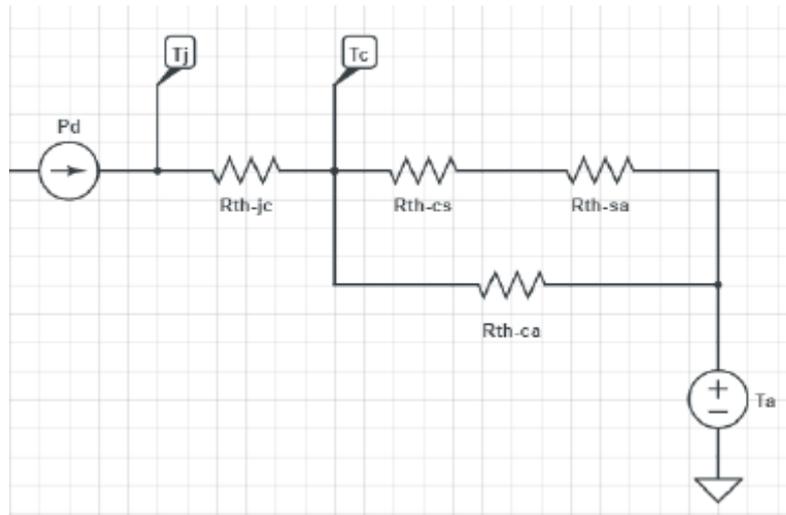


Figura 37. Analogía térmica con eléctrica y resistencias en serie. Fuente: [19].

R_{thJC}		0.22 °C/W
R_{thCS}	0.05	°C/W

Figura 36. Resistencias térmicas unión – encapsulado y encapsulado – radiador. Fuente: [18].

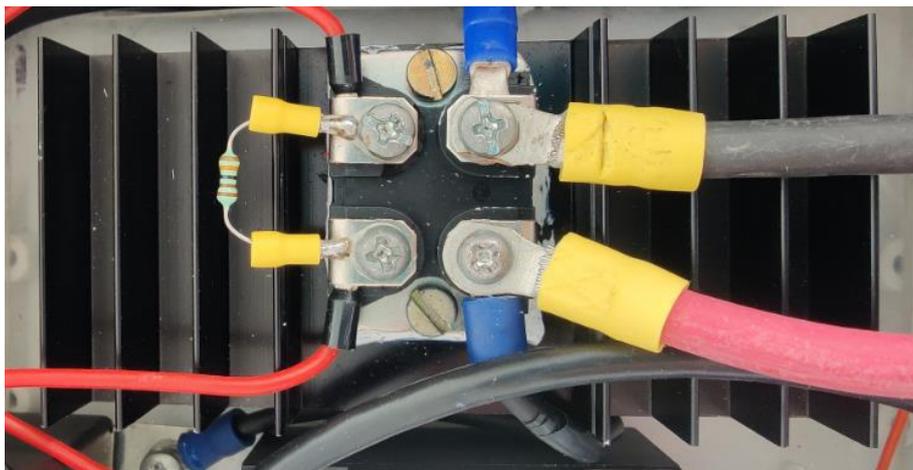


Figura 35. Transistor IGBT montado sobre el radiador. Fuente: propia.

4.2.4. Convertidor CC/CC elevador

La parte de control de nuestro prototipo es la que menor tensión va a tener y está formada por el Arduino, el relé de estado sólido y el convertidor CC-CC que aquí detallaremos. Como se ha dicho, la alimentación del prototipo se puede realizar mediante batería o mediante conexión directa a un ordenador, ambas a través de puerto USB; este tipo de puertos funcionan con una tensión de 5V, inferior a la que se necesita en los terminales de control del interruptor IGBT, por lo tanto, para llegar a estos niveles de tensión y poder controlar el componente principal del dispositivo, se tiene que hacer uso de un convertidor CC-CC.

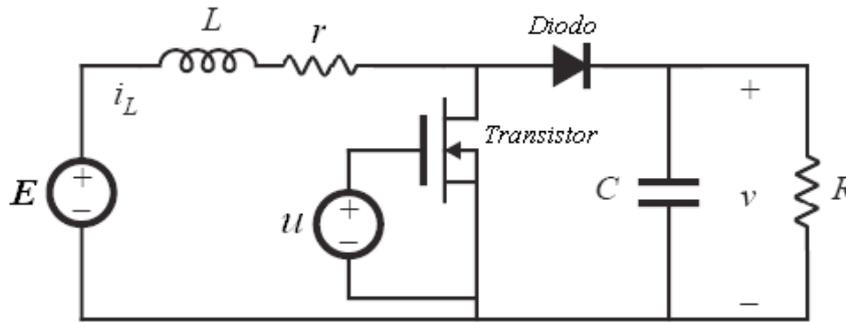


Figura 38. Modelo eléctrico convertidor CC-CC Boost. Fuente: [26]

Los convertidores CC-CC son unos dispositivos que convierten una fuente de continua en otra fuente de continua de diferente nivel de tensión, por lo tanto, a efectos podría considerarse como un transformador en corriente alterna ya que se utilizan para subir o bajar el voltaje. Existen diferentes tipologías de convertidores CC-CC según eleven o reduzcan la tensión con respecto a la de su entrada, por ejemplo, existen reductores, elevadores, reductor-elevador. En este diseño en concreto se va a hacer uso de un convertidor elevador, o también conocido como “step up” o “Boost”, que se encargará de elevarnos la tensión desde los 5V que nos proporciona la salida del Arduino hasta los 15 V que necesitamos en los terminales de control del IGBT. En la Figura 38 se muestra la topología de un convertidor CC-CC Boost.

El convertidor CC/CC utilizado permite una tensión de entrada y de salida de, respectivamente:

$$V_{IN} \in \{3,5 - 12\} V$$

$$V_{OUT} \in \{1.2 - 24\} V$$

En la Figura 39 se muestra el convertidor utilizado, que cuenta además con una pantalla de visualización donde se muestra la intensidad de corriente que circula a través de él, así como un regulador que permite fijar el valor de tensión que se desee dentro de los límites indicados anteriormente.



Figura 39. Convertidor CC-CC utilizado en el prototipo. Fuente: propia.

4.2.5. Circuito “snubber”

Una red “snubber” es un conjunto de componentes pasivos y/o activos que se incorporan en un circuito de electrónica de potencia para la protección de los dispositivos de conmutación. El objetivo principal de este tipo de circuitos es la de absorber la energía de los elementos reactivos del circuito durante los procesos de conmutación, controlando parámetros como la amortiguación de las oscilaciones transitorias, control en los cambios de tensión o intensidad y la protección contra sobretensiones, de esta manera se incrementa la fiabilidad de los semiconductores al reducirse la degradación que sufren debido a los aumentos de potencia disipada y de la temperatura de la unión del semiconductor. El correcto diseño y dimensionamiento de este circuito mejoran el rendimiento de los transistores, la eficiencia y reducen las interferencias EMI. También posibilitan el funcionamiento en frecuencias de conmutación mayores y reducen la disipación de potencia [21] [22].

Existen varias configuraciones para los circuitos “snubber”, por ejemplo, un circuito RCD (resistencia, condensador, diodo), RC (resistencia, condensador), entre otros. [23]. En ambos casos, el cálculo y dimensionamiento del circuito Snubber requiere de equipamiento que no se tiene en el grupo de investigación GdS Optronlab pero como es un elemento que es necesario instalar dadas las tensiones de trabajo de nuestro sistema, que pueden llegar hasta los 1700V, se ha consultado con un experto de la Universidad de Valladolid, en concreto del departamento de Electrónica de Potencia, para que nos dijese unos valores de capacidad y resistencia para nuestro circuito RC, de tal manera que, aunque no se haya hecho un cálculo teórico, el circuito queda protegido y sobredimensionado ante todos estos posibles fenómenos. Además, como el coste económico de estos componentes es muy pequeño, sobredimensionarlos no ha sido un problema.

El circuito Snubber de este prototipo consta de un simple condensador y resistencia en paralelo con el dispositivo de conmutación, en nuestro caso el IGBT. A continuación, se va a detallar el cálculo teórico que se debe seguir para el dimensionamiento de una red “snubber” RC, que utiliza una metodología que cambia la frecuencia de resonancia para calcular la inductancia parásita (L) y la capacidad parásita C_0 de las conexiones y posteriormente calcula el condensador de protección $C_{snubber}$ y la resistencia de protección $R_{snubber}$, así como los equipos que requiere:

- ✚ En primer lugar, se debe medir la frecuencia de oscilación f_0
- ✚ A continuación, añadir un condensador C_1 en paralelo al transistor y medir la frecuencia de oscilación desplazada. El valor de C_1 debe ser varias veces mayor que la capacidad parásita mostrada en la hoja de características proporcionada por el fabricante del transistor. El fabricante del IGBT utilizado en este prototipo indica los valores que muestra la Figura 40 y Figura 41.
- ✚ Halladas estas dos frecuencias, calcular el ratio de desplazamiento de frecuencia:

$$m = \frac{f_0}{f_1}$$

- ✚ Calcular la capacidad parásita del circuito:

$$C_0 = \frac{C_1}{(m^2 - 1)}$$

- ✚ Calcular la inductancia parásita del circuito:

$$L = \frac{(m^2 - 1)}{(2\pi f_0)^2 \times C_0}$$

$\left. \begin{matrix} C_{ies} \\ C_{oes} \\ C_{res} \end{matrix} \right\}$	$V_{CE} = 25V, V_{GE} = 0V, f = 1MHz$	<table style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td style="text-align: center;">3100</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">210</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">55</td></tr> </table>	3100	210	55	<table style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td style="text-align: center;">pF</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">pF</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">pF</td></tr> </table>	pF	pF	pF
3100									
210									
55									
pF									
pF									
pF									

Figura 40. Valores de capacidad parásita para una frecuencia de 1 MHz y una tensión de puerta 25V. Fuente: [18]

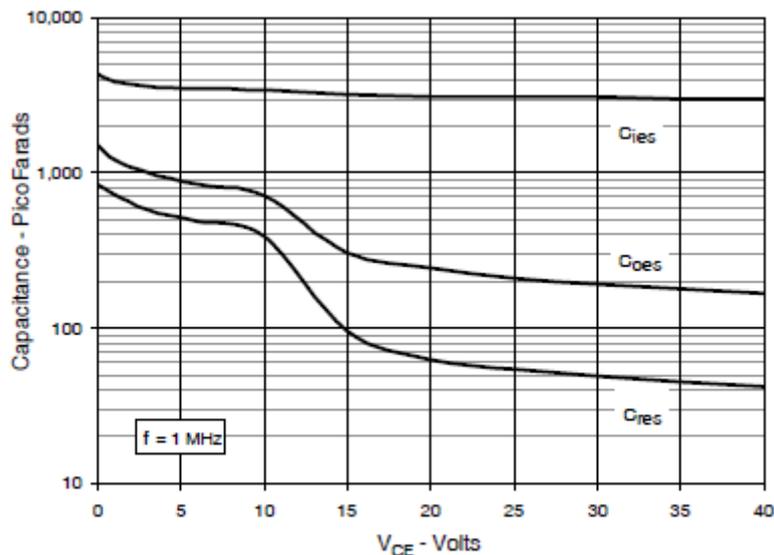


Figura 41. Valores de capacidad parásita para una frecuencia de 1 MHz y diferentes tensiones de puerta. Fuente: [18]

- ✚ Calcular el valor inicial del condensador “snubber”:

$$C_{snubber} = 3 \times C_0$$

- ✚ Calcular el valor inicial de la resistencia “snubber”:

$$R_{snubber} = \sqrt{\frac{L}{C_0}}$$

Los valores de capacidad y resistencia para el prototipo diseñado son:

$$C_{snubber} = 1 \mu F$$

$$R_{snubber} = 150 \Omega$$

“Si se desea reducir las pérdidas o ajustar la amplitud de la oscilación, lo mejor es cambiar el valor de $C_{snubber}$. Se puede usar un valor menor para tener menores pérdidas, pero se tendrá un valor mayor de oscilación. O se puede usar un valor mayor de $C_{snubber}$ para obtener menor oscilación, pero con más pérdidas en $R_{snubber}$. Usando un valor de $R_{snubber}$ entre la mitad o el doble del valor calculado, en la mayoría de los casos se mantiene una excelente amortiguación” [23].

El uso de estos circuitos “snubber” es fundamental para solventar los problemas de resonancia y cumplir con los límites de emisiones establecidos por las normas. Este tipo de circuitos aparentemente puede parecer que no hacen nada, pero un buen dimensionado de ellos contribuye en la reducción de las EMI de conmutación en las fuentes de alimentación o en los convertidores de potencia [23].

4.2.6. Batería solar de alimentación

En el diseño de este prototipo se ha decidido extraer la batería de su interior debido a diversos problemas de funcionamiento que ocasionó en la anterior versión y a su difícil extracción cuando era necesaria su reparación.

Como este prototipo cuenta con un puerto hembra USB empotrado en uno de los laterales de la caja, su alimentación se puede realizar con una batería externa o con un ordenador. De esta manera también se reduce el peso del prototipo

La batería que se va a utilizar es de gran capacidad, 26800 mAh, para poder realizar medidas de EL con una autonomía suficiente para una jornada laboral completa.



Figura 42. Batería solar para la alimentación del prototipo. Fuente: propia.

Además, cuenta con unas pequeñas células solares que ayudan a que la descarga de la batería sea más lenta, como muestra la Figura 42.

4.3. Ventajas de Optronbox V2

Alguna de las ventajas que ofrece este dispositivo frente al anterior se detallan a continuación:

- ✚ Capacidad para realizar inspecciones de EL a un gran número de paneles y por lo tanto niveles de tensión superiores, del orden de los 1700V, adaptándose por tanto a las plantaciones solares de nueva construcción.
- ✚ Cuenta con ventilación forzada gracias a dos ventiladores colocados sobre uno de los laterales del dispositivo que nos evitarán aumentos indeseados de temperatura y un mejor flujo de aire a través de los componentes.
- ✚ La versatilidad de poder alimentar de dos formas diferentes, a través de un ordenador o mediante una batería externa que no estará integrada en el propio dispositivo, nos reduce el peso notablemente, además, como la batería es solar, la autonomía que nos proporciona es también ligeramente mayor.

5. Pruebas de funcionamiento realizadas

5.1. Ensayo con carga resistiva en laboratorio

El grupo GdS Optronlab no posee de fuentes de alimentación de gran potencia para verificar que el dispositivo funciona correctamente y que los componentes que lo forman están bien dimensionados y no están dañados, por lo tanto, se consultó con varios profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid para realizar unas primeras pruebas a unos niveles de tensión superiores, del orden de los 500 V, proporcionados por una fuente de alimentación que este departamento posee. Tras contactar con ellos y concretar un día para el ensayo, el grupo GdS Optronlab se reunió en el laboratorio de máquinas eléctricas situado en el edificio Paseo del Cauce para realizar estas medidas y ver el funcionamiento del dispositivo.

En esta primera etapa de construcción del prototipo, los componentes aún no estaban en la caja actual, donde existe una ventilación y una mejor transmisión de calor gracias a la pasta térmica, por lo tanto, las temperaturas que pudimos alcanzar fueron superiores a las de hoy en día.

En lugar de utilizar módulos fotovoltaicos, se utilizó una carga resistiva de 40 Ohmios. El propósito de esta prueba fue, como se ha dicho anteriormente, verificar el correcto funcionamiento del dispositivo. Para ello se realizaron medidas a diferentes valores de tensión y se fueron tomando datos de corriente y de la temperatura de los componentes. Para que los ensayos fueran aún más desfavorables, se mantuvo en conducción el IGBT durante varios segundos hasta que alcanzara una temperatura estable. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para estas magnitudes.

Tabla 1. Valores obtenidos tras el ensayo. Fuente: propia.

Carga (Ω)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)
40	100	2	23,3
	200	5	35,44
	300	7,5	46,27
	400	10	63
	500	12,75	94,72

5.1.1. Ensayo a 100 V:

Como se puede observar en Figura 43 tomadas con una cámara termográfica, las temperaturas alcanzadas en el IGBT, que es el componente que mayor tensión va a soportar, son aproximadamente la temperatura ambiente para una intensidad de 2 A. (En algunos casos las imágenes no tienen un enfoque muy bueno debido a que se tomaron manualmente)

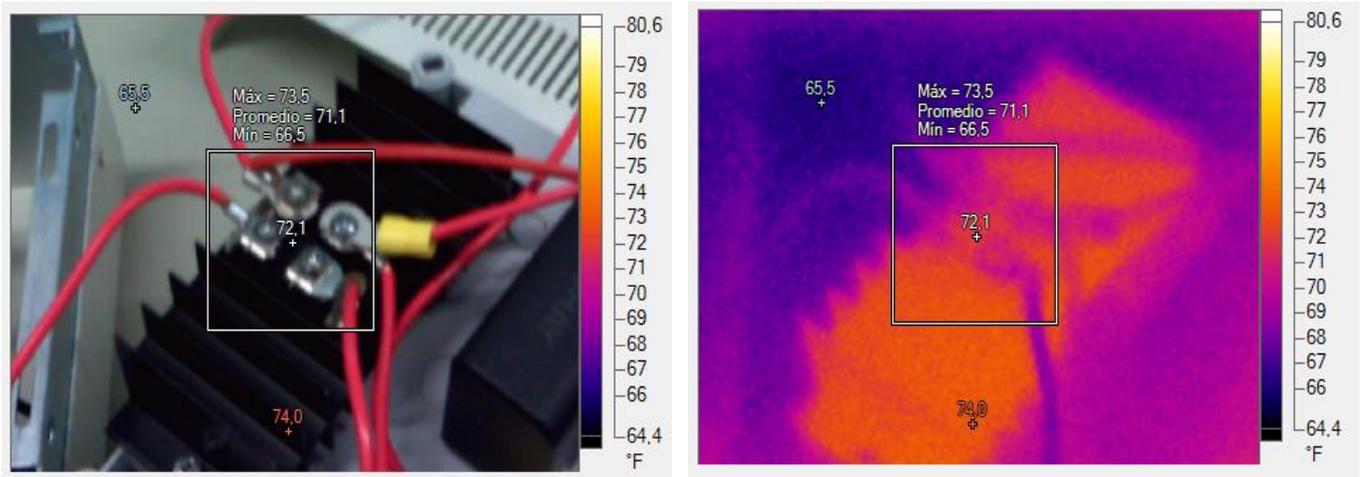


Figura 43. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 100 V. Fuente: propia.

5.1.2. Ensayo a 200 V

Para una tensión de 200V, vemos que existe una evolución de la temperatura con respecto al caso anterior, ya que se está haciendo circular el doble de intensidad, qué se alcanza sobre todo en los contactos de potencia (Colector – Emisor) del IGBT, llegando a los 35 grados centígrados.

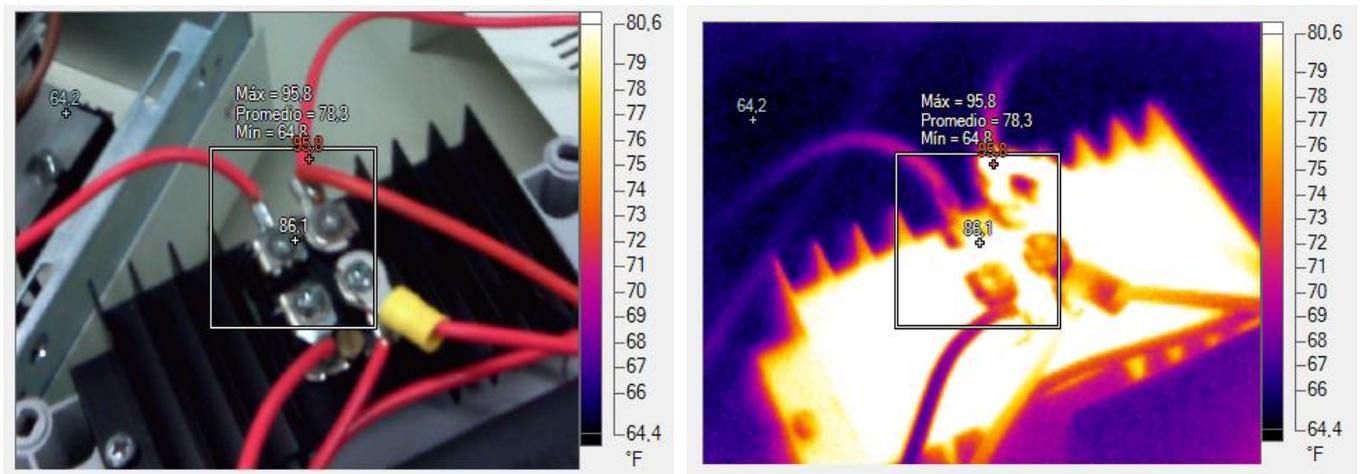


Figura 44. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 200 V. Fuente: propia.

5.1.3. Ensayo a 300 V

En estos niveles de tensión, se empieza a observar temperaturas máximas que rondan los 47 °C, de nuevo en la zona de los contactos de potencia del IGBT. Las corrientes de trabajo en una planta solar en condiciones soleadas pueden ser del orden de los 8 A aproximadamente; en este caso se están haciendo circular 7,5 A y como se puede observar las temperaturas alcanzadas no son para nada peligrosas.

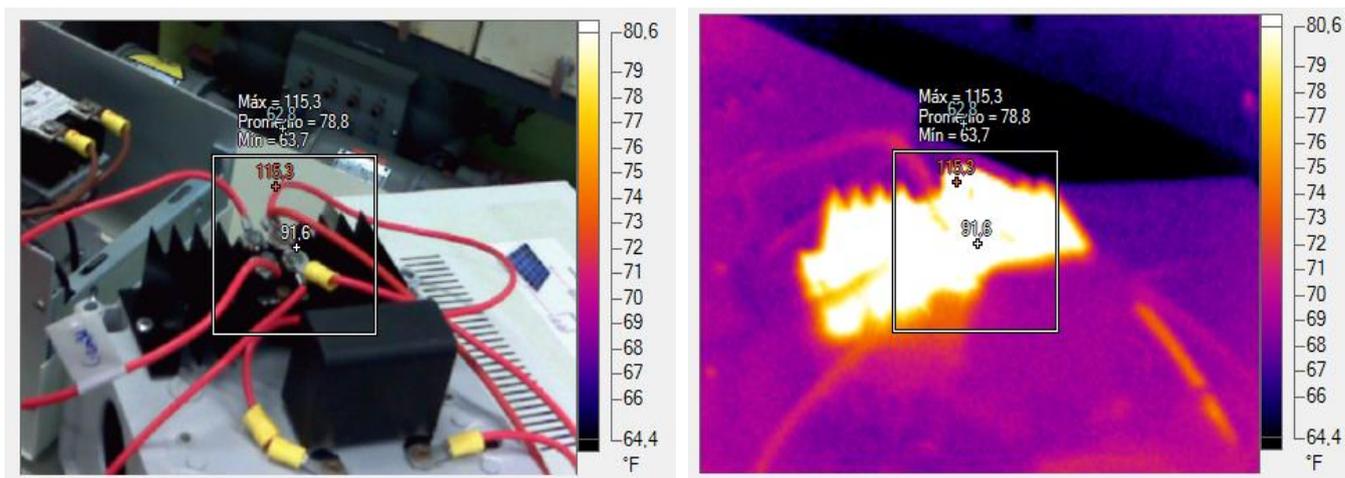


Figura 45. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 300 V. Fuente: propia.

5.1.4. Ensayo a 400 V

Con una intensidad de corriente de 10 A, se siguen teniendo temperaturas aceptables de alrededor 60°C y de nuevo en los contactos de potencia como cabría esperar.

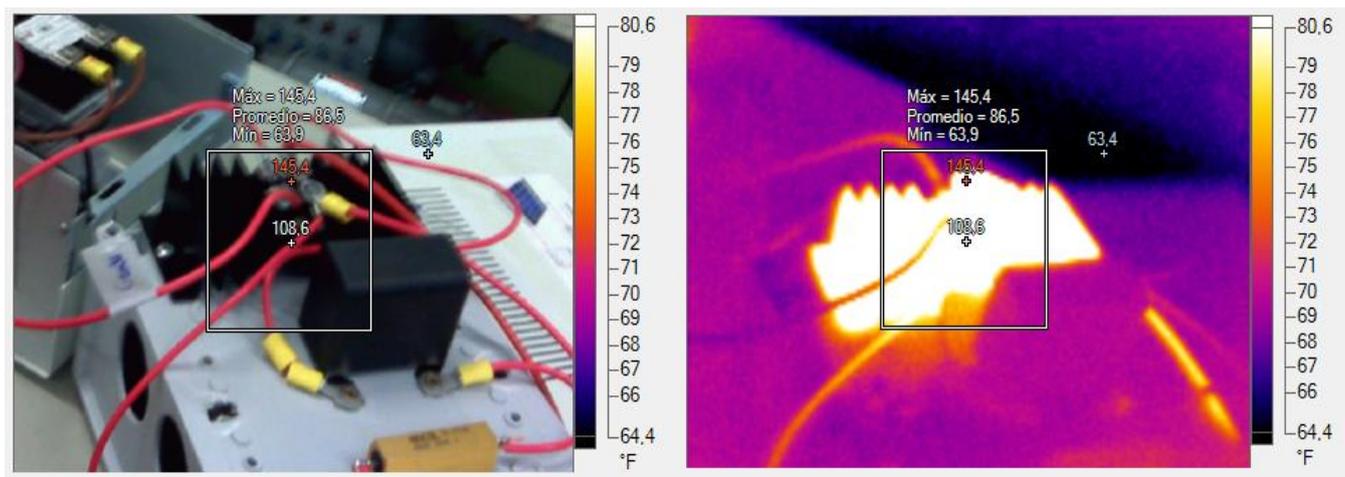


Figura 46. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 400 V. Fuente: propia.

5.1.5. Ensayo a 500 V

Finalmente, para una tensión de 500 V se tienen temperaturas ya altas, que rondan los 95 grados centígrados, debidas a la alta intensidad que se está haciendo circular,

del orden de los 13 A (estas intensidades no se darán en una instalación solar) y a la falta de un equipo de refrigeración. La temperatura del radiador como se muestra en la Figura 47, es de aproximadamente 47 °C, 20 grados más que en el primer ensayo de 100 V.

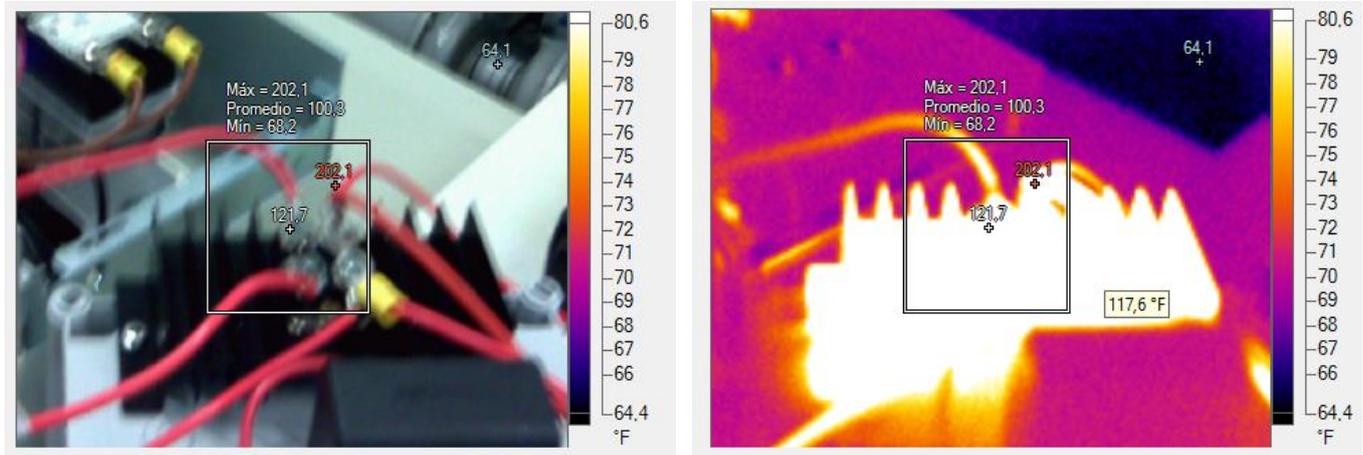


Figura 47. Temperaturas alcanzadas en visible (izquierda) e infrarrojo (derecha) para una tensión de 500 V. Fuente: propia.

5.2. Ensayo con módulo fotovoltaico en laboratorio

Así como en el apartado anterior se testeó el dispositivo para diferentes tensiones y se pudo ver que, para tensiones altas, los componentes no sufren ningún tipo de daño, en este apartado se va a mostrar el ensayo de EL que se realizó en el laboratorio del edificio Lucia para testear que el prototipo realiza la polarización del módulo fotovoltaico correctamente y por lo tanto que la imagen de (EL) procesada por el ordenador donde se encuentra el software pertinente para ello es apta para determinar el buen funcionamiento del Optronbox V2.

Para realizar este ensayo se hizo uso de lo que en un ensayo de EL común sería necesario, una cámara CCD de InGaAs capaz de recoger imágenes en longitudes de onda similares a las que emite el panel, una fuente de alimentación encargada de suministrar la tensión necesaria para polarizar el módulo fotovoltaico, un software encargado de realizar la resta de imágenes en dos estados (con el módulo polarizado y con el módulo en circuito abierto) y por último el prototipo diseñado encargado de cambiar el estado al panel (polarizado y circuito abierto).

El módulo fotovoltaico para examinar es un módulo que se utiliza para pruebas en el laboratorio y que a priori parece estar en perfectas condiciones para producir lo que el fabricante indique en su hoja de características.

Para la toma de una buena imagen de EL, la cámara utilizada requiere de previos ajustes de enfoque y ángulo de apertura, de tal manera que en función de la distancia a la que esté colocada el módulo a examinar, en ángulo de apertura del objetivo debe estar más o menos abierto. Cuanto más lejos esté el objeto, menor ángulo de apertura debe tener y por lo tanto menor luz entrará.

Otros de los ajustes que se deben configurar, en este caso en el software, es el tiempo de exposición de la cámara, jugando con éste y el ángulo de apertura anteriormente mencionado, se deberá ver el módulo con una calidad aceptable. Por último, el software se encarga de realizar dos restas en dos estados diferentes, un estado es con el módulo polarizado y por lo tanto emitiendo luz, y otro estado con el módulo en circuito abierto; estas dos restas de imágenes corresponden a un ciclo, por lo tanto, cuantos más ciclos se configuren, mejor es la imagen que se va a obtener, aunque llegado un número máximo, la imagen empieza a empeorar.

Realizados todos estos ajustes, introduciendo un número de ciclos conveniente, y verificando que el software ha reconocido tanto al Arduino como a la cámara, ya se está en disposición de introducir en la fuente la tensión de alimentación necesaria para polarizar el módulo; como la prueba se realizó en el interior del laboratorio, donde la radiación solar es muy baja y por lo tanto también lo es la tensión de polarización necesaria, con 24 V el módulo ya estaba polarizado y emitiendo luz en el infrarrojo próximo.

En la Figura 48 se muestran los resultados obtenidos tras el ensayo.

A la vista de los resultados obtenidos, el módulo fotovoltaico que a priori parecía estar en perfectas condiciones tiene muchos daños estructurales internos lo que se traduce en pérdidas en producción de energía eléctrica si de una instalación real se tratase.

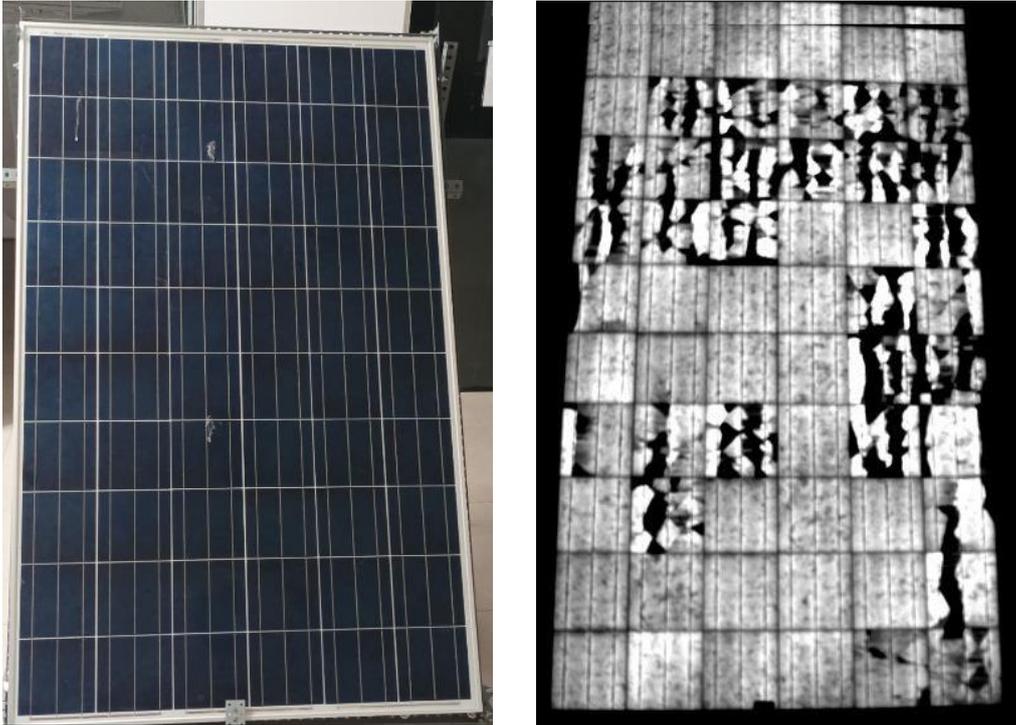


Figura 48. Módulo fotovoltaico para examinar (izquierda). Imagen de EL obtenida (derecha). Fuente: propia.

5.3. Ensayo con varios módulos fotovoltaicos en una instalación real

En este apartado se va a detallar el ensayo que se realizó en una planta fotovoltaica situada en la provincia de Cáceres que sirvió para verificar el correcto funcionamiento del prototipo diseñado en una situación real, con factores que en laboratorio no se podrían tener como por ejemplo los continuos cambios ambientales.

Tras un periodo en el que se concretó el día y lugar de la visita junto a una firma global de consultoría e ingeniería, líder en el sector de las energías renovables, se viajó a la planta solar con los equipos necesarios para realizar medidas de EL a unos paneles fotovoltaicos que habían sufrido daños debidos a unos fuertes vientos. La empresa con la que se acudió a realizar las medidas de EL cuenta con una fuente de alimentación de 15 kW y que por lo tanto permite polarizar un “string” de varios módulos fotovoltaicos conectados en serie; otro factor que no se podía simular en el laboratorio ya que la fuente con la que el grupo de investigación cuenta es muy pequeña y no es capaz de llegar a estos niveles de tensión.

La planta solar a la que se acudió cuenta con 50 MW de potencia instalada y una

superficie total ocupada de 132 Ha.

Los módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino de célula partida estaban colocados en “strings” de 44 módulos en serie con una estructura metálica para el alojamiento de los paneles solares fotovoltaicos con seguidor en un eje. Este seguidor o “tracker” está compuesto por un motor de corriente continua encargado de realizar el movimiento de la estructura y de un sensor calibrado para la máxima irradiación que permite tener a los módulos fotovoltaicos siempre orientados de manera perpendicular al sol. En la Figura 49 se muestra el “string” de paneles fotovoltaicos y la estructura con seguidor. En la Figura 50 y Figura 51 se observa el motor de c.c del seguidor, la célula calibrada y las características técnicas de los módulos fotovoltaicos utilizados en la planta.



Figura 49. String de 44 paneles fotovoltaicos (izquierda) y estructura con seguidor (derecha). Fuente: propia.



Figura 50. Motor de corriente continua para el desplazamiento de los módulos fotovoltaicos (izquierda). Sensor calibrado para el seguimiento de los módulos fotovoltaicos (derecha). Fuente: propia.



Figura 51. Características técnicas del módulo fotovoltaico. Fuente: propia.

La fuente de alimentación, como se ha dicho anteriormente, tiene una potencia máxima de 15 kW. Esta fuente de alimentación permite polarizar un gran número de paneles, dependiendo de las condiciones de radiación solar de cada día; para este ensayo en concreto, como el ambiente estaba ligeramente nublado, se pudo llegar a polarizar 24 paneles en serie. En las Figura 52 y Figura 53, se puede observar el grupo electrógeno, también proporcionado por la empresa, para la alimentación de la fuente, el prototipo desarrollado para el control de la polarización, así como una vista en detalle de la pantalla de control y visualización de la fuente.

Por seguridad tanto para los equipos como para las personas, la manera de proceder a realizar las medidas de EL fue desde niveles de tensión bajos y con un solo módulo fotovoltaico hasta valores altos y un mayor número de módulos, con el principal objetivo de ver como se comportaban todos los equipos a medida que se iba aumentando la tensión de forma gradual.

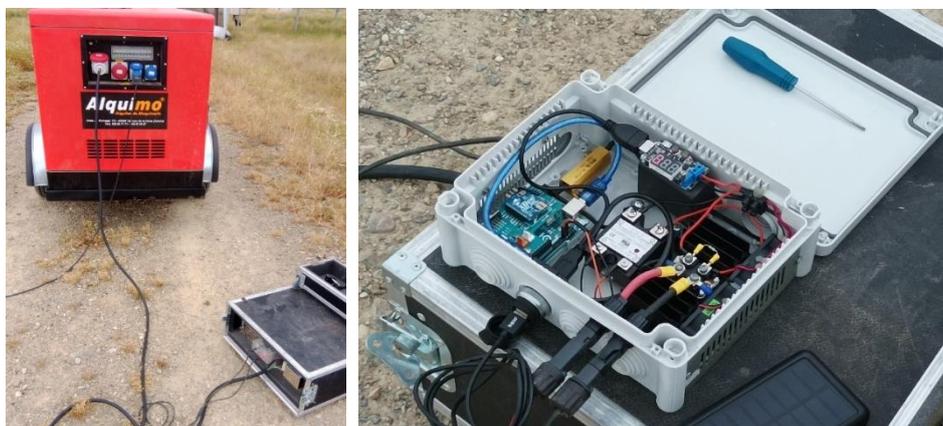


Figura 52. Conexión del grupo electrógeno con la fuente de alimentación de 15 kW (izquierda). Conexión del prototipo diseñado (derecha). Fuente: propia.



Figura 53. Vista en detalle de la pantalla de control y visualización de la fuente de alimentación. Fuente: propia. Uno de los principales componentes a proteger era la fuente de alimentación debido a su alto coste económico, de forma que, si la corriente en lugar de ser suministrada desde la fuente hacia los paneles recorría el sentido inverso, podría ser dañada.

Como se ha dicho anteriormente, la primera prueba que se realizó consistió en alimentar un único módulo fotovoltaico. Se tomaron también varias imágenes con diferentes números de ciclos. Un ciclo corresponde a la captura de cuatro imágenes, dos en estado ON y dos en estado OFF, como se explicó en el epígrafe 2.4.1.

Con 5 y 15 ciclos no se consiguió ver prácticamente nada. Con 50 y 100 ciclos ya se empiezan a apreciar imperfecciones en los módulos, aunque sin duda el número de ciclos óptimo para una visualización detallada de los defectos del panel son unos 500 ciclos como se muestra en la Figura 54.

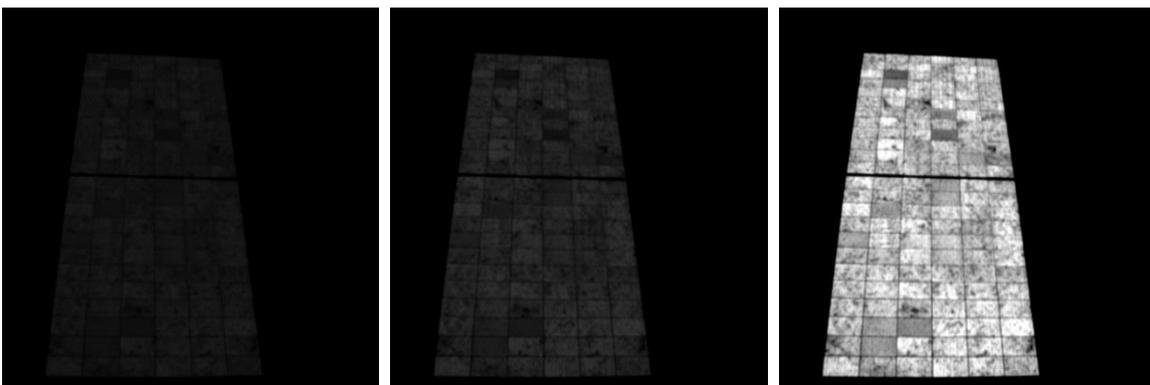


Figura 54. Imagen de EL a 1 módulo fotovoltaico con 50 (izquierda), 100 (centro) y 500 ciclos (derecha). Fuente: propia.

Al concluir este ensayo se pudo ver que el comportamiento de los equipos estaba siendo el correcto, por lo tanto, se decidió ir un paso más allá y alimentar a 6 módulos fotovoltaicos simultáneamente. Con 5 y 10 ciclos no se puede apreciar nada. Con 50 y 100 ciclos ya se empieza a ver algún detalle más, pero como ocurre en el caso anterior, 500 es sin duda, en este caso, el número de ciclos óptimo para una buena imagen de EL como muestra la Figura 56.

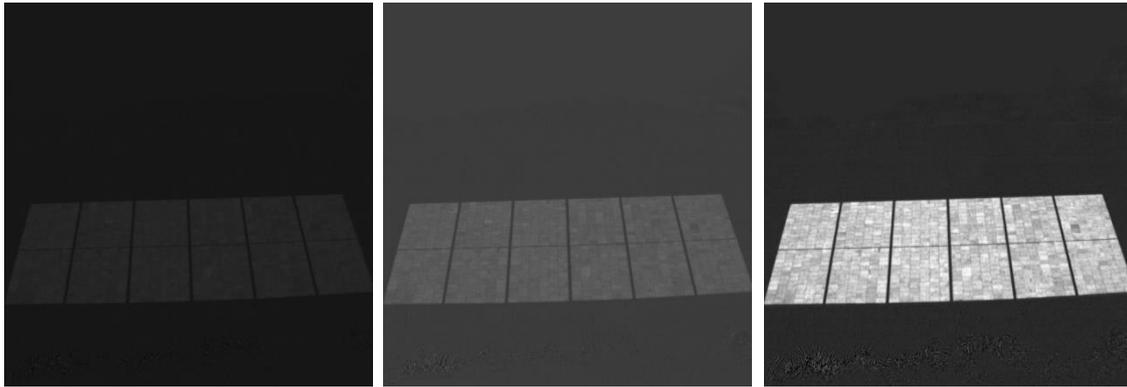


Figura 56. Imagen de EL a 6 módulos fotovoltaicos con 50 (izquierda), 100 (centro) y 500 ciclos (derecha). Fuente: propia.

El siguiente paso que se dió es alimentar 12 módulos fotovoltaicos. En este ensayo las tensiones necesarias para la polarización del módulo eran superiores a los 500 V. Al tratarse en este ensayo de una superficie ya considerable, la cámara limita una buena toma de imagen de EL, pero tanto la fuente como el prototipo desarrollado no presentaron ningún tipo de problema. En la Figura 55 se muestra el string de 12 módulos fotovoltaicos polarizado con 50 y 100 ciclos. En lugar de realizar un ensayo con 500 ciclos, se tomó una imagen más detallada de 2 de los 12 módulos polarizados, pero cabría esperar el mismo resultado que en el caso anterior.

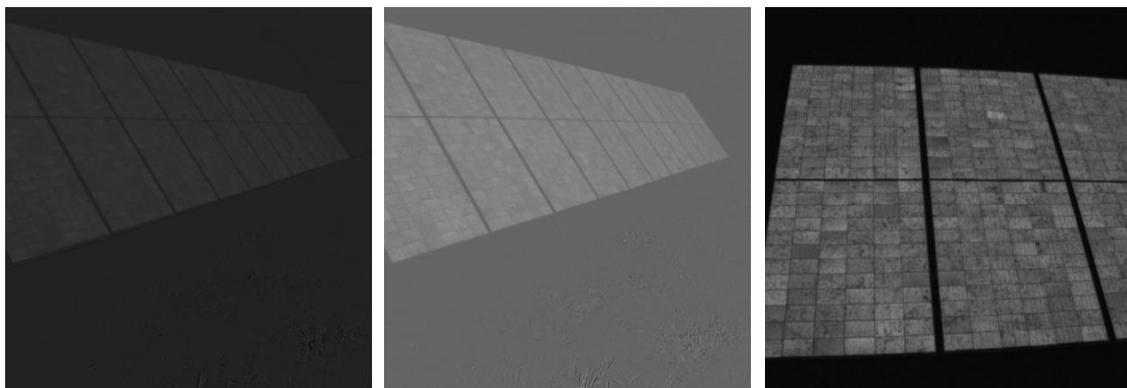


Figura 55. Imagen de EL a 12 módulos fotovoltaicos 50 (izquierda) y 100 ciclos (centro). Vista en detalle de 2 de los 12 módulos fotovoltaicos polarizados. Fuente: propia.

El último ensayo que se realizó y el más peligroso, debido a los altos niveles de tensión que se necesitan, es la polarización simultanea de 24 módulos fotovoltaicos. La tensión necesaria para la polarización de estos 24 módulos es la máxima capaz de suministrar la fuente, 1500 V con corrientes de aproximadamente 9 A. Como ocurre en el caso anterior, dada la gran superficie de los módulos, la cámara no es capaz de recoger la luminiscencia de todos los paneles con gran precisión, aunque sí que se pueden apreciar unas zonas más oscuras que otras, lo que indica la presencia probable de algún tipo de defecto. En la Figura 57 se pueden observar los 24 paneles polarizados y estas heterogeneidades en algunas zonas.

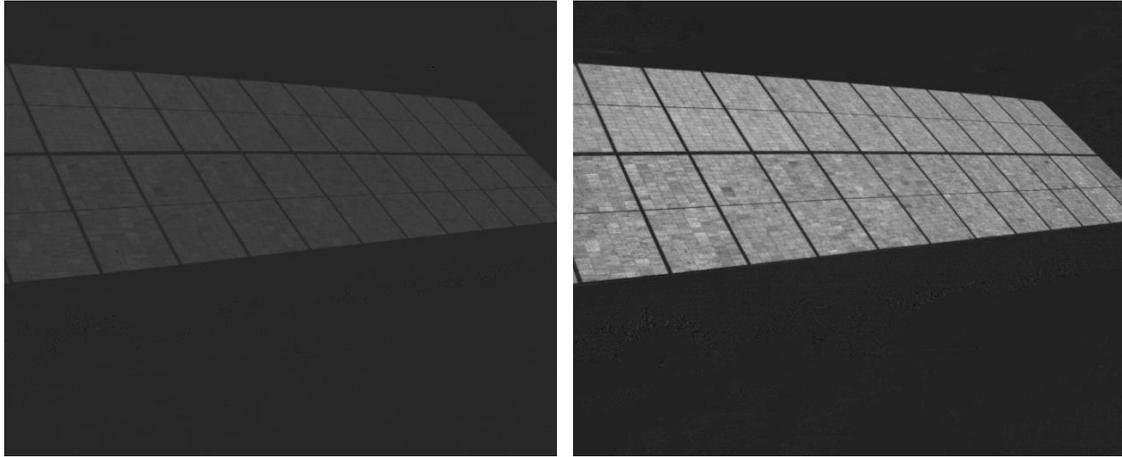


Figura 57. Imagen de EL a 24 módulos fotovoltaicos con 50 (izquierda) y 250 ciclos (derecha). Fuente: propia.

Realizar un ensayo de estas características puede servir para localizar zonas más oscuras dentro de un gran número de paneles, para posteriormente realizar una vista más en detalle de ellas y poder determinar a qué se debe la heterogeneidad encontrada. En la Figura 58 se muestra un ejemplo de una zona encontrada más oscura de lo habitual al realizar la polarización de 24 módulos y donde se tomó una imagen más detallada para ver de qué se trataba.

Lo que se pretendía con un ensayo de estas características era principalmente ver el funcionamiento del prototipo desarrollado. Con los resultados que se obtuvieron se puede afirmar que el dispositivo es correcto para realizar medidas de EL diurna hasta al menos 1500 V en condiciones ambientales similares a las que se tuvieron el día del ensayo. Con unas condiciones ambientales más soleadas y niveles de tensión de 1500 V, no se podría polarizar un número tan grande de paneles ya que la fuente de alimentación no tendría suficiente potencia, pero cabría esperar un funcionamiento correcto similar al que se tuvo.

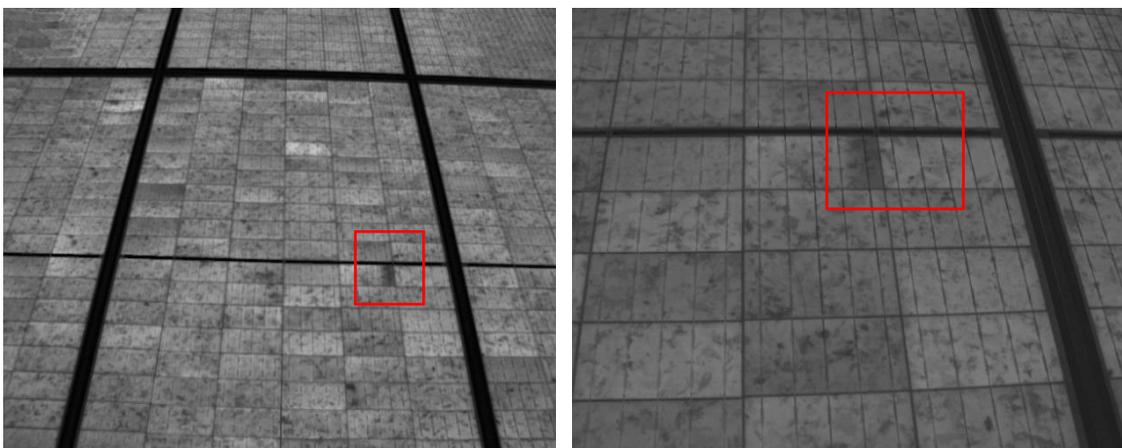


Figura 58. Vista en detalle de un módulo en concreto dentro del string de 24 módulos fotovoltaicos polarizados. Fuente: propia.

6. Resultados, conclusiones y trabajo futuro

Como se ha podido observar en el epígrafe anterior, donde se realizaban una serie de ensayos en plantas solares reales, el dispositivo desarrollado cumple con los objetivos que se pretendían.

En primer lugar, el dispositivo junto con resto de equipos necesarios es apto para realizar medidas de electroluminiscencia en cualquier instalación fotovoltaica en condiciones ambientales diurnas, obteniéndose imágenes de electroluminiscencia que aportan gran información acerca del estado del panel.

El dispositivo de partida tenía la limitación de no poder alimentar una gran cantidad de módulos fotovoltaicos dado los niveles de tensión que se llegan a alcanzar, en cambio, el dispositivo que se ha desarrollado no ha presentado ningún tipo de problema en niveles de tensión para los cuales ha sido diseñado y por lo tanto permite al operario realizar esta medida de inspección sobre mas módulos al mismo tiempo.

El dispositivo cumple también con los objetivos de ser ligero y lo suficientemente autónomo para trabajar una jornada laboral completa aunque tiene una autonomía superior gracias a la gran capacidad del sistema de alimentación que incorpora.

Como líneas futuras para el desarrollo de este dispositivo y con el objetivo de reducir su tamaño y de utilizar componentes más actuales se proponen las siguientes modificaciones:

- ✚ Sustituir el relé de estado sólido (SSR) por un transistor MOSFET, que permitirá reducir el tamaño del dispositivo final.
- ✚ Sustituir el convertidor CC/CC por una placa de circuito impreso (PCB) aportando al conjunto una mayor fiabilidad.
- ✚ Instalar indicadores leds sobre la caja para una mejor visualización de cada uno de los estados en los que se encuentre el dispositivo (permitiendo el paso de corriente eléctrica o impidiéndolo).
- ✚ Instalar fusibles de protección frente a sobrecorrientes para proteger tanto los componentes del dispositivo como la fuente de alimentación.

La Fundación General de la Universidad de Valladolid (FUNGE) ha premiado este Trabajo de Fin de Grado en el programa PROTOTIPOS – PROMETEO, para el desarrollo de prototipos orientados al mercado desarrollados por parte de los alumnos de la Universidad de Valladolid (UVa), en el curso 2020/2021.

7. Bibliografía

- [1] J. L. Balenzategui Manzanares, *FUNDAMENTOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA: LA CÉLULA SOLAR*. 2008.
- [2] International Energy Agency, *Qualification of Photovoltaic (PV) Power Plants using Mobile Test Equipment*. 2021.
- [3] C. Navntoft, N. Biurrún, M. P. Cristófalo, S. Cuccorese, I. Ramos Defferrari, and D. Raggio, *Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica*. 2019.
- [4] Junta de Castilla y León, *Energía solar fotovoltaica, manual del instalador*. 2004.
- [5] O. Perpiñan Lamigueiro, "E S Fotovoltaica," p. 194, 2012, [Online]. Available: <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC 61215-1. Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements*. 2021.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC 60904-3: 2006. Dispositivos fotovoltaicos. Parte 3: Fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (FV) de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia*. 2016.
- [8] I. Artime Montero and A. M. Díez Suárez, "ESTUDIO DE CAMPO ANALÍTICO DE LA CURVA I-V DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO MONOCRISTALINO.," p. 343, Jul. 2015, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10612/4666>.
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *IEC TS 62446-3:2017. Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 3: Photovoltaic modules and plants - Outdoor infrared thermography*. 2017.
- [10] S. Deitsch et al., "Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images," *Sol. Energy*, vol. 185, pp. 455–468, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.067.
- [11] Á. Moretón Fernández, *Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células*

solares de Silicio. 2016.

- [12] M. Guada et al., "Daylight luminescence system for silicon solar panels based on a bias switching method," *Energy Sci. Eng.*, vol. 8, no. 11, pp. 3839–3853, Nov. 2020, doi: 10.1002/ese3.781.
- [13] M. Köntges et al., "Review on failures of PV modules," 2013.
- [14] T. 82-S. photovoltaic energy systems IEC, "IEC TS 60904-13:2018 Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules." p. 40, 2018.
- [15] M. Ezquer, "Electroluminiscencia (EL): identificación de defectos en módulos FV," 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=C3Bwgg3WrI0>.
- [16] L. Stoicescu, M. Reuter, and J. H. Werner, "DaySy: luminescence imaging of PV modules in daylight," *Proc. 29th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, pp. 2553–2554, 2007.
- [17] A. Manuel, *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR - Manuel Álvarez Pulido - Google Libros*. Marcombo, 2000.
- [18] IXYS, "IXYN30N170CV1." p. 8, 2017.
- [19] R. Gómez-Aldaraví Sotos, "Cálculo y validación por simulación de la etapa de potencia de un convertidor de continua a continua elevador (DC-DC BOOST) fotovoltaico de 5 kW.," 2018.
- [20] W. Ledesma de la cruz, "El IGBT," pp. 1–80, 2019.
- [21] J. I. Morales, "Análisis de Topologías de Redes Snubber para Transistores de Potencia en Fuentes Conmutadas," pp. 1–6.
- [22] C. A. Torres Pinzón, D. Murillo Yarce, and C. Restrepo Patiño, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO Design and Construction of a Three-phase inverter," *Sci. Tech.*, no. 40, pp. 37–42, 2008.
- [23] F. Daura, "Método de cálculo de un circuito 'snubber,'" 2019. <https://www.cemdal.com/2019/07/25/método-de-cálculo-de-un-circuito-snubber/>.
- [24] YUBA, "MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS," 2014. <http://www.yubasolar.net/2014/10/mantenimiento-de-instalaciones.html>.

- [25] MICRO controladores, “Arduino uno,” 2021.
<https://microcontroladores.com/arduino/arduino-uno/>.
- [26] F. F. Valderrama, H. Moreno, and H. Manuel Vega, “Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc/dc tipo boost,” 2011.