



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN DISPOSITIVO DE
CONMUTACIÓN PARA LA REALIZACION DE MEDIDAS DE
ELECTROLUMINISCENCIA EN PANELES SOLARES**

Autor:

Garrote Cabrero, Arturo

Tutores:

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

Terrados López, Cristian

Valladolid, Julio de 2023.



Universidad de Valladolid

Diseño y montaje de un dispositivo de conmutación para la realización de medidas de electroluminiscencia en paneles solares



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Resumen

Con el objetivo de poder controlar el estado de las plantas fotovoltaicas y mantenerlas a su máximo rendimiento, se realizan inspecciones de los paneles con diferentes técnicas, cámaras térmicas, electroluminiscencia, para así detectar defectos que estén perjudicando la producción de energía.

Los análisis mediante electroluminiscencia permiten obtener imágenes que muestran el posible deterioro de los paneles, pero estas son complejas y caras, siendo necesario el uso de un generador y una fuente de alimentación. Este proyecto está enfocado en poder realizar más medidas a partir del mismo equipo, sin necesidad de usar uno más potente y caro.

Se ha diseñado y montado un prototipo que permite, a partir de una fuente de alimentación de potencia limitada, llevar a cabo mayor número de mediciones sin necesidad de trasladar el equipo por la planta, minimizando el manejo de cableado, dando pie a futuras inspecciones a una escala superior con drones.

Palabras clave: célula solar, electroluminiscencia diurna, prototipo, defectos, fuente de tensión.

ABSTRACT

In order to monitor the condition of the photovoltaic plants and keep them at their maximum performance, the panels are inspected using different techniques, thermal cameras, electroluminescence, as a way to detect defects that are impairing energy production.

The analysis by electroluminescence allows to obtain images that show the possible deterioration of the panels, but these are complex and expensive, being necessary the use of a generator and a power source. This project is focused on being able to perform more measurements from the same equipment, without the need to use a more powerful and expensive one.

A prototype has been designed and assembled that allows, from a power supply of limited power, to carry out a greater number of measurements without the need to move the equipment around the plant, minimizing the management of wiring, giving rise to future inspections on a larger scale with drones.

Keywords: solar cell, daytime electroluminescence, prototype, defects, power source.



Universidad de Valladolid

Diseño y montaje de un dispositivo de conmutación para la realización de medidas de electroluminiscencia en paneles solares



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice de contenidos

1. Introducción y objetivos.....	1
2. Células solares.....	2
2.1. Célula solar fotovoltaica.....	2
2.1.1. Principio de funcionamiento.....	2
2.1.2. Estructura y tipos de células.....	4
2.1.4. Curvas y parámetros característicos.....	6
2.1.5 Tipos de defectos.....	10
2.2. Métodos de inspección en paneles solares.....	12
2.2.1. Curvas I-V.....	12
2.2.2. Inspección visual.....	13
2.2.3. Termografía infrarroja.....	14
2.2.4. Electroluminiscencia.....	15
3. Diseño del prototipo.....	18
3.1 Esquema.....	20
3.1.1 Alimentación.....	21
3.1.2 Circuito de control.....	22
3.1.3 Circuito de potencia.....	23
3.2. Componentes.....	24
3.2.1. IGBT.....	24
3.2.2. Almohadilla térmica.....	28
3.2.3. Radiador IGBT.....	29
3.2.4. Circuito amortiguador RC.....	30
3.2.5. Módulo de comunicación inalámbrica.....	30
3.2.6. Optoacoplador.....	32
3.2.7. Resistencia.....	34
3.2.8. Interruptor.....	35
3.2.9. Circuito impreso.....	36
3.2.10. Pilas 9V con porta pilas.....	37
3.2.11. Módulo de alimentación MB-102.....	39
3.2.12. Ventilador.....	39



3.2.13. Cable multifilar de cobre.....	40
3.2.14. Conectores	41
3.2.15. Caja envolvente	43
3.2.15 Lámina de metacrilato	43
3.3 Cálculos	44
3.3.1. Resistencias eléctricas.....	44
3.3.2. Resistencias térmicas	45
4. Montaje.....	47
5. Presupuesto.....	49
6. Pruebas.....	50
7. Resultados y conclusiones	55
BIBLIOGRAFIA	57



Índice de figuras

Figura 1. Radiación solar. Fuente [3].	3
Figura 2. Trayectoria terrestre en un año. Fuente [4]	3
Figura 3. Estructura de una célula solar. Fuente [6]	5
Figura 4. Tipos de paneles de silicio. Fuente [8].	6
Figura 5. Conexión paralelo células solares. Fuente [9]	6
Figura 6. Conexión serie células solares. Fuente [9]	7
Figura 7. Valores de un panel solar real. Fuente propia	8
Figura 8. Delaminación en un panel solar. Fuente [12]	10
Figura 9. Punto caliente en un panel. Fuente [13]	11
Figura 10. Babas de caracol en un panel. Fuente [14]	11
Figura 11. Análisis mediante TIR. Fuente [17]	14
Figura 12. Prototipo construido. Fuente propia	18
Figura 13. Optronbox_v2. Fuente [18]	19
Figura 14. Esquema de circuito. Fuente propia	21
Figura 15. Circuito de control. Fuente propia	22
Figura 16. Circuito de potencia. Fuente propia	23
Figura 17. Representación de un IGBT. Fuente [19]	24
Figura 18. Sección de un IGBT. Fuente [19]	25
Figura 19. Forma IXYN200N170. Fuente [20]	25
Figura 20. Representación IGBT IXGN200N170. Fuente [20]	26
Figura 21. Almohadilla térmica. Fuente propia	28
Figura 22. Disipador universal. Fuente propia	29
Figura 23. Circuito amortiguador RC. Fuente propia	30
Figura 24. Módulo comunicación Xbee de Digi. Fuente propia	31
Figura 25. Optoacoplador LTV-847. Fuente propia	32
Figura 26. Esquema de optoacoplador 4 canales. Fuente [24]	33
Figura 27. Resistencia. Fuente propia	35
Figura 28. Resistencia bobinada. Fuente propia	35
Figura 29. Interruptores de balancín. Fuente propia	35
Figura 30. Diseño circuito impreso. Fuente propia	36
Figura 31. Circuito impreso montado. Fuente propia	37
Figura 32. Portapilas original. Fuente propia	38
Figura 33. Portapilas modificado. Fuente propia	38
Figura 34. Módulo alimentación MB-102. Fuente propia	39
Figura 35. Ventilador de ordenador. Fuente propia	40
Figura 36. Cable Hew Heinz Eilentrop. Fuente [28]	41
Figura 37. Conectores MC4 para panel solar. Fuente propia	41
Figura 38. Terminal faston circular macho. Fuente propia	42
Figura 39. Bornas para PCB. Fuente propia	42
Figura 40. Caja envolvente Lumonic.	43
Figura 41. Lámina de metacrilato. Fuente propia	43
Figura 42. Circuito resistencia-diodo. Fuente propia	44
Figura 43. Herramienta rotativa. Fuente propia	47
Figura 44. Cabezales usados con la máquina. Fuente propia	47



Figura 45. Parte frontal. Fuente propia	48
Figura 46. Parte lateral. Ventilación. Fuente propia	48
Figura 47. Prototipo conectado. Fuente propia	50
Figura 48. Fuente de alimentación conectada. Fuente propia.....	51
Figura 49. Posición para medidas. Fuente propia.....	52
Figura 50. Modulo fotovoltaico y su análisis mediante EL. Fuente propia	53



Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Circuito equivalente, intensidad por un diodo.	44
Ecuación 2. Potencia disipada en semiconductor.....	45
Ecuación 3. Resistencia equivalente.....	46
Ecuación 4. Relación potencia disipada, temperatura resistencia.....	46



Universidad de Valladolid

Diseño y montaje de un dispositivo de conmutación para la realización de medidas de electroluminiscencia en paneles solares



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice de gráficas

Gráfica 1. Variación de la radiación atmosférica solar en un año. Fuente [4]..	4
Gráfica 2. Curva I-V de un panel. Fuente [10].....	7
Gráfica 3. Variación de intensidad radiante sobre un panel. Fuente [11]	9
Gráfica 4. Variación de temperatura con intensidad radiante constante. Fuente [11].....	9
Gráfica 5. Análisis curva IV. Modulo débil. Fuente [15]	12
Gráfica 6. Análisis curva I-V. String roto. Fuente [15].....	13
Gráfica 7. Análisis curva I-V. Sombras. Fuente [15]	13
Gráfica 8. Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda. Fuente: Laboratorio	16
Gráfica 9. Caída de tensión colector-emisor en función de I_c y V_{ge} para 125°C . Fuente [20].....	45



Universidad de Valladolid

Diseño y montaje de un dispositivo de conmutación para la realización de medidas de electroluminiscencia en paneles solares



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice de tablas

Tabla 1. Valores máximos del IXGN200N170. Fuente [20]	27
Tabla 2. Valores nominales del I XGN200N170. Fuente [20]	28
Tabla 3. Valores máximos y nominales del LTV-847. Fuente [24]	34



Universidad de Valladolid

Diseño y montaje de un dispositivo de conmutación para la realización de medidas de electroluminiscencia en paneles solares



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



1. Introducción y objetivos

Hoy en día las energías renovables conforman un gran porcentaje de la energía generada en España [1], la dependencia de los combustibles fósiles es cada vez menor y la transición ecológica a estas energías no contaminantes se está llevando a cabo.

Sin embargo, la cantidad de energía que se puede generar con las renovables es mucho menor, su eficiencia está más limitada [2]. Debido a esto se contempla explotar estos recursos renovables aprovechándolos al máximo. Cada es más común tener una instalación pequeña de varios módulos fotovoltaicos en casas y edificios para consumo propio, más allá de las plantas fotovoltaicas que directamente aportan energía a la red.

En este contexto, nos centramos en la importancia de mantener la producción de energía solar en un estado óptimo, llevando a cabo inspecciones mediante electroluminiscencia diurna, las cuales suponen un dinero en alquiler de equipos y traslado de material.

El propósito principal de este trabajo es poder polarizar el mayor número de módulos fotovoltaicos posible a la hora de realizar análisis mediante electroluminiscencia. A partir de este trabajo, se pretende abaratar estos costes y alcanzar una mayor productividad.

La estructura del trabajo se desarrolla de la siguiente manera, en primer lugar, se establece un marco teórico basado en el funcionamiento de las células fotovoltaicas, los diferentes tipos y como se componen. Se expone como se lleva a cabo el análisis mediante electroluminiscencia, todos los parámetros a tener en cuenta y las ventajas que supone respecto a otros métodos.

Posteriormente se detalla cómo se ha diseñado y montado el prototipo en cuestión, los componentes usados, el rango de valores para el que ha sido diseñado y las diferencias reales respecto a otros dispositivos ya existentes.

Por último, se exponen los resultados de los ensayos con varios módulos y cómo se ha llevado a cabo el análisis a partir del software de laboratorio que permite obtener las imágenes con los defectos.



2. Células solares

El desarrollo de este apartado consistirá en una descripción, tanto del funcionamiento como de la composición, de una célula fotovoltaica. Los tipos de células existentes hoy en día, además de los posibles defectos que se pueden encontrar. Se distinguirá entre los métodos de análisis más usados, centrando la atención en la electroluminiscencia. Y para concluir se especificará el material necesario, en este caso cámaras de InGaAs, y como se llevan a cabo las mediciones para la detección de estos defectos.

2.1. Célula solar fotovoltaica

Una célula solar fotovoltaica es un dispositivo que convierte la energía del sol en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Está compuesta por materiales semiconductores que absorben los fotones de la luz solar y liberan electrones, generando una corriente eléctrica. Las células solares se interconectan en series para conformar los paneles solares, que a su vez se conectan para formar una instalación solar o fotovoltaica. Existen varios tipos de células solares, como las de silicio, monocristalinas, policristalinas etc.

2.1.1. Principio de funcionamiento

La generación de energía en una célula solar se basa en el efecto fotovoltaico. Este efecto es un fenómeno físico que se produce cuando la radiación electromagnética, en este caso luz solar, incide sobre dos materiales diferentes que están en contacto, generando así una corriente eléctrica.

En una célula solar, la unión de dos semiconductores tipo n y tipo p crea una diferencia de potencial en las uniones, donde se absorben los fotones de la luz solar y se liberan electrones. Estos se desplazan por el material conductor generando esa corriente. Como esta corriente está generada por el contacto de dos materiales diferentes, existirá una carga positiva y otra negativa.

Para poder aprovechar la radiación solar se deben tener en cuenta la inclinación y orientación de los paneles, la presencia de nubes, y la hora del día. Además, no toda la radiación que llega del sol se absorbe, esta se divide y es reflejada o absorbida por más elementos como por ejemplo la atmósfera terrestre o el suelo, *Figura 1*.

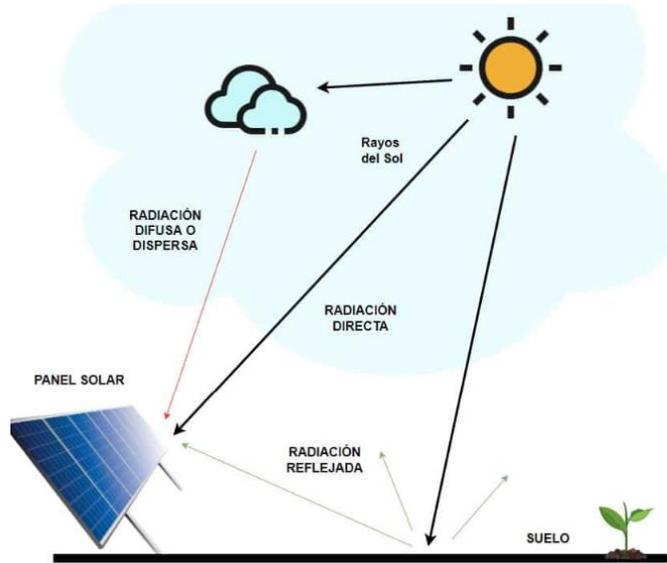


Figura 1. Radiación solar. Fuente [3].

Se debe tener en cuenta que, durante todo el año, la cantidad de radiación recibida va variando, *Gráfica 1*. La producción de energía no será la misma en meses de verano que en invierno. Esto debido a la órbita elíptica de la Tierra, *Figura 2*, que nos sitúa en el punto más cercano al sol en los meses de invierno, y en el más alejado en verano.

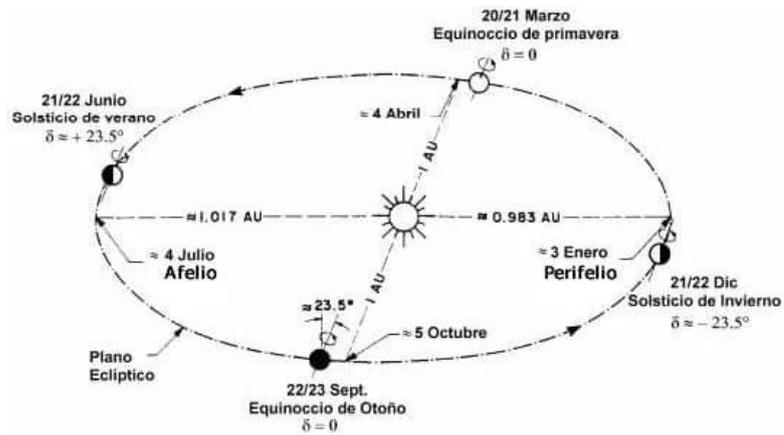
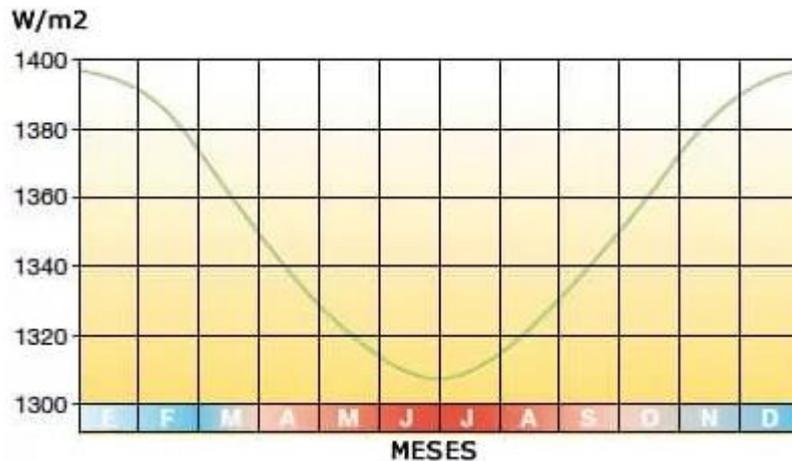


Figura 2. Trayectoria terrestre en un año. Fuente [4]



Gráfica 1. Variación de la radiación atmosférica solar en un año. Fuente [4]

2.1.2. Estructura y tipos de células

Existen varios tipos de células fotovoltaicas, como las de silicio monocristalino, policristalino, amorfo, de película delgada, de perovskita, de heterounión, bifaciales, de concentración y orgánicas. La eficiencia y el coste varían según el tipo de célula. Su estructura, *Figura 3*, se basa en [5]:

- Materiales semiconductores: como el silicio, que se utiliza para fabricar cerca del 90% de las células solares de hoy en día.
- Capa antirreflejante: se aplica en la parte superior de la célula para reducir la reflexión de la luz solar y aumentar la cantidad de luz que se absorbe.
- Contactos eléctricos: se utilizan para recoger la corriente eléctrica generada por la célula y llevarla a los cables de salida.
- Capa posterior: se utiliza para recolectar los electrones que fluyen a través de la célula y llevarlos a los contactos eléctricos.
- Capa de encapsulación: se utiliza para proteger la célula solar de los elementos y para mantener los materiales en su lugar.

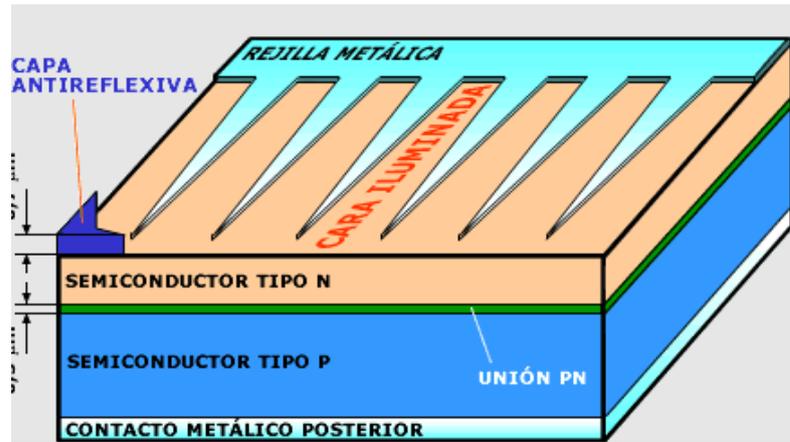


Figura 3. Estructura de una célula solar. Fuente [6]

Dentro de las células de silicio, *Figura 4*, se pueden distinguir 3 tipos [7]:

- Células de silicio monocristalino. Están constituidas por un solo cristal de silicio con una estructura uniforme. Suelen tener una forma cuadrada con esquinas redondeadas, debido al proceso de crecimiento del cristal de silicio. Su proceso de fabricación es bastante costoso, económica y energéticamente, pero su rendimiento frente a otros tipos de células es bastante superior. Presenta un bajo nivel de impureza y una alineación entre átomos de silicio perfecta.
- Células de silicio policristalino. Constituida por muchos cristales de silicio. Con forma rectangular debido a su proceso de fabricación en el que el cristal se solidifica lentamente en un molde rectangular. Presentan un mayor número de impurezas y por lo tanto un rendimiento menor frente a las células monocristalinas, la alineación entre átomos presenta direcciones diferentes. Su coste es mucho menor.
- Células de silicio amorfo. También llamadas de capa fina, están formadas por una sola estructura, de color oscuro. Son bastante más finas que las otras células, lo que las hace más flexibles y se adaptan con mayor facilidad al molde de fabricación. Presentan un rendimiento menor y una degradación más rápidas. Son las más baratas

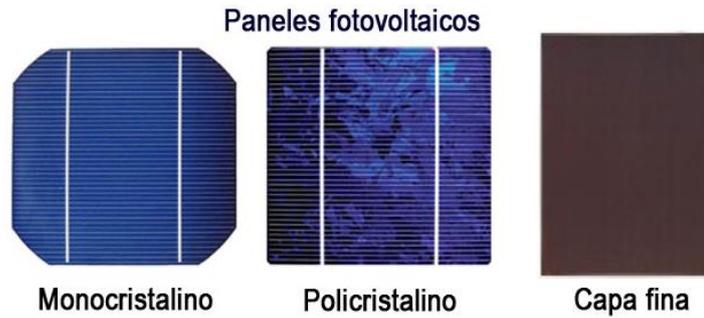


Figura 4. Tipos de paneles de silicio. Fuente [8].

2.1.4. Curvas y parámetros característicos

Los paneles solares están compuestos por varias células fotovoltaicas, dependiendo del tamaño y el objeto de uso. Cada panel tiene unos valores y rangos de tensión y corriente diferentes, por eso se va a hablar sobre estas características en términos generales.

Los paneles pueden estar conectados en paralelo, *Figura 5*, y/o en serie, *Figura 6*, formando un *string*. Esto dependerá del uso que se quiera dar a la instalación, si se quiere obtener un amperaje o un voltaje mayor.

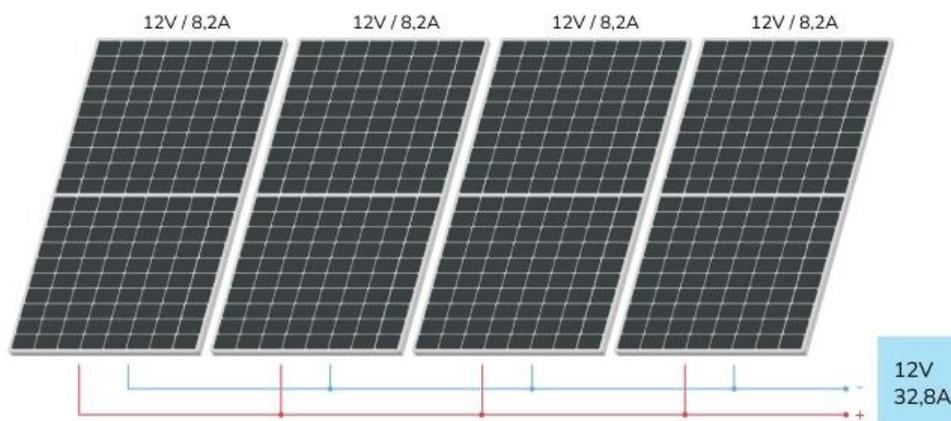


Figura 5. Conexión paralelo células solares. Fuente [9]

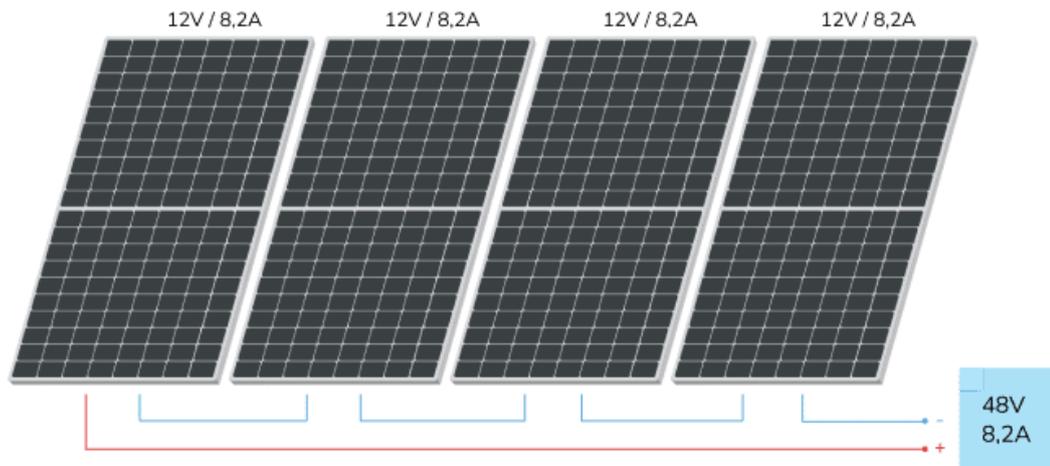
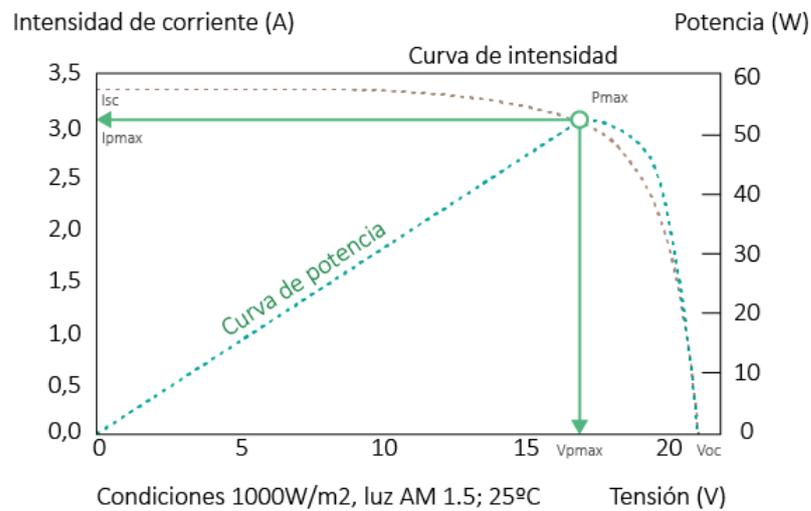


Figura 6. Conexión serie células solares. Fuente [9]

Los parámetros principales de un panel solar se obtienen a partir de su curva característica intensidad-corriente, Gráfica 2.



Gráfica 2. Curva I-V de un panel. Fuente [10]

Tal y como se observa en la Figura 7, se pueden destacar:

- I_{SC} → Corriente de cortocircuito: Intensidad máxima que puede circular por el interior del panel. Se puede ver que ese valor solo se puede alcanzar cuando la tensión en las bornas del panel es cero, la salida está cortocircuitada.

- V_{OC} → Tensión de circuito abierto: Máximo voltaje que puede generar el panel. Solo se puede obtener cuando en el circuito no existe corriente alguna, el circuito está abierto.
- P_M → Potencia máxima: Es la potencia alcanzada cuando el producto de $I \times V$ se encuentra en un valor máximo.

ReneSola		Lyoner Strasse 15 60528 Frankfurt/M Germany Tel: +49 69 6637869-0 Fax: +49 69 6637869-11 http://www.renesola.com/	
Renesola Deutschland GmbH		Made in EU	
Module Type: JC255M - 24/Bb			
Maximum Power (Pmax)	255 W	Power Tolerance	0/+5W
Open Circuit Voltage(Voc)	37.5 V	Short Circuit Current(Isc)	8.86 A
Maximum Power Voltage(Vmp)	30.4 V	Maximum Power Current(Imp)	8.39 A
Maximum System Voltage	1000 VDC	Maximum Series Fuse Rating	20 A
Dimension(L*W*H)	1640*992*40 mm	Weight	19 Kg

All technical data at standard test condition
AM=1.5 E=1000W/m² Tc=25°C

This unit produces electrical power when exposed to light. Cover glass before opening terminal junction box.

For field connections,
use minimum 4mm² copper wires insulated for a minimum 90°C

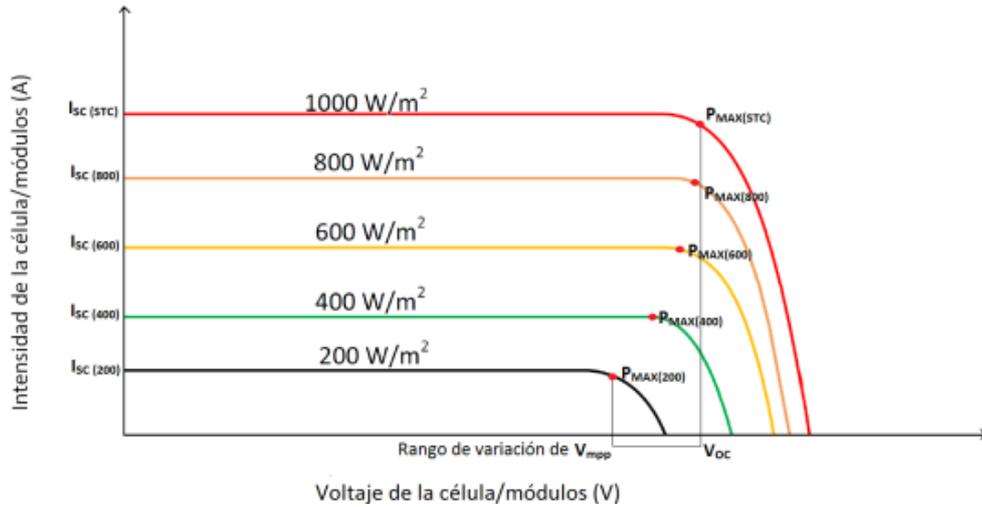
420406v00061
Module Application: Class A

Figura 7. Valores de un panel solar real. Fuente propia

Cabe destacar que, a la hora de otorgar valores a esos parámetros, la realidad se ve afectada en gran medida por las condiciones exteriores. Los paneles solares no trabajan en su punto de potencia máxima, aunque para ello existan dispositivos seguidores de punto máximo, si no que el punto de funcionamiento de un panel vendrá determinado por la carga a la que se le conecta.

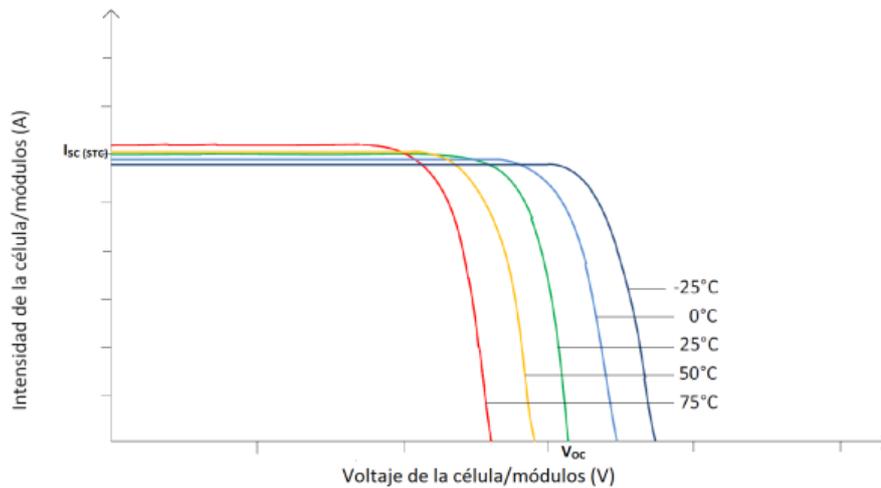
Si se tienen en cuenta condiciones exteriores como la radiación y la temperatura, se pueden establecer dos curvas que ayudan a entender el funcionamiento bajo determinadas condiciones.

En la *Gráfica 3* se observa que la corriente eléctrica disminuye en gran medida con una menor radiación incidente. En el estándar internacional establece como intensidad “de un sol” a un valor de 1000W/m² a 25° C. De forma que cuando se habla de potencia de pico de un panel, se establece para esas condiciones de radiación y temperaturas nombradas.



Gráfica 3. Variación de intensidad radiante sobre un panel. Fuente [11]

Por otro lado, en la Gráfica 8Gráfica 4, se puede diferenciar como la tensión máxima que puede alcanzar un panel se ve disminuida con el aumento de temperatura. Para poder ahorrar tiempo a la hora de realizar cálculos, se establece que la temperatura media de un panel solar se encuentra entre los 20°C y 25°C, y a su vez, el rendimiento se sitúa alrededor del 80%.



Gráfica 4. Variación de temperatura con intensidad radiante constante. Fuente [11]

2.1.5 Tipos de defectos

La pérdida de rendimiento en paneles solares no tiene por qué ser síntoma de envejecimiento. Desde que se instalan, incluso antes de ello, los paneles son sometidos a riesgos de roturas y fallas. Se van a nombrar los más frecuentes.

- **Delaminación:** Consiste en la separación de la lámina de vidrio que protege el panel de la célula, permitiendo el paso de humedad y aire al sistema, causando corrosión y pérdida de rendimiento. Suele empezar en los extremos del panel e ir avanzando hacia el centro y se identifica mediante manchas en el propio panel, *Figura 8*.



Figura 8. Delaminación en un panel solar. Fuente [12]

- **Microgrietas:** Son grietas muy pequeñas que no son observables a simple vista. Se producen durante el transporte o instalación del equipo si no se tiene cuidado suficiente. Tienen un efecto parecido a la delaminación, el panel pierde el sellado al vacío que lleva y permite la entrada de agentes externos.
- **Puntos calientes:** Es una consecuencia generada por algún defecto anterior, se producen en zonas del panel que se sobrecargan y alcanzan temperaturas muy altas, debido a malas conexiones o imperfecciones del panel. Cuando la corriente circula por una de estas zonas, el aumento de resistencia provocado por alguna de estas imperfecciones hace que se pierda en energía en forma de calor, *Figura 9*.



Figura 9. Punto caliente en un panel. Fuente [13]

- Baba de caracol: Llamado así por la forma que deja en el panel, como si hubiese pasado un caracol por encima, *Figura 10*. Este defecto aparece al cabo de pocos años y comúnmente en paneles de baja calidad. Puede provocar microrroturas e incluso puntos calientes.



Figura 10. Babas de caracol en un panel. Fuente [14]

2.2. Métodos de inspección en paneles solares

A continuación, se contemplan los cuatro métodos de detección de fallos en paneles solares.

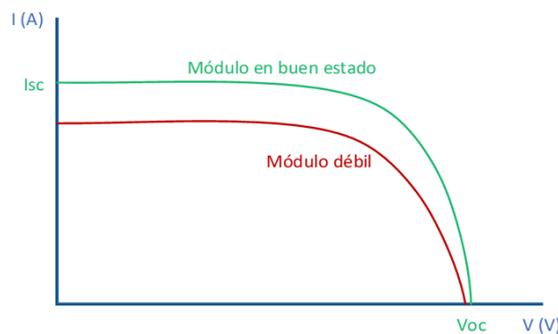
2.2.1. Curvas I-V

Las curvas I-V son la principal característica de los paneles solares y, por tanto, analizar el comportamiento real de la curva de un panel ofrece mucha información respecto a su rendimiento.

Los valores que se miden en la curva IV incluyen la corriente de cortocircuito (ISC), la corriente de máxima potencia (IMPP), la tensión de circuito abierto (VOC), la tensión de máxima potencia (VMPP) y la potencia máxima (Pmax). La medición de la curva IV se realiza mediante un trazador de curvas IV, que es un equipo especializado que mide tanto la corriente como el voltaje en múltiples puntos durante el barrido [15].

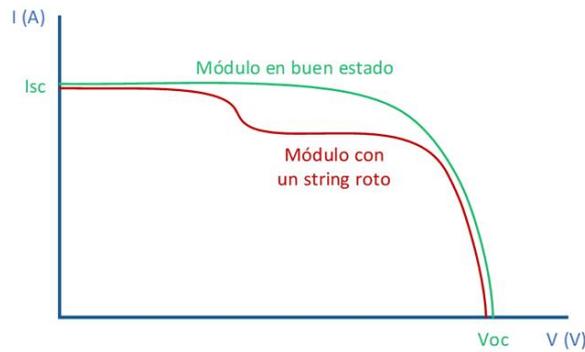
Los problemas típicos que se pueden encontrar en una instalación que afectan la curva IV incluyen suciedad, sombreado de los módulos, cableado de alta resistencia o problemas de conexión entre módulos, una falta de coincidencia de los módulos causada por las diferencias de fabricación o especificación o las células fotovoltaicas están dañadas.

Cuando se analiza un módulo que no es capaz de proporcionar una corriente cercana a la de cortocircuito, se le califica como módulo débil y su curva queda como en la *Gráfica 5*.



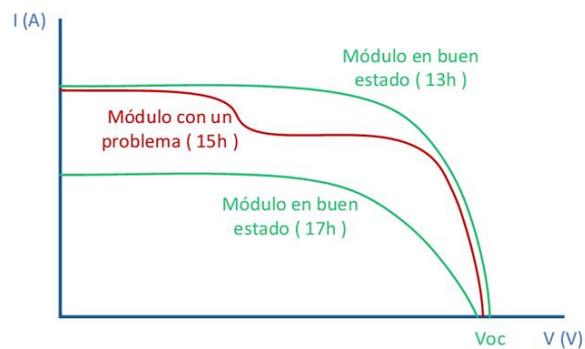
Gráfica 5. Análisis curva IV. Módulo débil. Fuente [15]

Si dentro de un panel, una de las células está dañada o rota, la curva característica se obtiene tal que la *Gráfica 6*.



Gráfica 6. Análisis curva I-V. String roto. Fuente [15]

Cuando nos encontramos un módulo solar fotovoltaico con un comportamiento cambiante a lo largo del tiempo, nos indica que tiene un problema de sombras. Es muy importante evitar las sombras en los módulos solares fotovoltaicos porque, la parte que no está recibiendo el sol va a estar sufriendo y tiene un alto riesgo de romperse, Gráfica 7.



Gráfica 7. Análisis curva I-V. Sombras. Fuente [15]

2.2.2. Inspección visual

La inspección visual de un panel solar consiste en la verificación de defectos visibles, como grietas o abolladuras en el módulo solar, así como cualquier anomalía en el marco o el vidrio, la caja de conexiones y el cableado. Esta inspección es una parte importante del control de calidad durante la producción de paneles solares, ya que garantiza que los paneles solares

cumplan con los estándares requeridos. Además, este tipo de inspección se puede realizar con los paneles ya instalados.

En la inspección visual de un panel solar, se evalúa la mano de obra de los paneles fotovoltaicos, se verifica la presencia de defectos eléctricos como cortocircuitos, circuitos abiertos o sombra parcial, que pueden afectar el rendimiento del panel. También se evalúa si las muestras inspeccionadas se alinean con los requisitos específicos del cliente, incluidas las dimensiones, la documentación y otras especificaciones [16].

2.2.3. Termografía infrarroja

El análisis con termografía infrarroja consiste en la detección de problemas en los paneles fotovoltaicos mediante la medición de la radiación infrarroja que emiten. Esta técnica se utiliza para detectar células solares defectuosas, conexiones sueltas, puntos calientes, sombras parciales y otros problemas que pueden afectar el rendimiento del panel.

Se usan cámaras infrarrojas que trabajan en longitudes de onda de 8 a 14 micrómetros. Las mediciones deben llevarse a cabo en condiciones normales de funcionamiento, con la cámara lo más perpendicular posible al panel. Al obtener la imagen se podrá diferenciar los puntos en los que la temperatura es superior al resto del panel, *Figura 11* [17].



Figura 11. Análisis mediante TIR. Fuente [17]

2.2.4. Electroluminiscencia

La electroluminiscencia es un fenómeno óptico y eléctrico en el cual un material emite luz en respuesta a una corriente eléctrica que fluye a través de él. Se distingue de otros fenómenos que pueden generar luz, como altas temperaturas o por acción de productos químicos.

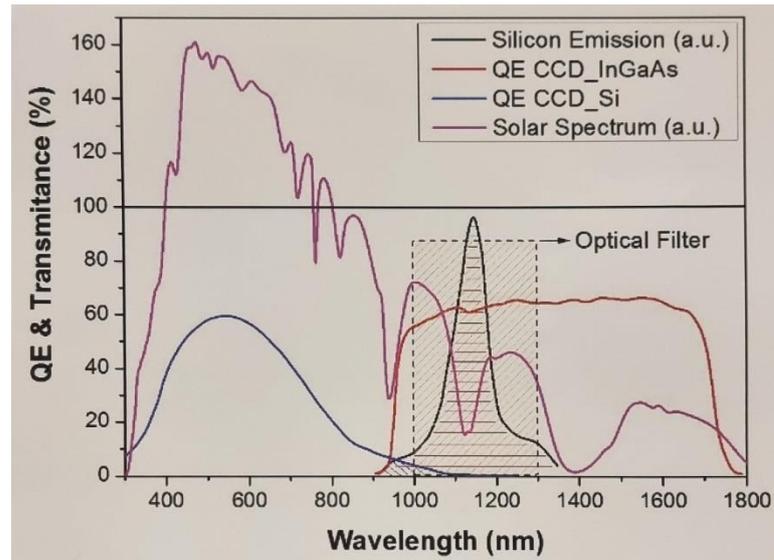
La electroluminiscencia es una característica de algunos materiales, normalmente semiconductores, que emiten luz cuando se ven expuestos a una determinada corriente. La electroluminiscencia permite detectar defectos estructurales en celdas y degradación en paneles fotovoltaicos.

La medición por electroluminiscencia se basa en la creación de una diferencia de potencial eléctrico en las bornas de un panel solar, a partir de una fuente de alimentación que inyecta portadores con carga positiva y genera una corriente eléctrica. Debido a esta corriente se consigue que el panel emita fotones de luz, luminiscencia, en longitudes de onda de alrededor de 1100 nm (valores para el silicio).

Para poder captar la luz en esa longitud de onda se necesita de cámaras especiales y con una eficiencia cuántica cercana a la luminiscencia del silicio. La eficiencia cuántica de una cámara describe su respuesta a diversas longitudes de onda. Se distinguen dos tipos de cámaras, Silicio e InGaAs, con las que se puede llevar a cabo el estudio.

Las cámaras de silicio ofrecen buena resolución, pero su eficiencia cuántica cercana a los 1100nm es muy baja. Como se puede ver en la figura 17, las cámaras de silicio tienen buena eficiencia en torno a los 500-600 nm, más allá de ese rango, la eficiencia es mucho menor y los tiempos de exposición deberán ser mayores.

Por otro lado, las cámaras InGaAs (Indio-Galio-Arsénico) proporcionan una gran fotosensibilidad en el rango del infrarrojo cercano y de onda corta. Según la *Gráfica 8*, ofrece una eficiencia cuántica cercana al 60% en el rango de 1100nm, justo en el pico de emisión del silicio. lo que las hace una muy buena opción para el análisis de defectos. El problema de estas cámaras es su elevado precio y baja resolución de imágenes, esta no suele ser mayor de 640x512 píxeles.



Gráfica 8. Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda. Fuente: Laboratorio

Un entorno oscuro, nocturno, es una condición que facilita este tipo de mediciones ya que la luz que emiten los paneles de silicio es mucho menor que la luz que puede existir en ese momento proveniente de fuentes externas en un ambiente diurno. Como realizar las mediciones en un ambiente nocturno aumentaría significativamente los costes y los riesgos, se llevan a cabo las mediciones durante el día.

3.2.4.5. Electroluminiscencia diurna

Las cámaras de silicio requieren del ambiente oscuro para la obtención de imágenes, es una condición indispensable. En cambio, para las cámaras InGaAs no es estrictamente necesario.

En longitudes de 1100nm , la radiación solar es baja, pero sigue siendo significativa, Para la obtención de imágenes a partir de esta cámara es necesario filtrar esa la luz que no pertenece al panel. El objetivo de la cámara lleva filtros capaces de recoger la información que únicamente se encuentra en un intervalo de longitudes de onda, *Gráfica 8*. Tras haber actuado el filtro, el software se encarga de obtener la imagen deseada.

La obtención de imágenes consiste en polarizar y no polarizar el módulo solar, establecer un estado de ON (polarizado) y OFF (no polarizado). En el estado OFF la cámara recoge toda la luz existente, la ambiente, y la luz que emite el panel por la incidencia de la radiación solar. En el estado ON se recoge la luz existente



de ambiente y además la luminiscencia del panel. El programa se encargará de restar ambas imágenes y quedarse solo con la emisión de luz del panel.

Para que la medición sea fiable, este procedimiento se lleva a cabo durante varios ciclos, por lo menos 100 estados de ON-OFF, aunque es aconsejable llegar a los 400-500 ciclos. Es necesario que el panel y la cámara trabajen de forma sincronizada, por un lado, el módulo solar conmuta rápidamente para cambiar entre estados ON-OFF y, por otro, la cámara capta la imagen en cada estado correspondiente. Para llevar a cabo esa sincronización se necesita una comunicación entre el dispositivo de conmutación (objeto de este trabajo) y la captación de imágenes.

3. Diseño del prototipo

Para poder realizar las conmutaciones ON-OFF en el análisis por electroluminiscencia, se ha construido este dispositivo, *Figura 12*, que parte de una idea ya realizada, el Optronbox v2. *Figura 13*.

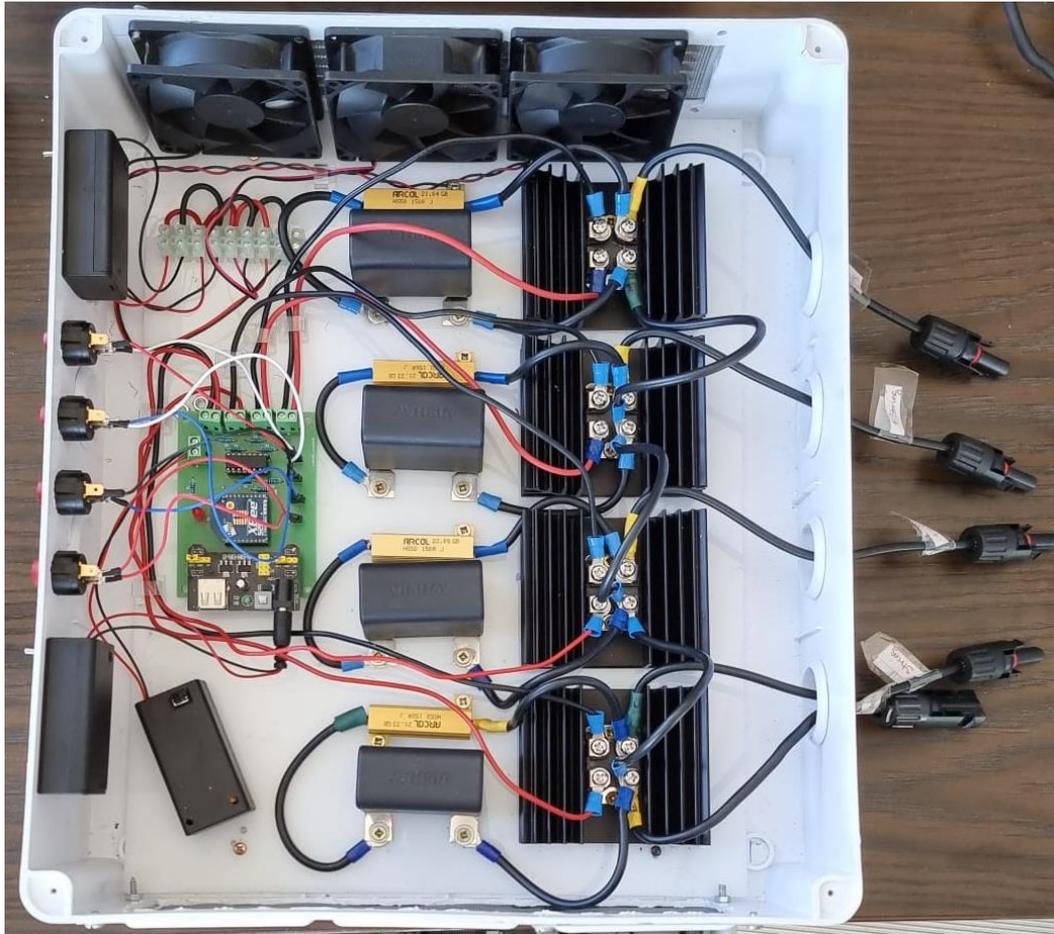


Figura 12. Prototipo construido. Fuente propia

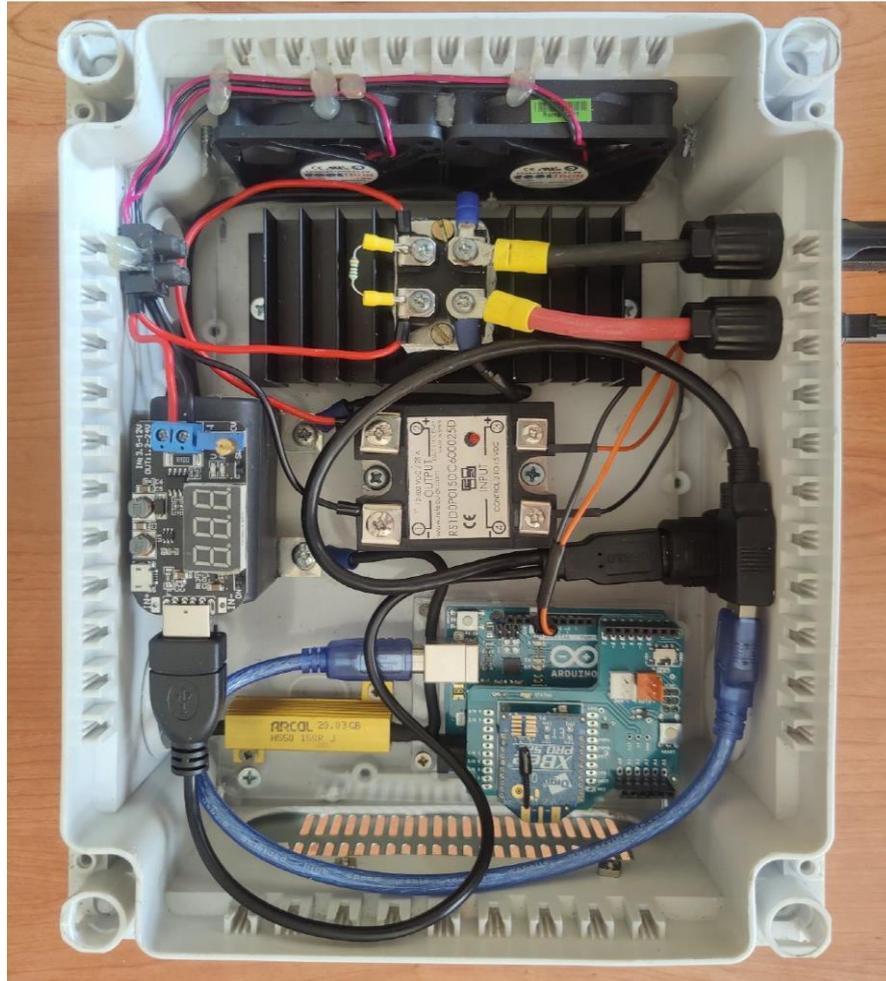


Figura 13. Optronbox_v2. Fuente [18]

El objeto de este TFG es preparar un dispositivo que pueda realizar medidas en el mayor número de paneles solares con una fuente de tensión de 15kW. Con el Optronbox v2 es posible realizar medidas en un *string* de paneles que alcancen los 1500 voltios, y con el nuevo diseño, se van a analizar hasta 4 *strings* sin necesidad de realizar desconexiones.

Se mantienen componentes ya presentes en el Optronbox v2, pero también se va a modificar la alimentación y se van a sustituir ciertas partes que mejoran el comportamiento del circuito, su utilidad y seguridad.

A continuación, se enumeran los componentes utilizados y más tarde se explicará su función.

- IGBT
- Almohadilla térmica
- Radiador IGBT
- Circuito amortiguador RC
- Módulo comunicación inalámbrica



- Optoacoplador
- Resistencia
- Interruptor
- Circuito impreso
- Pilas 9V + porta pilas
- Módulo alimentación MB-102
- Ventilador
- Cable unifilar de cobre
- Conectores
- Caja envolvente
- Lámina de metacrilato

3.1 Esquema

El funcionamiento del circuito se basa en la conmutación del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) que permite el paso de corriente, es decir, cierra el circuito, cuando recibe la señal del dispositivo de comunicación inalámbrica. Para recibir esta señal, debe alimentarse el dispositivo de comunicación y la puerta del IGBT, *Figura 14*.

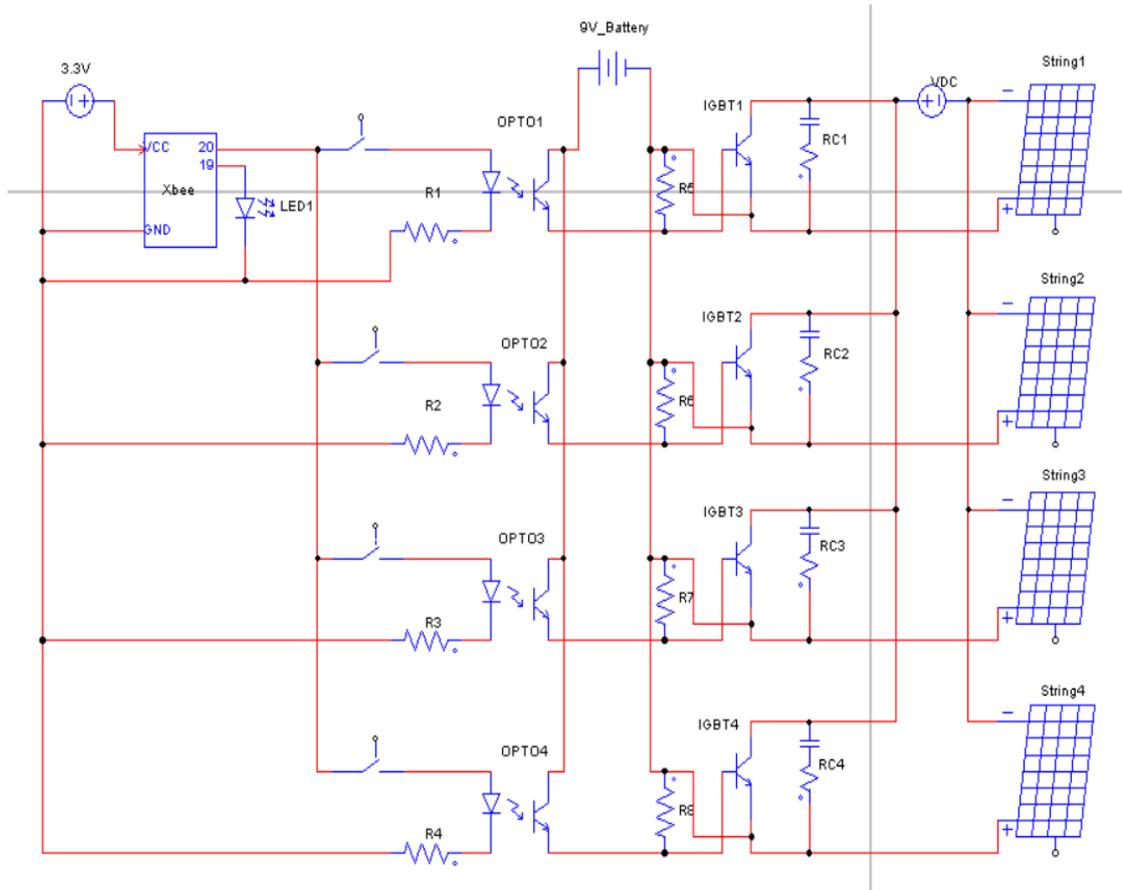


Figura 14. Esquema de circuito. Fuente propia

Para explicar el funcionamiento en detalle se va a dividir en 3 partes el esquema, alimentación, control y potencia.

3.1.1 Alimentación

Respecto a su versión anterior, alimentada con baterías por USB, se propuso buscar una forma de alimentar el dispositivo sin necesidad de conectarlo a una alimentación externa. En esta versión se propone utilizar pilas de 9V, las cuales van integradas en la caja del dispositivo y no requieren un mantenimiento continuo, solo un reemplazo cada cierto tiempo. Hay 3 pilas que alimentan el circuito impreso, los ventiladores, la puerta del IGBT.

La tensión de alimentación puede variar. Para el circuito impreso la alimentación es de 3,3 voltios, que se obtiene a partir del módulo de carga MB-102 conectado mediante un *jack* a la pila. La puerta del IGBT y los ventiladores sí que funcionan directamente a 9 voltios.

3.1.2 Circuito de control

Es la parte que se encarga de enviar las señales necesarias para la conmutación del transistor, *Figura 15*. El circuito impreso lleva montado un dispositivo de comunicación inalámbrica *Digi Xbee* que activa sus pines de salida según indique el software de control. Conectado a este circuito se encuentran también, un led indicador de señal, un optoacoplador que aísla esta parte del circuito de la parte de potencia, además de las resistencias necesarias para regular las corrientes que pasan por el optoacoplador. Y, por último, los interruptores de selección, que permiten elegir el *string* de paneles solares de los cuales se va a tomar la medición.

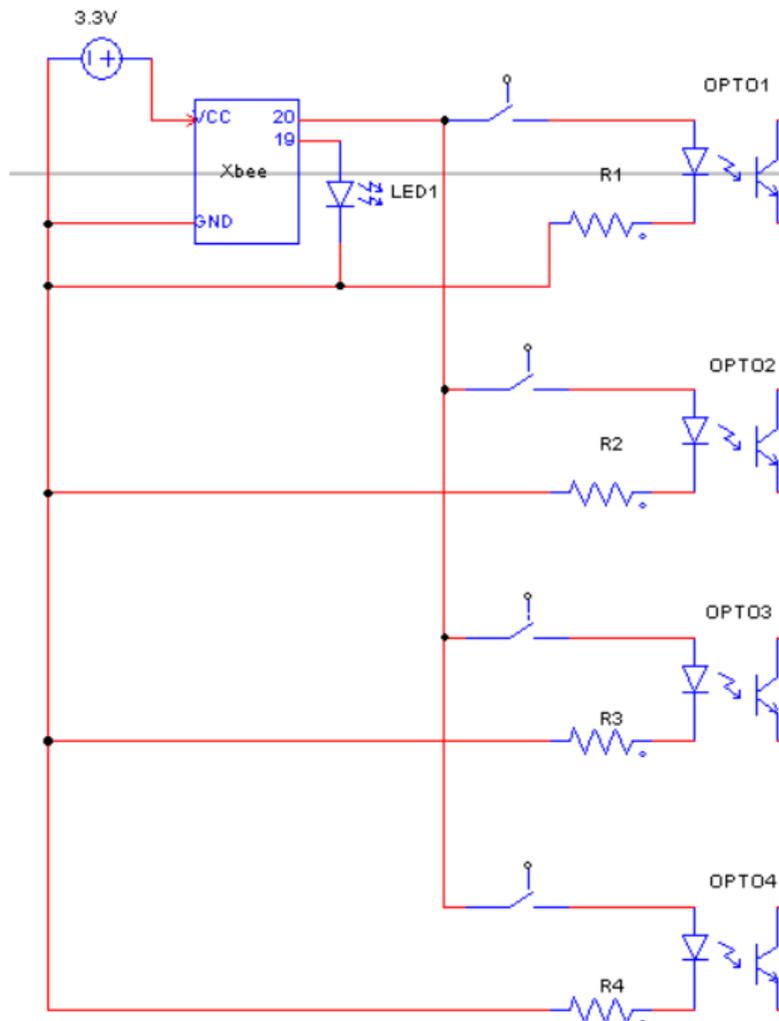


Figura 15. Circuito de control. Fuente propia

3.1.3 Circuito de potencia

Esta parte es la que menos variación ha recibido respecto a la versión anterior. El IGBT está conectado a dos ramas diferentes, el conjunto resistencia-condensador para amortiguar picos de corriente y al panel solar-fuente de tensión, ambos circuitos en paralelo. La parte del circuito RC está integrada en la propia caja, la fuente de tensión y el panel solar se conectan externamente a partir de los conectores MC4. Como se dispone de 4 módulos IGBT, cada uno va conectado a un *string* de paneles diferente. Además, como van a ser polarizados, se conectarán a un mismo punto todas las bornas negativas de los paneles solares y, en el interior de la caja, todos los colectores del IGBT. De la caja saldrán los cables que conectan cada emisor con cada borna positiva del *string* de paneles solares. Mientras que la fuente de tensión se conectará entre el colector común a todos los módulos IGBT, conector hembra MC4, y la borna común negativa de los *strings* de paneles. *Figura 16.*

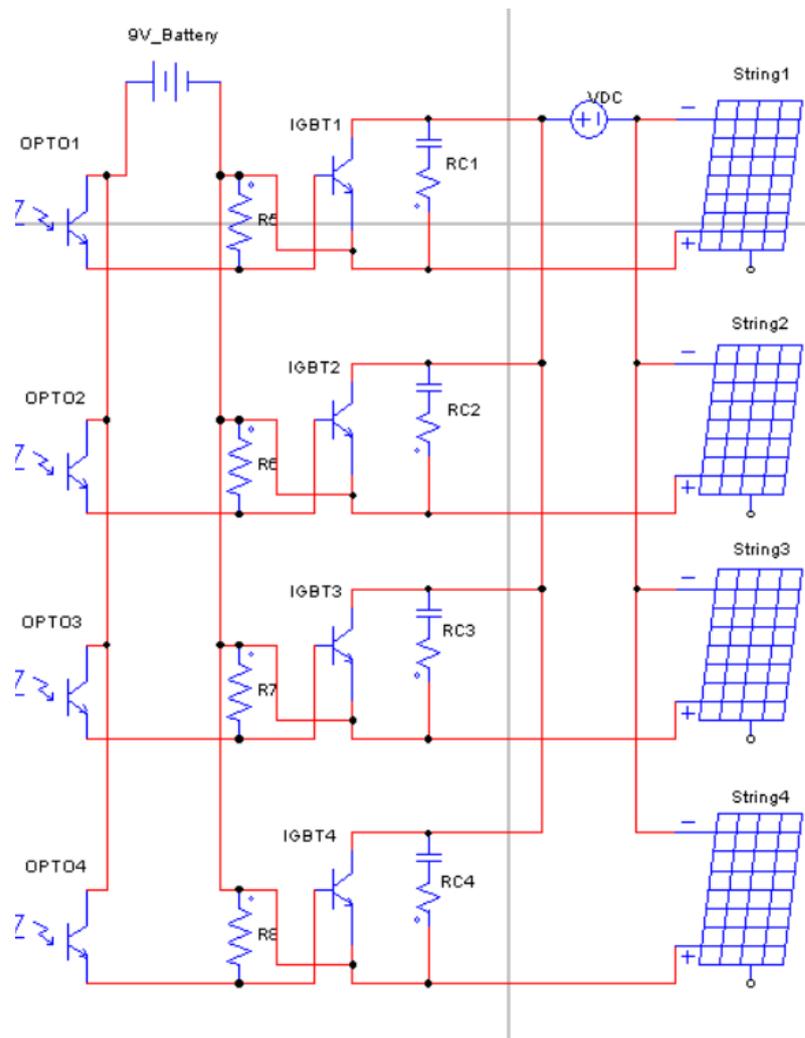


Figura 16. Circuito de potencia. Fuente propia

3.2. Componentes

Una vez desarrollado el esquema de funcionamiento, se compone la lista de componentes empleados.

3.2.1. IGBT

Es el principal elemento de este dispositivo, todo el desarrollo está basado en torno a este componente. Se ha elegido un IGBT frente a otros semiconductores por los altos niveles de tensión requeridos y precios comedidos.

Un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor de potencia usado sobre todo en convertidores y variadores de frecuencia. Es un transistor híbrido, combina las altas frecuencias de conmutación de un MOSFET y la estructura de un BJT, por eso tiene terminales puerta (del MOSFET), colector y emisor (de BJT). *Figura 17.*

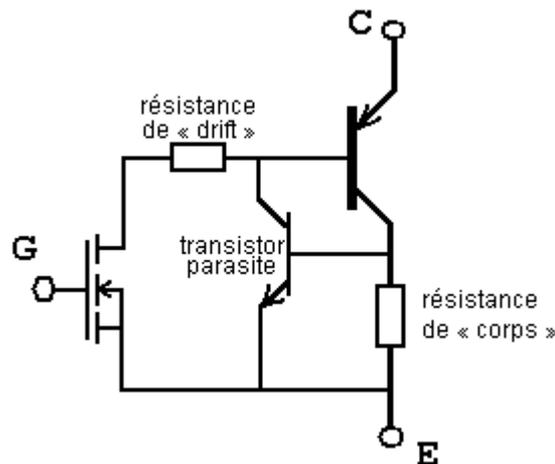


Figura 17. Representación de un IGBT. Fuente [19]

El IGBT se compone de tres capas de material semiconductor, una capa de tipo P, una capa de tipo N y otra capa de tipo P, con una capa de óxido aislante en la superficie. El óxido aislante actúa como un aislante eléctrico entre la compuerta y el canal N, lo que permite que la compuerta controle la corriente que fluye a través del canal N. Cuando se aplica una señal de voltaje positivo a la compuerta, se crea un canal N en la capa superior del dispositivo, lo que permite que fluya corriente desde el colector hasta el emisor. Cuando se aplica

un voltaje inferior a un umbral a la compuerta, se cierra el canal N y se detiene la corriente que fluye a través del dispositivo, *Figura 18* [19].

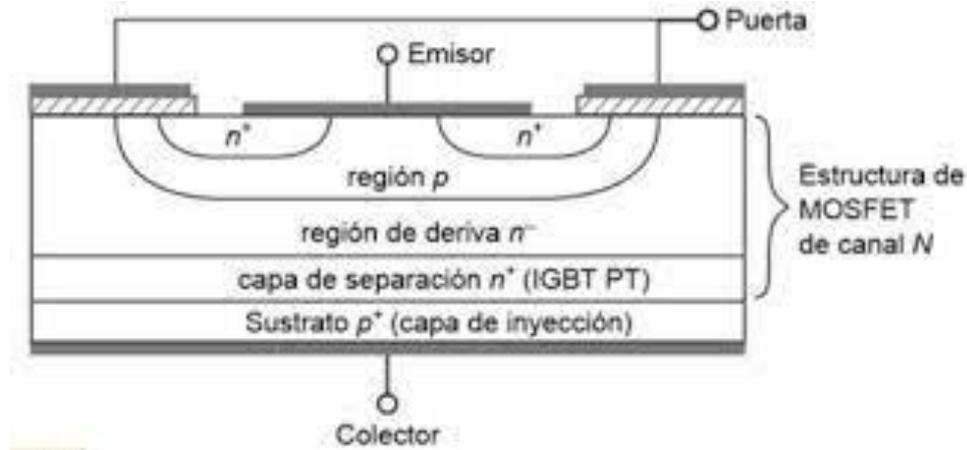


Figura 18. Sección de un IGBT. Fuente [19]

En este caso el IGBT usado es el IXYN200N170, *Figura 19*. Está diseñado para aplicaciones de alta potencia, como sistemas de control de motor, fuentes de alimentación, inversores y convertidores de energía.



Figura 19. Forma IXYN200N170. Fuente [20]

Está controlado por tensión, es decir, cuando se aplica un voltaje positivo en la compuerta con respecto al emisor, se crea un canal de conducción en el semiconductor tipo N, permitiendo el paso de corriente desde el colector hacia el emisor, estado de encendido.

Por otro lado, cuando se aplica un voltaje negativo o nulo en la compuerta con respecto al emisor, se bloquea el flujo de corriente entre el colector y el emisor, estado de apagado.

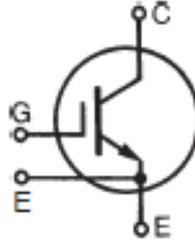


Figura 20. Representación IGBT IXGN200N170. Fuente [20]

Para su aplicación en este trabajo se han tenido en cuenta los siguientes parámetros, *Tabla 1*:

- V_{CES} → Voltaje colector-emisor máximo: Para poder polarizar el mayor número de paneles, se necesita que el IGBT soporte un gran nivel de tensión mínimo de 1500 voltios.
- I_{C90} → Corriente de colector a 90°C: La aplicación real del dispositivo puede suponer temperaturas altas, se necesita que la corriente máxima sea superior a 10 amperios.
- P_C → Potencia máxima: Es el valor máximo que puede disipar el IGBT sin sufrir daños. Se calcula en función de la caída de tensión colector-emisor y la corriente que circula por él.
- T_j → Temperatura en la unión: Se necesita que aguante altas temperaturas por las condiciones ambientales en las que se puede emplear y las altas tensiones que debe soportar.

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings	
V_{CES}	$T_J = 25^\circ\text{C to } 150^\circ\text{C}$	1700	V
V_{CGR}	$T_J = 25^\circ\text{C to } 150^\circ\text{C}, R_{GE} = 1\text{M}\Omega$	1700	V
V_{GES}	Continuous	± 20	V
V_{GEM}	Transient	± 30	V
I_{C25}	$T_C = 25^\circ\text{C}$ (Chip Capability)	280	A
I_{LRMS}	Terminal Current Limit	200	A
I_{C90}	$T_C = 90^\circ\text{C}$	160	A
I_{CM}	$T_C = 25^\circ\text{C}, 1\text{ms}$	1050	A
SSOA (RBSOA)	$V_{GE} = 15\text{V}, T_{VJ} = 125^\circ\text{C}, R_G = 1\Omega$ Clamped Inductive Load	$I_{CM} = 300$ 1360	A V
P_C	$T_C = 25^\circ\text{C}$	1250	W
T_J		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$
T_{JM}		150	$^\circ\text{C}$
T_{slg}		-55 ... +150	$^\circ\text{C}$

Tabla 1. Valores máximos del IXGN200N170. Fuente [20]

En la realidad, cuando se aplica un voltaje a la puerta, el IGBT permite que fluya una corriente eléctrica desde el colector al emisor, y no fluye corriente entre la puerta y el emisor excepto para la conmutación. Esto se debe a que el transistor MOSFET tiene una pequeña capacitancia entre la puerta y la fuente, por lo que debido a que el IGBT está hecho de este tipo de transistor, también tiene una pequeña capacitancia entre la puerta y el emisor. y ese condensador debe cargarse y descargarse para que el IGBT funcione en conmutación. Cuando este capacitor está cargado, no fluye corriente a través de la compuerta, pero durante la carga o descarga, solo pasa corriente por la compuerta, y este proceso lleva muy poco tiempo. Debido a lo anterior, si el IGBT tiene una tensión V_{ge} y permite que la corriente I_C circule del colector al emisor, carga la capacitancia entre la puerta y el emisor y forma un circuito cerrado entre sus terminales, es decir, el circuito permanece cerrado y mantiene el IGBT conduciendo. Para resolver este problema, se debe conectar una resistencia pull-up entre la puerta y el emisor, permitiendo que el capacitor se descargue.

Symbol	Test Conditions ($T_J = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
BV_{CES}	$I_C = 3\text{mA}$, $V_{GE} = 0\text{V}$	1700		V
$V_{GE(th)}$	$I_C = 1\text{mA}$, $V_{CE} = V_{GE}$	3.5		5.5 V
I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}$, $V_{GE} = 0\text{V}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$			25 μA 5 mA
I_{GES}	$V_{CE} = 0\text{V}$, $V_{GE} = \pm 20\text{V}$			± 200 nA
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 100\text{A}$, $V_{GE} = 15\text{V}$, Note 1 $T_J = 125^\circ\text{C}$		2.1 2.5	2.6 V V

Tabla 2. Valores nominales del I XGN200N170. Fuente [20]

3.2.2. Almohadilla térmica

Las almohadillas térmicas son materiales que se utilizan para transferir el calor de un componente electrónico a un disipador de calor. Su funcionamiento se basa en la conducción térmica, y se colocan entre el componente y el disipador de calor. *Figura 21.*



Figura 21. Almohadilla térmica. Fuente propia

Se ha elegido una almohadilla térmica estándar de silicona, la cual tiene una conductividad térmica de 6 W/mK (Vatios por metro-Kelvin)

3.2.3. Radiador IGBT

La temperatura es uno de los factores más relevantes en estos trabajos, debido a la aplicación del dispositivo debe estar preparado para altas temperaturas de operación. Por este motivo se monta un disipador.

Un disipador de calor para un IGBT es un componente esencial en sistemas electrónicos de potencia para controlar altas corrientes y tensiones. El IGBT genera calor durante su operación debido a la resistencia interna y la conmutación de corriente.

Está diseñado para extraer y disipar eficientemente el calor generado por el IGBT hacia el entorno circundante. Está compuesto por un material conductor térmico, como el aluminio o cobre, que tiene una alta conductividad térmica.

El disipador de calor se conecta físicamente al IGBT, generalmente utilizando una pasta o almohadilla térmica, para maximizar la transferencia de calor. Una vez que el calor se transfiere al disipador, se utiliza una combinación de aletas, superficies extendidas y ventilación natural o forzada para disipar el calor al aire ambiente de manera eficiente. Las aletas aumentan la superficie de contacto y promueven la convección térmica, permitiendo que el calor se disipe más rápidamente.

Para esta aplicación se ha elegido un disipador universal de aluminio, *Figura 22*, de RS Componentes, con una resistencia térmica de $1,9^{\circ}\text{C}/\text{W}$, suficiente para el montaje.



Figura 22. Disipador universal. Fuente propia

3.2.4. Circuito amortiguador RC

Es un conjunto de componentes pasivos y/o activos integrados en un circuito electrónico de potencia para proteger un interruptor automático. El objetivo principal de este tipo de circuito es absorber la energía de los elementos reactivos del circuito durante los procesos de conmutación, controlando parámetros como la amortiguación de oscilaciones transitorias, protección contra sobretensiones etc. El diseño y dimensionamiento adecuados de este circuito mejoran la eficiencia del transistor y reducen la interferencia EMI. También permiten el funcionamiento a frecuencias de conmutación más altas y reducen la pérdida de potencia [21].

El circuito ha sido sobredimensionado para esta aplicación, porque para poder realizar los cálculos exactos habría que tener en cuenta parámetros de los que no se conoce su valor, como las frecuencias de oscilación.

Se ha utilizado un circuito RC en paralelo con el interruptor IGBT, *Figura 23*, que absorbe los sobre picos y reduce las interferencias. Cabe destacar que la resistencia utilizada en este caso es una resistencia bobinada, lo que favorece la disipación de potencia.



Figura 23. Circuito amortiguador RC. Fuente propia

3.2.5. Módulo de comunicación inalámbrica

La forma más cómoda para controlar la conmutación es la que no requiere cableado alguno. Tal y como se realizaba en la versión anterior del dispositivo, la comunicación se lleva a cabo con dos módulos de radiofrecuencia.



Figura 24. Módulo comunicación Xbee de Digi. Fuente propia

Los módulos Digi Xbee, *Figura 24*, proporcionan comunicación inalámbrica a dispositivos electrónicos. Son programables, eliminando la necesidad de un microprocesador externo, y se basa en los circuitos integrados del sistema en chip Ember EM35x de Silicon Labs.

La configuración de estos módulos se realiza con el software XCTU, y permite asignar un rol diferente a cada uno de los módulos, que puede ser cambiado cuando sea conveniente. Para su configuración se deben tener en cuenta varios puntos importantes [22].

1. El ID de cada módulo debe ser el mismo, para poder comunicarse su nombre de red debe ser idéntico.
2. La dirección de destino está dividida en dos partes. Parte alta y parte baja, que corresponde con la dirección MAC de cada módulo. La dirección de destino alta de un módulo debe coincidir con los 6 primeros dígitos de la dirección MAC del otro, mientras que la parte baja debe coincidir con los últimos 8 dígitos.
3. Por último, se tiene que asignar un rol a cada Xbee. Existen tres tipos, coordinador, router y dispositivo final. El modo router nos permite ampliar la señal mediante un módulo intermedio que nos posibilita alcanzar distancias más largas de hasta varios kilómetros. Para este caso solo se van a utilizar los otros dos modos. Coordinador, será el módulo que controla la red, conectado al ordenador. Y dispositivo final, será el módulo que recibe las señales, colocado en el interior de la caja.

Un módulo va conectado al ordenador con el software de laboratorio y es el encargado de enviar la señal ON-OFF. El otro módulo va integrado en la caja, recibe la señal, y activa el pin seleccionado, generando una tensión de 3,3 voltios.

3.2.6. Optoacoplador

Un optoacoplador es un dispositivo electrónico utilizado para aislar eléctricamente dos circuitos. Está compuesto por un emisor de luz (diodo LED) y un detector de luz (fototransistor) encapsulados en un mismo paquete, pero eléctricamente aislados entre sí [23].



Figura 25. Optoacoplador LTV-847. Fuente propia

Cuando se aplica una corriente al LED, este emite luz que incide sobre el fototransistor, generando una corriente en su base proporcional a la cantidad de luz recibida. Esta corriente resultante en el fototransistor se utiliza para controlar la corriente o voltaje en el circuito secundario, proporcionando así el aislamiento galvánico necesario.

El optoacoplador se utiliza en aplicaciones donde se requiere protección contra interferencias eléctricas, como en sistemas de control, fuentes de alimentación, circuitos de conmutación, entre otros. También se utiliza para acoplar circuitos de baja tensión con circuitos de alta tensión, garantizando la seguridad y el correcto funcionamiento del sistema.

Se ha elegido el optoacoplador LTV-847 de 4 canales de Lite-On, *Figura 25*, con el esquema que se observa en la *Figura 26*.

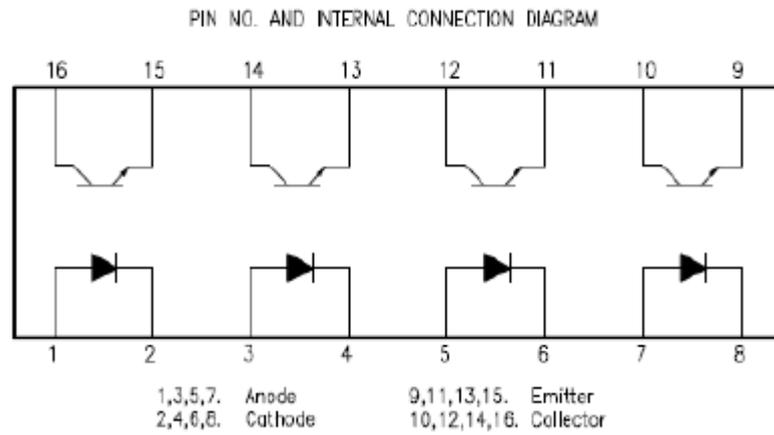


Figura 26. Esquema de optoacoplador 4 canales. Fuente [24]

Es importante tener en cuenta las especificaciones del LTV-847, como la corriente de entrada y salida, el aislamiento de voltaje y la capacidad de conmutación, *Tabla 3*, para asegurar su correcto funcionamiento en cada aplicación específica.

ABSOLUTE MAXIMUM RATING

($T_a = 25^\circ\text{C}$)

	PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
INPUT	Forward Current	I_F	50	mA
	Reverse Voltage	V_R	6	V
	Power Dissipation	P	70	mW
OUTPUT	Collector - Emitter Voltage	V_{CE0}	35	V
	Emitter - Collector Voltage	V_{ECO}	6	V
	Collector Current	I_C	50	mA
	Collector Power Dissipation	P_C	150	mW

ELECTRICAL - OPTICAL CHARACTERISTICS

($T_a = 25^\circ\text{C}$)

	PARAMETER	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	CONDITIONS
INPUT	Forward Voltage	V_F	—	1.2	1.4	V	$I_F=20\text{mA}$
	Reverse Current	I_R	—	—	10	μA	$V_R=4\text{V}$
	Terminal Capacitance	C_T	—	30	250	pF	$V=0, f=1\text{KHz}$
OUTPUT	Collector Dark Current	I_{C0}	—	—	100	nA	$V_{CE}=20\text{V}, I_F=0$
	Collector-Emitter Breakdown Voltage	BV_{CE0}	35	—	—	V	$I_C=0.1\text{mA}$ $I_F=0$
	Emitter-Collector Breakdown Voltage	BV_{ECO}	6	—	—	V	$I_E=10\mu\text{A}$ $I_F=0$

Tabla 3. Valores máximos y nominales del LTV-847. Fuente [24]

3.2.7. Resistencia

Una resistencia eléctrica es un componente pasivo que se utiliza en circuitos eléctricos y electrónicos para oponerse al flujo de corriente. La resistencia eléctrica se mide en ohmios (Ω) y se representa con la letra R. Cuanto mayor sea la resistencia, menor será la corriente que fluye a través del circuito [25]. En este caso se utilizan resistencias para limitar corrientes, *Figura 27*, aplicación con diodos para descargar capacitancias, en la compuerta del IGBT; y para atenuar picos de señales, el circuito amortiguador.

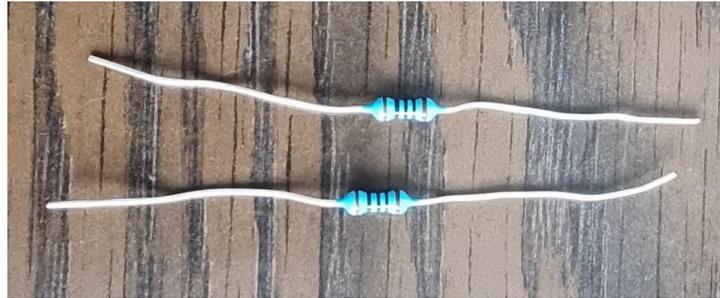


Figura 27. Resistencia. Fuente propia



Figura 28. Resistencia bobinada. Fuente propia

3.2.8. Interruptor

Es un dispositivo que permite abrir y cerrar un circuito eléctrico. Consta de dos o más contactos y una parte móvil actuante que suele ser un balancín.

Los interruptores en este circuito permiten seleccionar que *string* de paneles se va a polarizar, *Figura 29*. Como forma parte del circuito de control, las tensiones que van a soportar no sobrepasan los 5 voltios, y se ha elegido un interruptor pensando más en la estética del dispositivo.

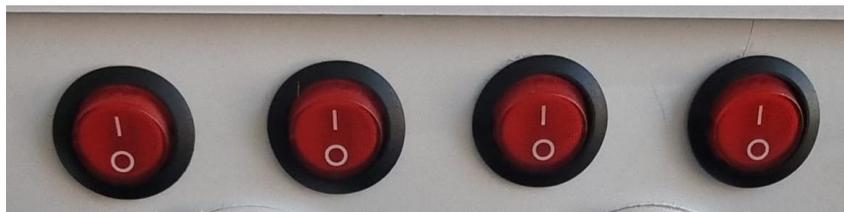


Figura 29. Interruptores de balancín. Fuente propia

3.2.9. Circuito impreso

Una de las grandes diferencias respecto al modelo anterior es la parte de control. Se ha diseñado un circuito impreso, *Figura 30*, que permite controlar las señales de forma más sencilla y fiable. A continuación, se explica el montaje y el desarrollo final.

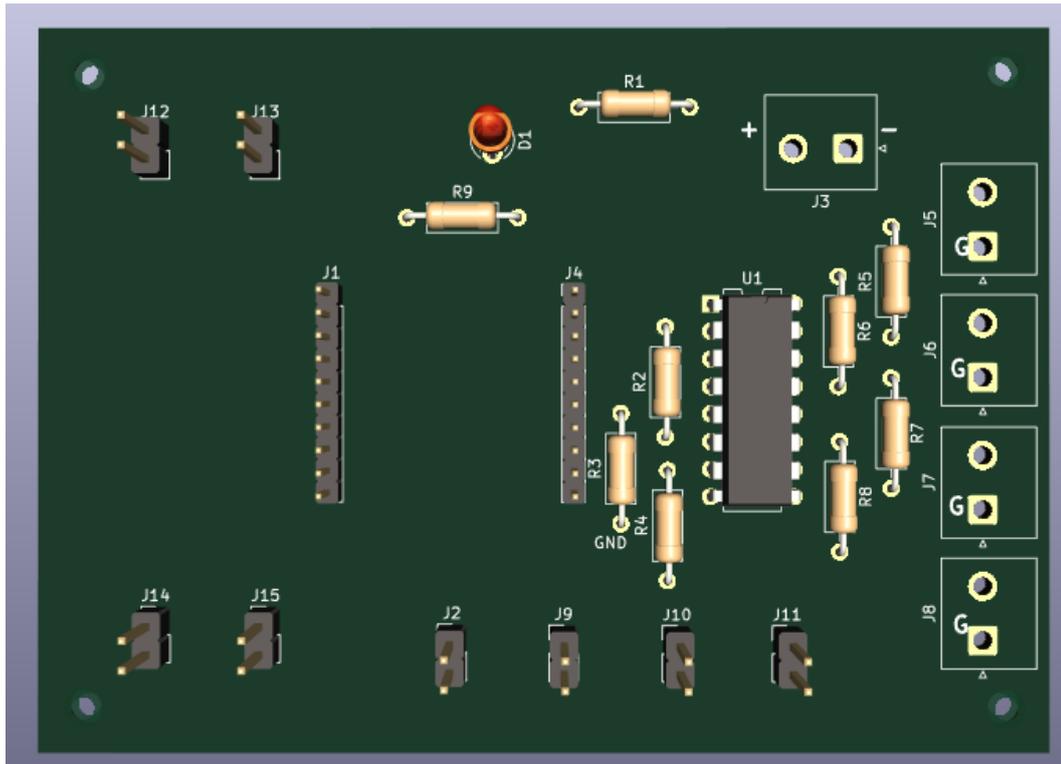


Figura 30. Diseño circuito impreso. Fuente propia

En la placa se han incorporado los siguientes componentes:

- Zócalo para módulo de carga MB-102 (J12,13,14,15)
- Zócalo para dispositivo de comunicación *Digi Xbee* (J1,4)
- Zócalo de conexión para interruptores (J2,9,10,11)
- Optoacoplador (U1)
- Resistencias limitadoras de corriente (R1,2,3,4,9)
- Resistencias disipadoras (R5,6,7,8)
- Diodo led indicador (D1)
- Conector para bornas (J3,5,6,7,8)

Con esto se consigue ahorrar cableado y optimizar las entradas y salidas del circuito de control. En el lado izquierdo de la placa, tenemos la alimentación de entrada y por el otro la salida a las compuertas de los módulos IGBT. Hay que

diferenciar la borna J3, donde va conectada la alimentación de las compuertas del IGBT. *Figura 31.*

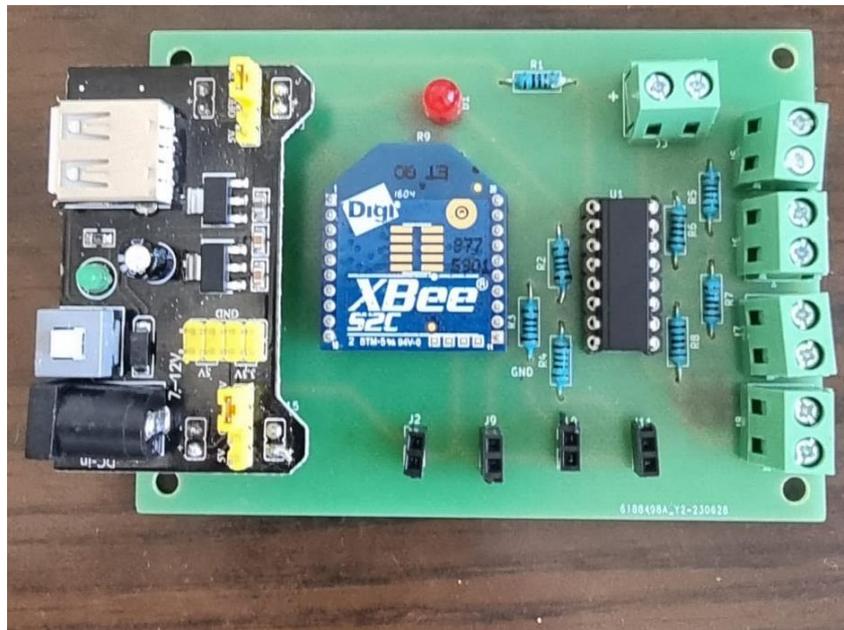


Figura 31. Circuito impreso montado. Fuente propia

3.2.10. Pilas 9V con porta pilas

Son pilas alcalinas de forma rectangular con dos terminales, positivo y negativo, en uno de sus lados. Tienen una tensión de 9 voltios y sirven para alimentar el dispositivo de comunicación inalámbrica, los ventiladores, y las compuertas del IGBT.

Estas pilas ofrecen una duración bastante alta, dependiendo el uso y la marca, lo que facilita el mantenimiento [26].

Además, las pilas van dentro de una porta pilas con interruptor modificado, *Figura 33*, para que el encendido y apagado sea más cómodo.



Figura 32. Portapilas original. Fuente propia



Figura 33. Portapilas modificado. Fuente propia

3.2.11. Módulo de alimentación MB-102

El módulo de alimentación MB-102, *Figura 34*, es un dispositivo utilizado para alimentar una protoboard. Tiene dos modos de entrada de alimentación, a través de USB y a través de un enchufe *jack* de 5,5 mm, e incorpora un interruptor para controlar la fuente de alimentación. El rango de entrada de voltaje es de 6,5 a 12V, y la corriente máxima es de 700mA. El módulo tiene encabezados para seleccionar el voltaje de salida, que puede ser de 3,3V o 5V [27].

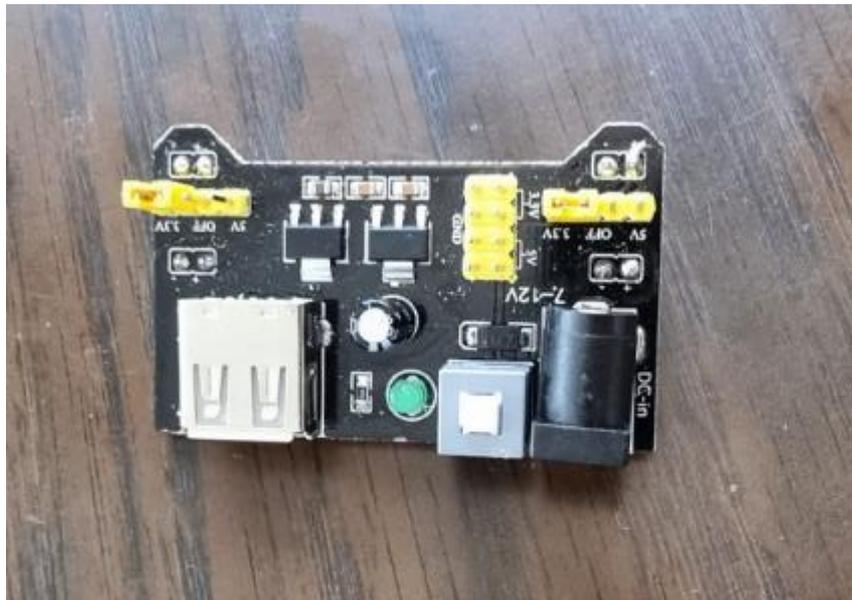


Figura 34. Módulo alimentación MB-102. Fuente propia

Se ha elegido este modelo por la versatilidad que ofrece pudiendo alimentar a dos tensiones diferentes y al ser diseñado para una *protoboard*, permite hacer pruebas de forma sencilla antes de incorporarlo al circuito impreso.

3.2.12. Ventilador

Un ventilador favorece la refrigeración y ventilación de un dispositivo, manteniendo una temperatura adecuada en su interior.



Figura 35. Ventilador de ordenador. Fuente propia

Se han seleccionado 3 ventiladores axiales de 12 voltios, *Figura 35*, reciclados de ordenadores antiguos. Estos se van a alimentar a 9 voltios que, aun siendo una tensión inferior a la nominal, proporcionan un flujo de aire adecuado y un consumo menor al nominal.

Han sido colocados en un lateral de la caja, con una rejilla protectora que evita la obstrucción del giro por objetos extraños y envía el flujo de aire hacia abajo.

3.2.13. Cable multifilar de cobre

Es un tipo de cable que consta de múltiples hilos de cobre conductor en lugar de un solo hilo sólido. Estos hilos de cobre están trenzados o agrupados juntos para formar un solo cable. El uso de múltiples hilos en lugar de un solo hilo sólido proporciona flexibilidad y facilidad de manipulación al cable. Además, el cable multifilar de cobre tiene una mayor capacidad de corriente y una menor resistencia eléctrica en comparación con los cables de un solo hilo sólido.

Para esta aplicación es primordial que los cables que conectan los módulos IGBT con la fuente y los paneles, puedan soportar tensiones del orden de 1,5kV. El cable de conexión *Hew Heinz Eilentropp*, *Figura 36*, soporta esa tensión y ofrece un aislamiento de silicona, aportando gran protección frente a altas temperaturas [28].



Figura 36. Cable Hew Heinz Eilentrop. Fuente [28]

3.2.14. Conectores

Para facilitar el conexionado de componentes se han utilizado dos tipos de conectores, MC4 y Faston, además de bornas de bloques terminales para PCB.

Los conectores MC4, *Figura 37*, son conectores eléctricos de un solo contacto utilizados comúnmente para conectar paneles solares. El nombre MC4 significa *Multi-Contact* y 4 mm de diámetro del pin de contacto.



Figura 37. Conectores MC4 para panel solar. Fuente propia

Debido a la arquitectura del dispositivo en el que los componentes van atornillados, los terminales faston, *Figura 38*, de resultan de gran utilidad para asegurar la conexión. Estos conectores son fáciles de instalar y desmontar, lo que favorece un posible mantenimiento o reparación. Se han utilizado terminales de cabeza circular para cables de entre 1,5 y 2,5 mm^2 .



Figura 38. Terminal faston circular macho. Fuente propia

Los bloques terminales para PCB, *Figura 39*, permiten una unión segura entre un circuito impreso y un cable normal. El cable va atornillado y los pines van soldados a la PCB.



Figura 39. Bornas para PCB. Fuente propia

3.2.15. Caja envolvente

Para incorporar todos los componentes se ha optado por usar la caja de conexiones *Lumonic* de PVC con dimensiones 400x350x120mm. *Figura 40*.

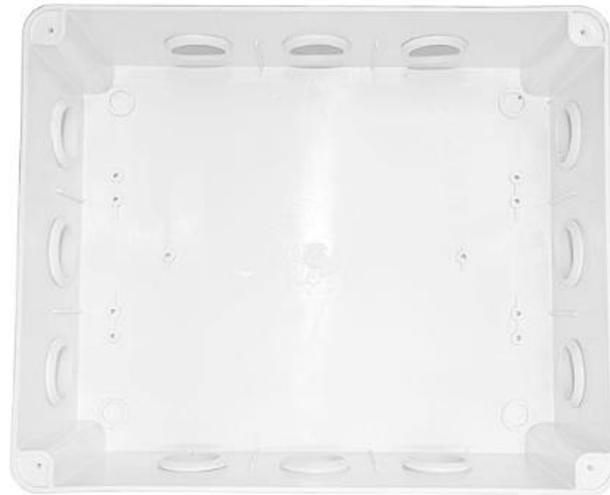


Figura 40. Caja envolvente Lumonic.

3.2.15 Lámina de metacrilato

Dentro de la caja se ha incorporado una lámina de plástico, *Figura 41*, que permite sujetar todos los componentes. Con un grosor de 3mm y unas dimensiones de 420x297mm, los componentes van atornillados y fijados. Como las dimensiones son superiores a las de la caja, se ha recortado un extremo.



Figura 41. Lámina de metacrilato. Fuente propia

3.3 Cálculos

En este apartado se justifican los valores de resistencias eléctricas y térmicas para la selección de algunos componentes.

3.3.1. Resistencias eléctricas

El optoacoplador trabaja con un diodo de 1,2-1,4 voltios en su entrada a una corriente de unos 20mA, y la alimentación del pin de salida del *Digi Xbee* funciona a 3,3 voltios, por lo que se intercala una resistencia. *Figura 42*.

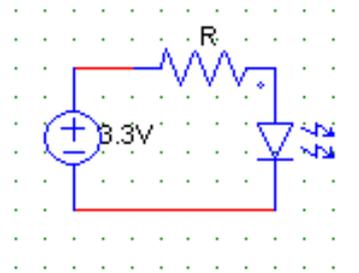


Figura 42. Circuito resistencia-diodo. Fuente propia

$$V_{CC} = R * I + V_{diodo}$$

Ecuación 1. Circuito equivalente, intensidad por un diodo.

$$3,3 = R * 0,02 + 1,2 \rightarrow R = \frac{3,3 - 1,2}{0,02} = \mathbf{105 \text{ Ohmios}}$$

Para el diodo indicador se han realizado los mismos cálculos, pero para una tensión del diodo de 2,2 voltios.

$$V_{CC} = R * I + V_{diodo}$$

$$3,3 = R * 0,02 + 2,2 \rightarrow R = \frac{3,3 - 2,2}{0,02} = \mathbf{55 \text{ Ohmios}}$$

En ambos casos se han seleccionado resistencias ligeramente inferiores, unas de 100 Ohmios y otra de 51 Ohmios.

3.3.2. Resistencias térmicas

Para calcular la disipación térmica necesaria para el IGBT se puede establecer un circuito equivalente con resistencias térmicas, pero primero debemos calcular la potencia disipada por el IGBT, *Ecuación 2*.

$$P_D = V_{CE} * I_C$$

Ecuación 2. Potencia disipada en semiconductor

P_D: Potencia disipada en el semiconductor. Vatios (W)

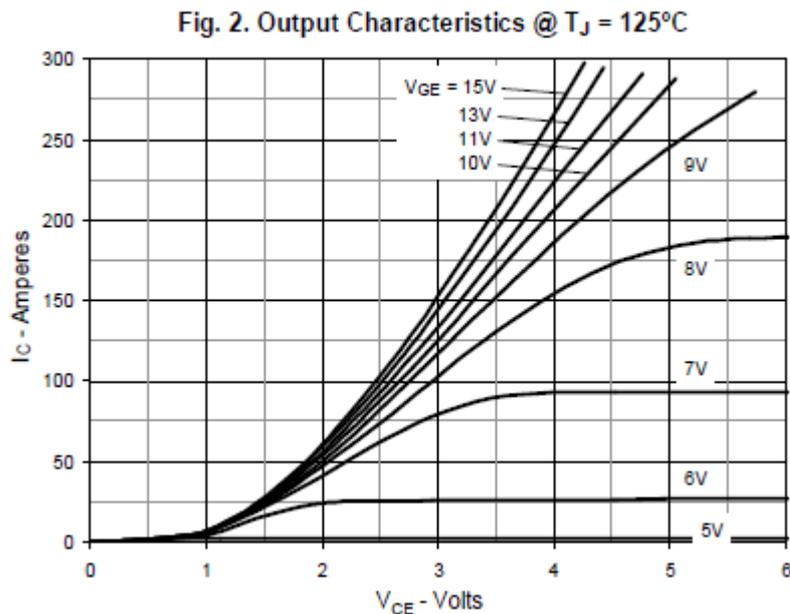
V_{CE}: Diferencia de tensión entre colector y emisor. Voltios (V)

I_C: Corriente que circula de colector a emisor. Amperios (A)

Debemos tener en cuenta que el IGBT va a trabajar con corrientes no superiores a 10 amperios y que la temperatura máxima de funcionamiento es de 175°C, por lo que, para evitar llegar a esa máxima, se empleará un coeficiente de seguridad de 0,85.

$$T_{max} = 150 * 0,85 = 127,5^{\circ}C$$

Según las curvas del semiconductor, *Gráfica 9*, para una temperatura de 125°C, una tensión puerta-emisor de 9 voltios y una corriente de colector de 10 amperios, la tensión colector-emisor es de 1,5 voltios, figura 48.



Gráfica 9. Caída de tensión colector-emisor en función de I_c y V_{ge} para 125°C. Fuente [20]

$$P_D = 1,5 * 10 = 15W$$

Una vez calculada la potencia disipada, se calculan las resistencias.

$$\begin{array}{l} \frac{IGBT}{ENCAPSULADO} \rightarrow R_1 \\ \frac{ALMOHADILLA}{DISIPADOR} \rightarrow R_2 \\ \frac{DISIPADOR}{AMBIENTE} \rightarrow R_3 \end{array}$$

Cada línea representa una unión, una resistencia térmica. Las 3 primeras se obtienen a partir de las hojas de datos de cada componente:

$$R_1 = R_{thJC} = 0,10^{\circ} \frac{C}{W}$$

$$R_2 = R_{thCS} = 0,05^{\circ} \frac{C}{W}$$

$$R_3 = \frac{1}{6 W/mK} = 0,17^{\circ} \frac{C}{W}$$

$$R_{union-ambiente} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Ecuación 3. Resistencia equivalente

Solo queda obtener la resistencia térmica necesaria para el disipador a partir de la *Ecuación 4*.

$$P_D \leq \frac{T_{union} - T_{ambiente}}{R_{union-ambiente}}$$

Ecuación 4. Relación potencia disipada, temperatura resistencia

Tomando como temperatura ambiente un valor de 30°C:

$$35 \leq \frac{127,5 - 30}{0,10 + 0,05 + 0,17 + R_4} \rightarrow R_4 \leq 2,46^{\circ}C/W$$

4. Montaje

Todos los componentes van sujetos a la lámina de metacrilato o en su defecto, a los laterales de la caja de PVC. Se ha usado una herramienta eléctrica rotativa, *Figura 43*, para poder hacer los agujeros.



Figura 43. Herramienta rotativa. Fuente propia

Tomando las medidas de cada componente y usando tornillos de 3,5 - 4,5mm se ha taladrado y encajado cada parte. Muchos de los tornillos usados tenían una gran longitud por lo que, usando esta herramienta con cabezales diferentes, *Figura 44*, se han recortado para ajustarse mejor a las medidas.



Figura 44. Cabezales usados con la máquina. Fuente propia

Además, también se han suavizado algunos bordes y esquinas que podrían interferir con el correcto funcionamiento del dispositivo.



Figura 45. Parte frontal. Fuente propia



Figura 46. Parte lateral. Ventilación. Fuente propia

6. Pruebas

Para la realización de ensayos se ha utilizado una fuente de alimentación de 420 vatios, suficiente para la polarización de un panel. También se utilizó una cámara InGaAs, soportada por un trípode y conectada a una batería portátil, un panel solar que ya presenta defectos en su superficie y para manejar el software una tableta Surface de Microsoft.

Se establecen las conexiones con la fuente de alimentación, *Figura 48*, y el panel solar, *Figura 47*, según el esquema de la *Figura 16*.

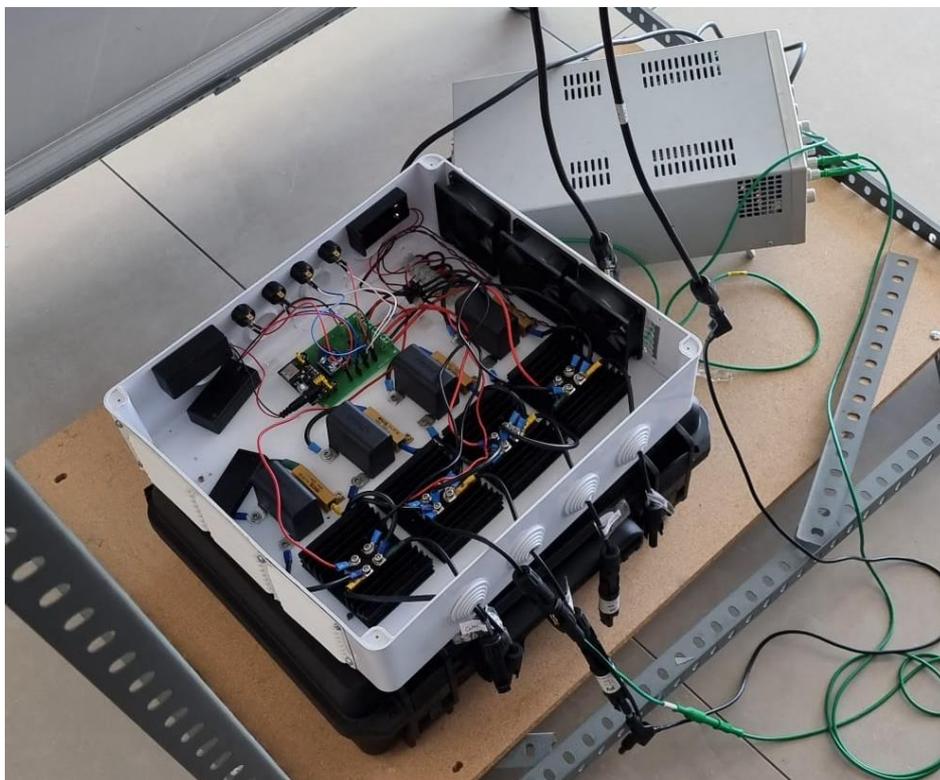


Figura 47. Prototipo conectado. Fuente propia

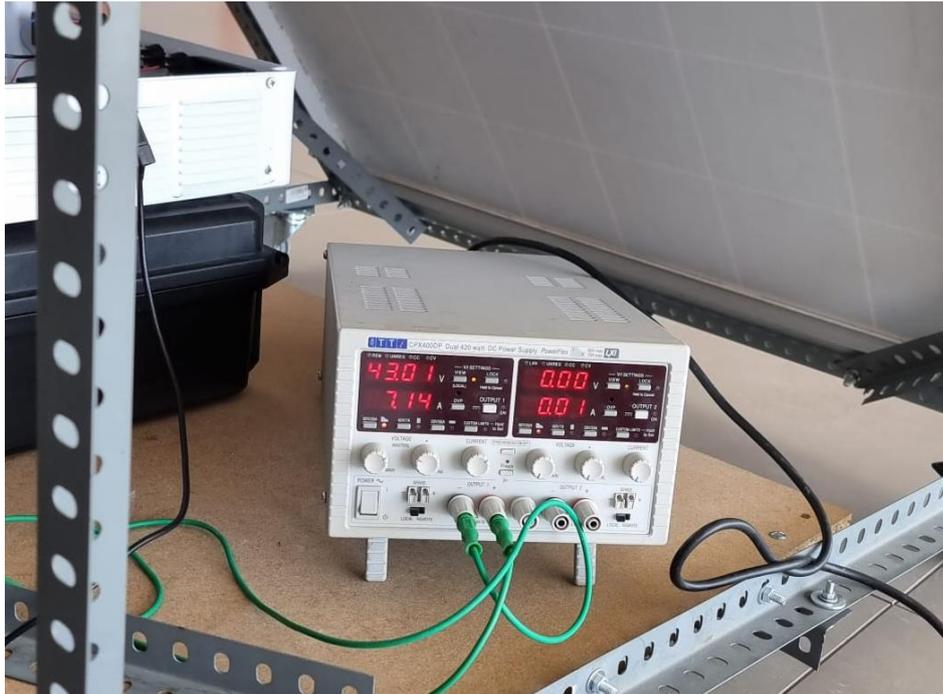


Figura 48. Fuente de alimentación conectada. Fuente propia

A continuación, se coloca el trípode con la cámara a una distancia en la que se pueda ver el panel completo, *Figura 49*, variando el ángulo de apertura del objetivo de la cámara para conseguir un buen enfoque, y se conectan la batería portátil y la tableta a la cámara. Además, conectaremos el módulo de comunicación inalámbrica, que se ha configurado como coordinador, al USB C de la tableta.



Figura 49. Posición para medidas. Fuente propia

Se fija un valor de tensión en la fuente de alimentación que permita circular entre 7 y 8 amperios por el panel, dependiendo del panel este valor puede ser mayor o menor, en este caso se fija a 43 voltios. Seleccionamos en la botonera del prototipo, figura 45, que paneles queremos polarizar, en este caso se ha conectado un panel al IGBT 2, interruptor 2. Se inicia el programa y esperamos a que la cámara capture los estados de ON/OFF del panel. Para seguir con más análisis solo será necesario seleccionar el interruptor que tenga otro panel conectado. El resultado de la medición es el de la *Figura 50*.

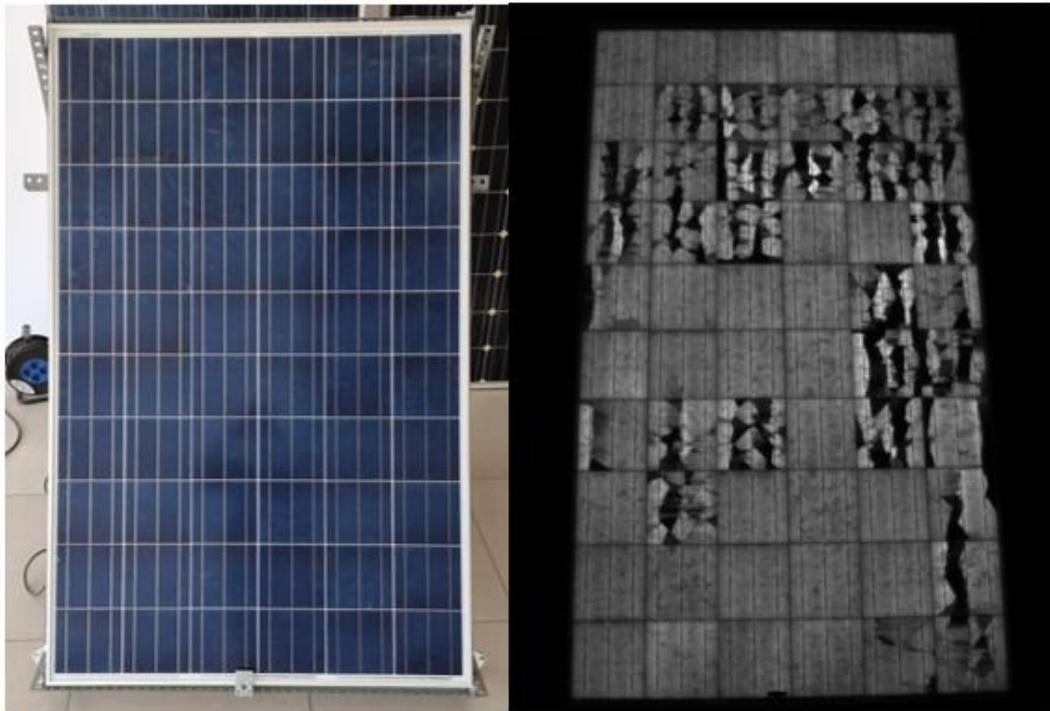


Figura 50. Modulo fotovoltaico y su análisis mediante EL. Fuente propia





7. Resultados y conclusiones

Para concluir con el desarrollo del prototipo será necesario realizar más ensayos con cargas más elevadas, conectando más paneles. Hasta la fecha el dispositivo funciona, pudiendo realizar el análisis de paneles independientes con una sola fuente de alimentación de poca potencia.

Se ha optimizado el uso de las señales de control a partir del circuito impreso, otorgando mayor seguridad y sencillez al montaje. Ahora todas las señales están agrupadas y ordenadas, favoreciendo el análisis del circuito en caso de producirse un fallo.

Se ha añadido un led indicador que permite conocer el estado del circuito, es decir, saber si la comunicación inalámbrica se está llevando a cabo de manera correcta.

También se ha conseguido una mayor autonomía mediante el uso de pilas y no de baterías, siendo este un requisito fundamental, solo será necesario el cambio tras varios ensayos. Para poder establecer una durabilidad, se han llevado a cabo más de 10 horas de ensayos con la alimentación conectada y no ha sido necesario el cambio de pila, se constatará la verdadera duración con el paso del tiempo.

Como posible mejora del dispositivo podría incorporarse un selector de circuito en vez de cuatro interruptores, así asegurar que no van a pulsarse dos o más interruptores de manera simultánea inconscientemente.





BIBLIOGRAFIA

- [1] *Porcentaje de Electricidad Procedente de Fuentes renovables en España*. Statista. (2023, March 16). <https://es.statista.com/estadisticas/498909/energia-procedente-de-fuentes-renovables-para-producir-electricidad-en-espana/> (Acceso 28 junio 2023)
- [2] *Módulo Fotovoltaico*. Enel Green Power. (n.d.). <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/modulo-fotovoltaico> (Acceso 27 junio 2023)
- [3] OVACEN. (2022, November 26). *Energía Solar Fotovoltaica: Qué Es y Cómo funciona*. OVACEN. <https://ovacen.com/energias-renovables/solar/fotovoltaica/> (Acceso 20 junio 2023)
- [4] Lorenzo, A. A. (2023, April 27). *Radiación, irradiancia y azimut en fotovoltaica*. SunFields. Empresa de Placas y Equipos Solares. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/> (Acceso 20 junio 2023)
- [5] *Silicon Solar Cells: Greenmatch*. GreenMatch.co.uk. (2023, April 19). <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/solar-panels/photovoltaic-cells/silicon> (Acceso 28 junio 2023)
- [6] *LA CELULA SOLAR*. Curso de Energía Solar Fotovoltaica. (n.d.). http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm (Acceso 25 junio 2023)
- [7] Oriol Planas. (2016, February 12). *Tipos de celdas fotovoltaicas: células en placas solares*. Energía solar. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos> (Acceso 25 junio 2023)
- [8] *Tipos de paneles fotovoltaicos*. Energías Renovables. (2014, November 12). <https://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/> (Acceso 25 junio 2023)
- [9] Sofía Rodríguez Buñuel. (2023, March 7). *Esquema de Instalación de Placas solares fotovoltaicas*. Solfy. <https://solfy.net/placas-solares/esquema-de-instalacion-de-placas-solares-fotovoltaicas/> (Acceso 25 junio 2023)
- [10] *La Importancia del Regulador de Carga en una instalación fotovoltaica*. Autosolar. (n.d.). <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/la-curva-de-intensidad-voltaje-y-la-de-potencia-voltaje-de-un-panel-solar-el-papel-del-regulador-de-carga/> (Acceso 25 junio 2023)



- [11] *Influencia de la Irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica*. Ingelibre. (2014, November 9). <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/> (Acceso 25 junio 2023)
- [12] Nicolas. (2022, November 22). *Defectos Comunes de los módulos fotovoltaicos*. Eco Green Energy - Building a Greener World. <https://www.ecogreenenergy.com/es/defectos-comunes-de-los-modulos-solares-evitar-la-delaminacion/> (Acceso 25 junio 2023)
- [13] Enpee Group. (2020, August 12). *When solar panels are put on a Hotspot*. Renewsysworld. <https://www.renewsysworld.com/post/when-solar-panels-are-put-on-a-hotspot> (Acceso 26 junio)
- [14] *Cell snail trail*. Construction Specifier. (2014, September 4). https://www.constructionspecifier.com/solar-power-focusing-on-quality-and-long-term-reliability/cell-snail-trail_1/ (Acceso 26 junio)
- [15] *Por qué son tan importantes las Curvas IV*. Clever Solar Devices. (2020, November 10). <https://www.cleversd.com/es/blog/que-son-tan-importantes-curvas-iv> (Acceso 26 junio)
- [16] *Inspección de Panel Solar*. Cognex. (n.d.). <https://www.cognex.com/es-es/industries/solar/panel-inspection>
- [17] Navarro, Helena. *Análisis térmico de paneles fotovoltaicos mediante termografía*. Sevilla: Universidad de Sevilla Dpto. de Ingeniería Energética. (2022) (29 junio 2023)
- [18] Martín, Álvaro. *Desarrollo de un prototipo para medidas de electroluminiscencia en paneles solares*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Grado en Ingeniería eléctrica (2021) (20 junio 2023)
- [19] *Electrónica de Potencia/IGBT*. Wikilibros. (2023, June 25). https://es.wikibooks.org/wiki/Electr%C3%B3nica_de_Potencia/IGBT/Par%C3%A1metros_caracter%C3%ADsticos_de_funcionamiento (Acceso 2 Julio 2023)
- [20] IXYS, "High Voltage IGBT", IXGN200N170, 2016.
- [21] Semiconductor, F. (2014, August 6). *Diseño del snubber del RC para interruptores*. DigiKey. <https://www.digikey.com/es/articles/resistor-capacitor-rc-snubber-design-for-power-switches/> (Acceso 15 junio 2023)
- [22] Ijorquera. (2019, May 9). *Configuración Xbee Serie 1*. XBee.cl - Comunicación Inalámbrica para Tus Proyectos. <https://xbee.cl/xbee-serie-1-configuracion/> (Acceso 15 junio 2023)



- [23] *Optoacopladores*. RS. (n.d.). <https://es.rs-online.com/web/c/displays-y-optoelectronica/optoacopladores-y-fotodetectores/optoacopladores/> (Acceso 13 junio 2023)
- [24] LiteOn, “*Photocoupler Product Data Sheet*”, LTV-847, 2010.
- [25] Fluke. (2023, March 29). *¿Qué es la resistencia?* Fluke. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/que-es-la-resistencia/> (Acceso 20 junio 2023)
- [26] Admin. (2022, November 4). *¿Qué pila de 9 voltios Dura Más?* Angola Transparency. <https://angolatransparency.blog/es/que-pila-de-9-voltios-dura-mas/> (Acceso 28 junio 2023)
- [27] *Fuente para protoboard*. Uelectronics. (2018, September 30). <https://uelectronics.com/producto/fuente-de-alimentacion-para-protoboard-v2-mb-102-3-3v-5v/> (Acceso 20 junio 2023)
- [28] *Cables eléctricos de silicona*. WireCable-es. (n.d.). <http://wirecable-es.com/1-silicone-wire-and-cable/> (Acceso 25 junio 2023)