

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INTEGRACIÓN DE LAS
ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Sistema para la caracterización de
paneles fotovoltaicos

Estudiante

GONZALEZ MARIN, MARTA

Director

MAZON SAINZ-MAZA, ANGEL JAVIER

Co-director

GOMEZ-CORNEJO BARRENA, JULEN

Departamento

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Curso académico

2019-2020

Bilbao, 28 de septiembre de 2020

RESUMEN

En este proyecto se ha planteado el diseño de un sistema electrónico de bajo coste para la medición de los parámetros de corriente y voltaje de un módulo fotovoltaico con el fin de caracterizarlo y poder confirmar la degradación sufrida. El sistema propuesto consta de un Arduino Uno, un monitor de corriente, una pantalla OLED y un adaptador micro-SD.

Para comprobar que su funcionamiento es el adecuado, se ha comparado los resultados obtenidos conectando los módulos fotovoltaicos ET--M53610 y MS-30P directamente al dispositivo mediante un reóstato, con los simulados mediante el software PV-Syst, el programa Matlab/SIMULINK y los obtenidos tras emular las placas mediante la fuente programable DCP150-8, obteniendo resultados satisfactorios.

ABSTRACT

In this project, the design of a low-cost electronic system for measuring the current and voltage parameters of a photovoltaic module has been proposed in order to characterize it and confirm the degradation suffered. The proposed system consists of an Arduino UNO, a current monitor, an OLED screen and a micro-SD adapter.

In order to verify that it works properly, the results obtained by connecting the photovoltaic modules ET--M53610 and MS-30P directly to the device with a rheostat have been compared with those simulated with the PV-Syst software, the Matlab/SIMULINK program and those obtained after emulating the solar panels with the programmable source DCP150-8, obtaining satisfactory results.

LABURPENA

Proiektu honetan modulu fotovoltaiko baten korrante eta tentsio parametroen neurketa egiteko, kostu baxuko sistema elektronikoko baten diseinua proposatu da. Honen helburua moduluak karakterizatu eta hauek degradazioa jasaten duten baieztatzea da. Proposatutako sistema, Arduino Uno batez, korrante-monitore batez, OLED pantaila batez eta mikro-SD egokigailu batez osatuta dago.

Bere funtzionamendua egokia dela egiaztatzeko, diseinatutako sistemari ET--M53610 eta MS-30P modulu fotovoltaikoak konektatu zaizkio, erreostato baten laguntzaz neurketa ezberdinak eginez. Lortutako emaitzak, PV-Syst, Matlab/SIMULINK programen simulazioekin eta plaka solarrak DCP-150-8 iturri programagarria konektatuta lortutako emulazioekin alderatu dira, lortutako emaitzak egokiak direla baieztatuz.

PALABRAS CLAVE: Caracterización, módulos fotovoltaicos, curva I-V, curva P-V, degradación, mismatch, Arduino Uno, INA219, pantalla OLED, micro-SD, PV-Syst, Matlab/SIMULINK, emulador, fuente programable, irradiancia, temperatura.

ÍNDICE

MEMORIA	2
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	3
3. CONTEXTO	4
3.1. Descripción de una instalación solar fotovoltaica	4
3.2. Principio de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos	5
3.2.1. El efecto fotovoltaico	5
3.2.2. Componentes de los módulos fotovoltaicos	6
3.2.3. Tipos de células fotovoltaicas	7
4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	8
4.1. Curvas características de los módulos fotovoltaicos	8
4.1.1. Parámetros eléctricos	8
4.1.2. Efecto de la irradiancia	9
4.1.3. Efecto de la temperatura	9
4.1.4. Circuito equivalente de una celda solar	10
4.2. Pérdidas mismatch	12
4.3. Degradación de los módulos fotovoltaicos	12
4.3.1. Mecanismos de degradación	12
4.3.2. Tipos de degradación	13
4.3.3. Relación de los principales tipos de degradación	18
4.4. Sistemas de medida actuales	19
4.5. Normativa de fabricación/verificación de los paneles	21
5. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	22
6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	22
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	24
7. ANTECEDENTES	24
8. DESCRIPCIÓN GENERAL	24
9. ELEMENTOS EMPLEADOS	24
9.1. Placa de prototipo	25
9.2. Cables	25
9.3. Arduino UNO	25
9.4. Monitor de corriente DC INA219	26
9.5. Pantalla OLED	28
9.6. Módulo adaptador micro-SD	29
10. CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SISTEMA PROPUESTO	30
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
11.1. Características especificadas por el fabricante	31
11.1.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610	31
11.1.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P	32
11.2. Simulaciones PV-Syst	33
11.2.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610	33
11.2.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P	36
11.2.3. Conclusiones	40
11.3. Simulación Matlab	41
11.3.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610	41
11.3.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P	44
11.3.3. Conclusiones	46
11.4. Simulación emulador	49
11.4.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610	49
11.4.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P	53
11.4.3. Conclusiones	56
11.5. Medidas reales	56
11.5.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610	56

11.5.2.	Módulo solar de 30 W modelo MS-30P	57
11.5.3.	Conclusiones	58
11.5.4.	Comprobación	59
ASPECTOS ECONÓMICOS		60
12.	DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO Y MANO DE OBRA	60
TRABAJOS FUTUROS		62
CONCLUSIONES GENERALES		63
BIBLIOGRAFÍA.....		64
ANEXO 1		67
	Código del Arduino UNO	67
ANEXO 2		70
	Módulos fotovoltaicos ET-Solar ET-M53610.....	70
	Módulos fotovoltaicos SumSol MS-30P	71
ANEXO 3		72
	Valores obtenidos mediante el dispositivo planteado	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red. ^[2]	4
Figura 2. Esquema de una instalación fotovoltaica aislada. ^[2]	4
Figura 3. Esquema de una instalación fotovoltaica híbrida. ^[2]	5
Figura 4. Diagrama de interpretación del panel fotovoltaico. ^[5]	5
Figura 5. Sección de un módulo fotovoltaico. ^[3]	6
Figura 6. Eficiencia de células solares según la tecnología. ^[7]	7
Figura 7. Curva de intensidad y curva de potencia. ^[5]	8
Figura 8. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia. ^[9]	9
Figura 9. Curva I-V para distintas temperaturas. ^[9]	10
Figura 10. Representación eléctrica de una celda solar de un diodo. ^[10]	10
Figura 11. Modelo de circuito equivalente de un módulo degradado. ^[12]	11
Figura 12. Módulo fotovoltaico con delaminación. ^[13]	13
Figura 13. Módulo fotovoltaico con decoloración. ^[15]	14
Figura 14. Módulo fotovoltaico con decoloración. ^[15]	14
Figura 15. Características de voltaje y corriente de un módulo fotovoltaico sano o blanco (color azul) y módulo con decoloración o amarillo (color rojo). ^[13]	15
Figura 16. Módulo fotovoltaico con corrosión. ^[15]	16
Figura 17. Módulo fotovoltaico con el cristal frontal roto. ^[13]	16
Figura 18. Módulo fotovoltaico con burbujas en la parte posterior. ^[13]	17
Figura 19. Módulo fotovoltaico con puntos calientes. ^[15]	17
Figura 20. Tipos de degradación más comunes en los módulos fotovoltaicos de silicio. ^[13]	18
Figura 21. Circuito eléctrico del dispositivo de medida de 65V. ^[6]	19
Figura 22. Interior del dispositivo de medida de hasta 65V propuesto en el proyecto "Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil". ^[6]	20
Figura 23. El dispositivo modelo MyDAQ de la empresa National Instruments. ^[17]	20
Figura 24. Solución propuesta.	23
Figura 25. Placa de prototipo utilizada en el proyecto.	25
Figura 26. Cables utilizados en el proyecto.	25
Figura 27. Arduino UNO utilizado en el proyecto. ^[19]	26
Figura 28. Componente INA219 Board utilizado en el proyecto. ^[21]	27
Figura 29. Conexión del componente INA219 con Arduino UNO. ^[19]	27
Figura 30. Pantalla OLED utilizada en el proyecto. ^[23]	28
Figura 31. Conexión de la pantalla OLED con Arduino UNO.	28
Figura 32. Módulo adaptador micro-SD utilizado en el proyecto. ^[25]	29
Figura 33. Ejemplo de conexión del módulo adaptador micro-SD con Arduino UNO.	29
Figura 34. Circuito eléctrico del sistema electrónico planteado.	30
Figura 35. Curvas características especificadas por el fabricante para el módulo ET-M53610.	32
Figura 36. Datos introducidos en el software PV-Syst para el módulo Et-M53610.	33
Figura 37. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.	34
Figura 38. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.	34
Figura 39. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.	35
Figura 40. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.	36
Figura 41. Datos introducidos en el software PV-Syst para el módulo MS-30P.	37
Figura 42. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.	37
Figura 43. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.	38
Figura 44. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.	39
Figura 45. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.	39
Figura 46. Bloque PV Array del programa Matlab/Simulink.	41

Figura 47. Montaje del sistema en el programa Matlab/Simulink.....	41
Figura 48. Valores introducidos en el programa Matlab/SIMULINK para el módulo Et-M53610.	42
Figura 49. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.....	42
Figura 50. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.....	43
Figura 51. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.....	43
Figura 52. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.....	44
Figura 53. Valores introducidos en el programa Matlab/SIMULINK para el módulo MS-30P.	44
Figura 54. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.	45
Figura 55. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.	45
Figura 56. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.....	46
Figura 57. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.....	46
Figura 58. Fuente programable DCP150-8 de la empresa Adaptive Power Systems.	49
Figura 59. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para 1000W/m ² y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).	50
Figura 60. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de irradiancia.	51
Figura 61. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de irradiancia.	51
Figura 62. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de temperatura.	52
Figura 63. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de temperatura.	52
Figura 64. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el MS-30P para 1000W/m ² y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).....	53
Figura 65. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de irradiancia.	54
Figura 66. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de irradiancia.	54
Figura 67. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de temperatura.	55
Figura 68. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de temperatura.	55
Figura 69. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para 1000W/m ² y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).	56
Figura 70. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para 1000W/m ² y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).	57
Figura 71. Diagrama de flujo del código utilizado en el sistema electrónico planteado.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de la degradación de los módulos fotovoltaicos.....	19
Tabla 2. Características del módulo solar ET-M53610 obtenidas en condiciones STC.....	31
Tabla 3. Características del módulo solar MS-30P obtenidas en condiciones STC.....	32
Tabla 4. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia.	35
Tabla 5. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de temperatura.	36
Tabla 6. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia.	38
Tabla 7. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de temperatura.	40
Tabla 8. Comparación entre los valores de los parámetros característicos ofrecidos por los fabricantes y los obtenidos mediante el software PV-Syst.	40
Tabla 9. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de irradiancia.	43
Tabla 10. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de temperatura.	44
Tabla 11. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de irradiancia.	45
Tabla 12. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de temperatura.	46
Tabla 13. Comparación de los valores obtenidos en la simulación de Matlab/SIMULINK y PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia para los módulos Et-M53610 y MS-30P.	47
Tabla 14. Comparación de los valores obtenidos en la simulación de Matlab/SIMULINK y PV-Syst frente a distintos valores de temperatura para los módulos Et-M53610 y MS-30P.	48
Tabla 15. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst y los obtenidos tras la emulación del panel ET-M53610 para 1000W/m ² y 25°C.	50
Tabla 16. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst y los obtenidos tras la emulación del panel ET-M53610 para 1000W/m ² y 25°C.	53
Tabla 17. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst, los obtenidos tras la emulación, los obtenidos en Matlab y las mediciones reales para el panel ET-M53610 con 1000W/m ² y 25°C.	57
Tabla 18. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst, los obtenidos tras la emulación, los obtenidos en Matlab y las mediciones reales para el panel MS-30P con 1000W/m ² y 25°C.	57
Tabla 19. Valores obtenidos en la simulación del módulo ET-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia y los valores de las medidas reales.	58
Tabla 20. Valores obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia y los valores de las medidas reales.	58
Tabla 21. Comparación entre los valores obtenidos mediante el software PV-Syst y las mediciones reales para una irradiancia en concreto.	59
Tabla 22. Presupuesto del sistema de medida propuesto.....	60
Tabla 23. Los costes de mano de obra del sistema portátil propuesto.	60
Tabla 24. Coste total del sistema de medida propuesto.	61

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

Los módulos fotovoltaicos actualmente se venden e instalan por todo el mundo debido a la gran variedad de aplicaciones que tienen. Se pueden encontrar en cualquier clima y lugar, conectados a la red eléctrica o como sistema autónomo, en zonas rurales remotas o incluso en alta mar como fuente de energía en los parques marinos. Según el último informe de Red Eléctrica Española, esta tecnología se encuentra en auge en estos momentos, ya que la energía solar fotovoltaica ha producido un 89,9% más en julio del 2020 que en julio del año anterior y ha registrado un nuevo máximo de generación mensual a nivel nacional, alcanzando los 1.903 GWh.^[1]

Este tipo de generación se basa en la conversión de la luz solar en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico que se da en las células de los módulos, lo que la convierte en una energía renovable, inagotable y no contaminante. Sin embargo, una prolongada exposición a distintos factores ambientales como la radiación solar o humedad puede llegar a generar degradación en los paneles. La degradación es por definición el deterioro gradual de las características de un componente o de un sistema que puede afectar a su capacidad de funcionamiento. Es decir, dicho fenómeno afecta a los módulos fotovoltaicos disminuyendo la producción teórica de energía y a su vez ralentiza el tiempo necesario para amortizar la inversión inicial de la instalación.

No obstante, hay otro concepto que también sufren los módulos solares y disminuye la producción energética teórica. Este concepto es el mismatch o pérdidas por dispersión de parámetros, el cual se basa en las pérdidas que se dan en la generación debido a las ligeras variaciones que sufren en los paneles fotovoltaicos fabricados sobre los valores de catálogo.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

En el presente trabajo se plantea un sistema electrónico rápido y fiable para la caracterización de los módulos fotovoltaicos, con el objetivo de medir el comportamiento real de los paneles fotovoltaicos y así poder calcular de una manera más precisa la energía generada por la instalación. Para ello, se plantea un sistema que mida los valores de corriente y voltaje que genera el modulo solar, para así obtener las curvas características de corriente-voltaje y potencio-voltaje del panel, y por lo tanto los valores de corriente de cortocircuito (I_{SC}), voltaje de circuito abierto (V_{OC}) y potencia máxima reales (P_{MPP}).

Además, para corroborar el funcionamiento correcto del dispositivo planteado, se ha llevado a cabo una comparación de los valores de los parámetros característicos obtenidos mediante el software PV-Syst, mediante un montaje en el programa Matlab/SIMULINK, mediante las mediciones obtenidas tras emular los paneles con una fuente programable y mediante las medidas obtenidas conectando los paneles. Para ello, los módulos fotovoltaicos analizados han sido el módulo de 10W ET-M53610 y el módulo de 30W MS-30P.

Por último, también se ha realizado un análisis de los sistemas existentes para la caracterización de los módulos fotovoltaicos, el concepto de la degradación sufrida en los paneles solares y el concepto mismatch.

3. CONTEXTO

3.1. Descripción de una instalación solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en la transformación de la energía solar en energía eléctrica, mediante el efecto fotovoltaico que se produce en sus células de los módulos fotovoltaicos. No obstante, la producción solar y la demanda de las cargas no siempre se dan en el mismo momento. Por ello, para dar solución a este problema, existen tres tipos de instalaciones fotovoltaicas: las instalaciones conectadas a la red, las aisladas y las híbridas.

Los sistemas conectados a red (*Figura 1*), como su propio nombre indica, son las instalaciones fotovoltaicas que inyectan directamente la energía generada a la línea eléctrica que opere en la zona. De esta manera, es la propia red la que cumple la función de almacenaje, comprando la energía en los periodos de producción y vendiéndola en los momentos de consumo. Su mayor ventaja en comparación con el resto de instalaciones es el ahorro técnico y económico, ya que su equipo se basa en dos componentes principales: los módulos fotovoltaicos, que generan la energía en corriente continua, y los inversores, que convierten dicha corriente continua en alterna.

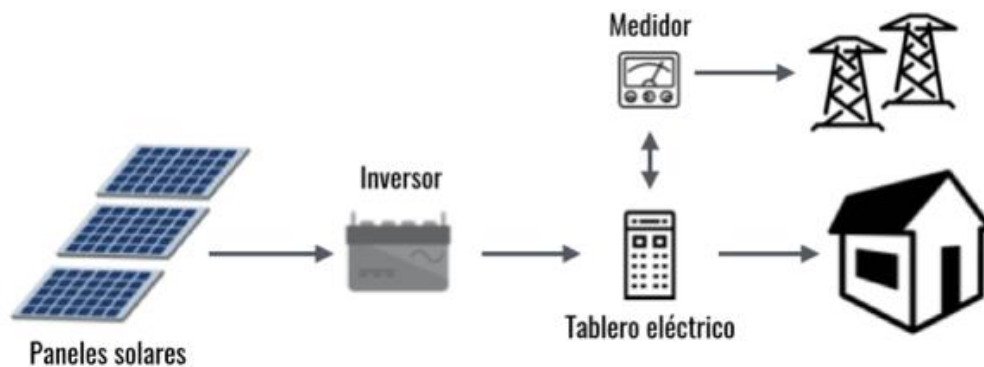


Figura 1. Esquema de una instalación fotovoltaica conectada a red. ^[2]

En el caso de las instalaciones aisladas (*Figura 2*), también conocidas como *Stand Alone Systems*, la energía generada se consume en el momento de su producción y se almacena sus excedentes. Es por ello que este tipo de instalaciones habitualmente incluyen más equipo aparte de los módulos y los inversores mencionado anteriormente. Estos equipos suelen ser un sistema de acumulación (normalmente baterías) y reguladores (para controlar el proceso de carga y descarga de dichas baterías). Este tipo de instalaciones suelen ser habituales en lugares donde la comedia de la red eléctrica no está disponible o en aplicaciones pequeñas como en las calculadoras solares, teléfonos de socorro o barcos.^[3]

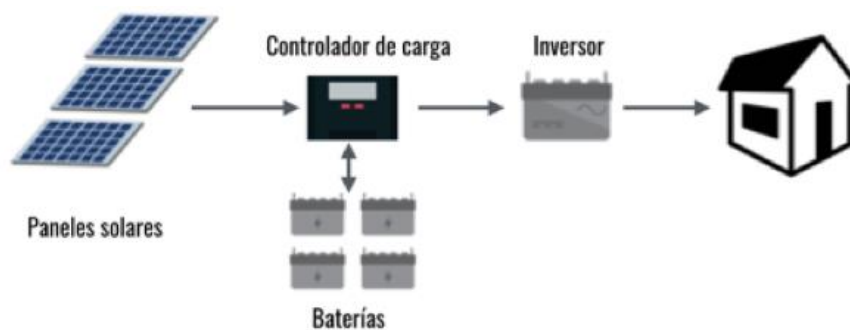


Figura 2. Esquema de una instalación fotovoltaica aislada. ^[2]

Combinando estos dos tipos de instalación, se crea la instalación fotovoltaica híbrida, cuyo esquema aparece en la *Figura 3*. En estos casos, los excedentes de la energía fotovoltaica no consumida en el momento de la producción se almacenan mediante un sistema de acumulación, como ocurriría en una instalación aislada. No obstante, en los casos donde la producción y el almacenaje no son capaces de abastecer la demanda total de las cargas, es la red eléctrica la encargada de suministrar esa falta. Cabe mencionar, que no todas las instalaciones híbridas tienen porque estar conectadas a red, puede ser otro tipo de generación el encargado de suministrar esa falta de producción (por ejemplo, un aerogenerador o un motor diésel).^[4]

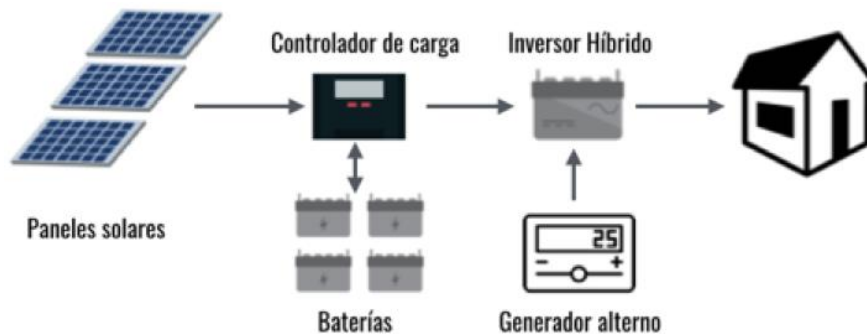


Figura 3. Esquema de una instalación fotovoltaica híbrida.^[2]

3.2. Principio de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos

3.2.1. El efecto fotovoltaico

El funcionamiento de las células fotovoltaicas se basa en el efecto fotovoltaico, el proceso en el cual se genera un voltaje en el material semiconductor debido a la diferencia de potencial que se da a causa de la radiación electromagnética proveniente del sol. Para lograrlo es necesario un semiconductor extrínseco de tipo P con la zona de electrones de carga positiva en la parte inferior y un semiconductor extrínseco tipo N con la zona de electrones con carga negativa en la parte superior, creando así un conjunto PN. De esta manera, al unir los dos semiconductores y exponerlos a la radiación, la energía de los fotones se transmite a los electrones de la zona N, creando el efecto fotoeléctrico y aumentando la carga negativa en dicha zona. Esto conlleva una diferencia de potencial entre las zonas N y P, que conectando ambos semiconductores mediante un conductor sin resistencia hace que los electrones circulen entre ambas zonas generando la corriente de cortocircuito. En el caso de colocar una carga entre ambas zonas es posible provechar la energía solar, como muestra la *Figura 4*. Diagrama de interpretación del panel fotovoltaico. *Figura 4*.

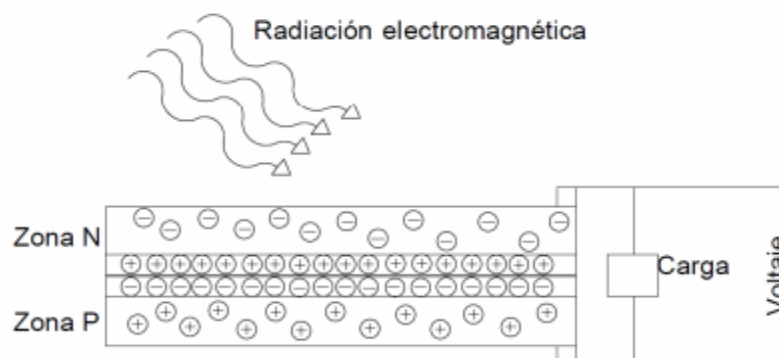


Figura 4. Diagrama de interpretación del panel fotovoltaico.^[5]

3.2.2. Componentes de los módulos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico está formado por células fotovoltaicas conectadas eléctricamente entre sí, tanto en serie como en paralelo, obteniendo unos valores de voltaje y corriente específicos para cada configuración. A dicho conjunto de células se le añade aislamiento, protección, rigidez y estanqueidad con el fin de protegerlos ante los agentes atmosféricos externos, los cuales pueden afectar el equipo al instalarlo a la intemperie. De esta manera, los módulos constan de los componentes que aparecen en la *Figura 5*.

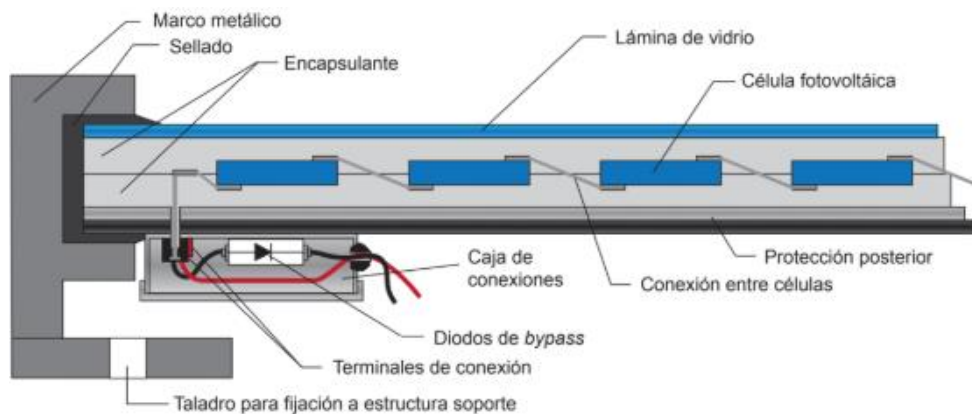


Figura 5. Sección de un módulo fotovoltaico. [3]

- **Cubierta frontal:** proporciona protección a las células frente a los agentes externos como la lluvia, granizo, arena etc. Ha de ser de un material impermeable al agua y antiadherente, con una baja degradación a la exposición prolongada de los rayos UV, una baja resistividad térmica, una buena resistencia al impacto y sobretodo una buena transmisión a la radiación. Por eso la cubierta más empleada suele ser de vidrio o cristal templado de 3mm de grosor, pero también se pueden encontrar de acrílicos o polímeros.
- **Encapsulado:** contiene las células solares, la superficie frontal y posterior del módulo. Normalmente está formado por el polímero acetato de etilenvinilo (EVA), ya que se trata de un material con gran resistencia a la fatiga térmica y a la abrasión. Estas características atrasan la producción de la decoloración en los paneles, la cual es consecuencia de la larga exposición que sufren estos materiales a la radiación UV.
- **Células:** son las encargadas de llevar a cabo el efecto fotovoltaico, convirtiendo la radiación solar en electricidad. Las conexiones entre sí, suelen ser mediante contactos metálicos de aluminio o acero inoxidable, soldándolos en el proceso de fabricación. Pueden sufrir roturas por estrés térmico o cargas mecánicas llegando a afectar las conexiones eléctricas internas.
- **Cubierta posterior:** normalmente se fabrica del polímero PVF o polifluoruro de vinilo, material que proporciona rigidez y protege de los agentes externos, igual que la cubierta frontal. No obstante, también existen modelos que emplean este material junto a otra capa de vidrio.
- **Sellado:** suele ser un compuesto de polietileno, con el cual se garantiza la estanqueidad de los cuatro laterales del módulo.

- Bastidor o marco metálico: su función es proporcionar rigidez y estanqueidad al conjunto, siendo capaz de soportar los esfuerzos generados por el viento principalmente. Su material suele ser el aluminio anodizado o el acero inoxidable. No obstante, este componente lo es obligatorio, por ejemplo, los módulos de capa fina no lo poseen.
- Caja de conexiones: es donde se encuentran los terminales para la conexión de los módulos y deben tener como mínimo una protección IP-54. Además, para proteger la entrada de agua y polvo, en los pasos de los cables también se añaden prensaestopas.
- Diodos de paso o diodos bypass: su función es crear un cortocircuito en las zonas del módulo que pueden dañarse o puedan empeorar el funcionamiento general del sistema. Normalmente están incluidos en la caja de conexiones. [3]

3.2.3. Tipos de células fotovoltaicas

Dependiendo del material con el que se hayan fabricado las células fotovoltaicas, los módulos pueden ser de tres tipos: de silicio monocristalino, silicio policristalino o de capa fina.

Actualmente, las de silicio monocristalino son las células de mayor eficacia del mercado, obteniendo valores de hasta un 25%. Sin embargo, tiene un precio elevado debido a su proceso de fabricación. Es por ello que las células de silicio policristalino obtienen el segundo puesto del mercado, ya que su proceso de fabricación es un 10% más barato y su eficiencia se mantiene en el 20%, como muestra la *Figura 6*. [6]

En cuanto a las células de capa fina, el ahorro en del material es considerable ya que se fabrican añadiendo un material semiconductor a otro elemento que sirve de soporte. Los materiales más comunes suelen ser el silicio amorfo (para aplicaciones pequeñas o fachadas), telururo de cadmio o CdTe (para instalaciones de MW) o arseniuro de galio o GaAs (para aplicaciones espaciales que necesiten poco peso y dimensiones reducidas).

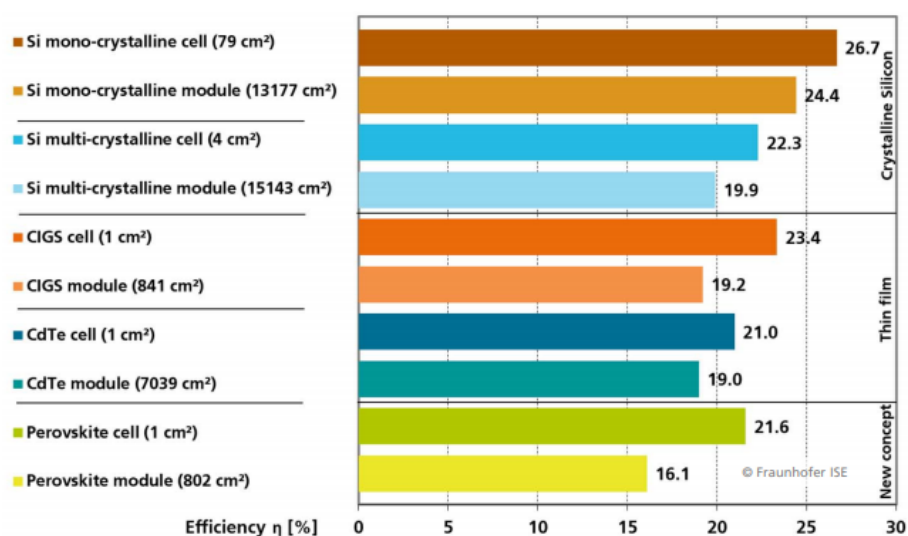


Figura 6. Eficiencia de células solares según la tecnología. [7]

4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

4.1. Curvas características de los módulos fotovoltaicos

4.1.1. Parámetros eléctricos

Cada panel fotovoltaico obtiene unos valores eléctricos específicos, los cuales se muestran en las placas características de los mismos. En este apartado se definen los parámetros eléctricos fundamentales en dichas placas:

- **I_{SC}** : se define como la corriente de cortocircuito o la intensidad que se genera en el módulo cuando la tensión entre los terminales es cero, es decir, la corriente máxima que se produce en el panel ya que no hay resistencia en el circuito. Se mide en Amperios y en comparación con la I_{MPP} su valor es entre el 5% y el 15% mayor.
- **V_{OC}** : se define como la tensión de circuito abierto o tensión que proporciona el modulo cuando no hay ninguna carga conectada o no circula corriente por el panel. Se mide en Voltios.
- **P_{MPP} (W)**: se define como la potencia máxima que puede generar el panel, es decir, la potencia que se genera cuando la corriente y la tensión son I_{MPP} y V_{MPP} .
- **I_{MPP} (A)**: se define como la intensidad que se genera cuando el panel está generando su potencia máxima. Su valor siempre es menor a I_{SC} .
- **V_{MPP} (V)**: se define como la tensión que se genera cuando el panel está generando su potencia máxima. Su valor siempre es menor a V_{OC} .

Estos parámetros se muestran gráficamente mediante una curva característica de tensión y corriente (I-V) o una curva de potencia, como por ejemplo la que se muestra en la *Figura 7*. Para llevarla a cabo se obtienen los valores de dichos parámetros del panel en condiciones estándares de medida o STC, es decir, frente a una irradiancia de 1000 W/m^2 , una temperatura de la célula de 25°C , los rayos incidiendo perpendicularmente y un espectro de luz solar a una mesa de aire (MA) igual a 1,5.

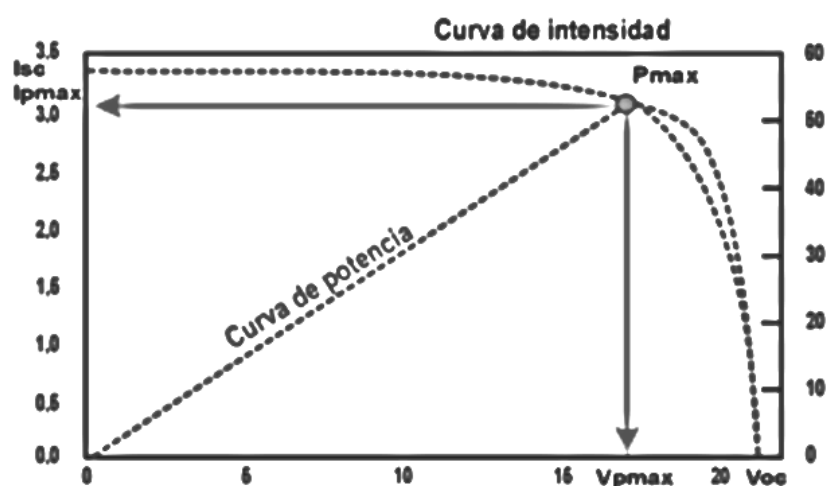


Figura 7. Curva de intensidad y curva de potencia. [5]

Aparte de las tensiones y corrientes ya analizadas existen otros dos parámetros mencionables, el factor de forma y la eficiencia energética.

El factor de forma se define como la relación entre la potencia máxima teórica y la potencia real, calculándose de la siguiente manera:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (1)$$

En el caso de las células cristalinas su valor ronda entre el 0.70 y el 0.85, mientras que en las células amorfas su valor ronda entre 0.50 y 0.70, siendo su valor ideal la unidad.

En cuanto a la eficiencia energética o η , se define como la relación entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la potencia de la radiación solar incidente. [8]

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{S \cdot a} \quad (2)$$

Donde,

S es la irradiancia incidente (W/m^2)

a es el área ocupada por los módulos (m^2)

4.1.2. Efecto de la irradiancia

Uno de los parámetros que hace variar las curvas características de los módulos fotovoltaicos, aparte del tipo de celda, es la radiación incidente que llega a ellos, donde cuanto mayor es el valor de irradiancia mayor es la potencia generada. No obstante, el valor de I_{SC} también varía significativamente, como se muestra en la *Figura 8*, mientras que el valor del voltaje en circuito abierto tiene una variación mínima.

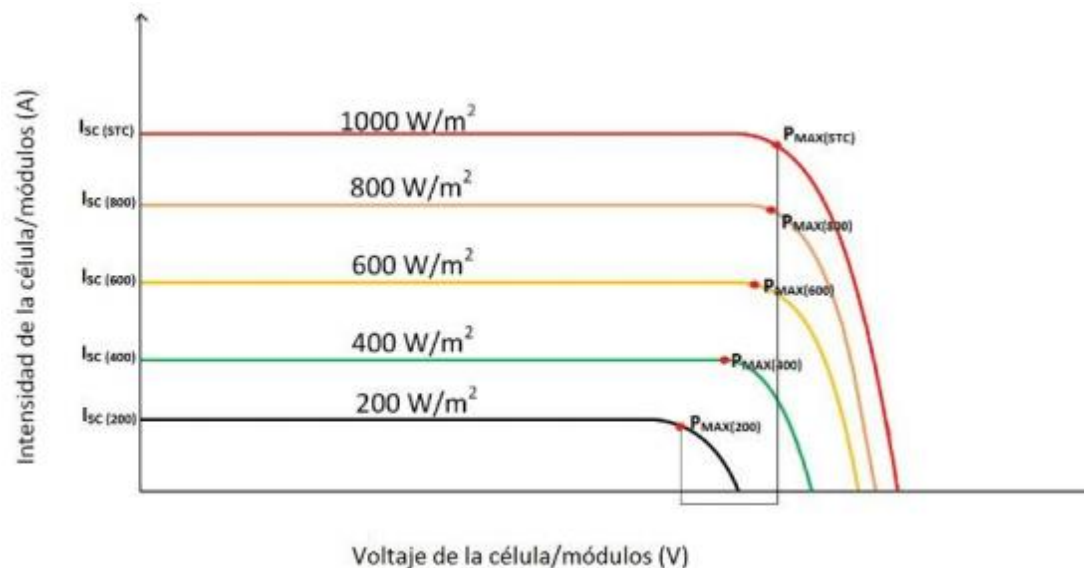


Figura 8. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia. [9]

4.1.3. Efecto de la temperatura

Sin embargo, la variación de temperatura tiende a afectar principalmente los valores de voltaje en la curva característica de intensidad-voltaje, en específico el valor de la tensión de circuito abierto (V_{OC}). No obstante, también varía el punto de máxima potencia y el valor de la corriente en circuito cerrado, aunque este último muy ligeramente.

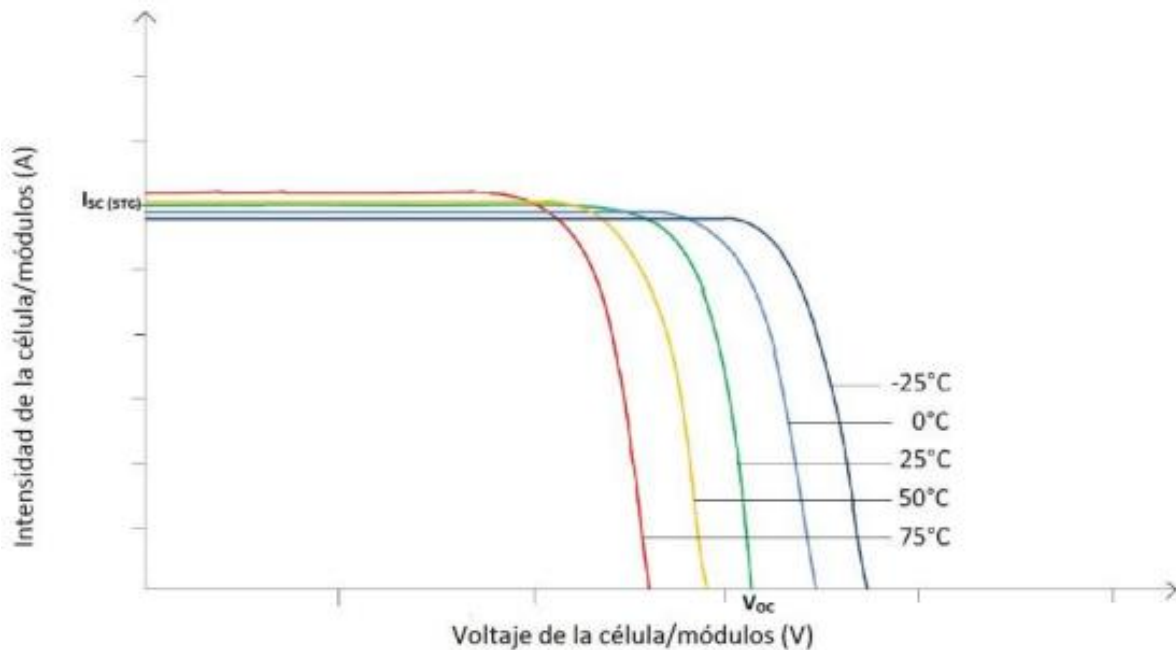


Figura 9. Curva I-V para distintas temperaturas. ^[9]

4.1.4. Circuito equivalente de una celda solar

El circuito eléctrico equivalente de una celda solar consta generalmente de una fuente de corriente foto generada por acción de la radiación solar (I_L), un diodo (D), una resistencia en paralelo (R_p) y una resistencia en serie (R_s), como muestra la Figura 10.

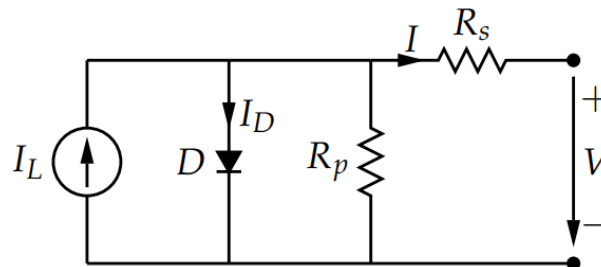


Figura 10. Representación eléctrica de una celda solar de un diodo. ^[10]

Los parámetros de la Figura 10 se definen de la siguiente manera:

- R_p : representa las fugas de corriente en los bordes de la célula, cortocircuitos metálicos y caminos de difusión en fronteras de grano.
- R_s : representa la resistencia interna del material al flujo de la corriente, es decir, la resistencia de contactos metálicos con el semiconductor, la resistencia de capas semiconductoras y la resistencia de malla de metalización.
- I_L : representa la corriente generada por la acción de la radiación solar.
- I_D : representa la corriente inversa de saturación del diodo.

El circuito equivalente permite obtener el comportamiento de la curva I-V mediante las siguientes ecuaciones:

$$I = I_L - N_p \cdot I_D \cdot \left[e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_t} - 1} \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \quad (3)$$

$$V_t = m \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T_1 + 273}{q} \quad (4)$$

$$I_D = \frac{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p}}{e^{\frac{V_{OC}}{V_t}} - 1} \quad (5)$$

Donde,

N_s: es el número de celdas en serie del panel solar.

N_p: es el número de celdas en paralelo del panel solar.

k: es la constante de Boltzman.

qe: es la carga del electrón.

m: es el factor de idealidad del diodo (1 < m < 2).

T₁: es la temperatura de trabajo del panel solar en °C.

R_p: es la resistencia en paralelo.

R_s: es la resistencia en serie.

I_L: es la corriente fotogenerada.

I_{sc}: es la corriente de cortocircuito.

I_D: es la corriente inversa de saturación del diodo.

V_{oc}: es la tensión de circuito abierto. [11]

No obstante, según [12] en el caso de que en panel solar haya sufrido degradación, su circuito equivalente se modificaría, como se muestra en la *Figura 11*. Se le añade una fuente de corriente opuesta (*I_c*), la cual representa la pérdida por degradación de la cubierta transparente, una resistencia variable en paralelo (*R'_p*) y una resistencia variable en serie (*R'_s*). De esta manera, la resistencia equivalente paralela es menor y la equivalente conectada en serie es mayor a las originales, reduciendo la productividad del módulo fotovoltaico.

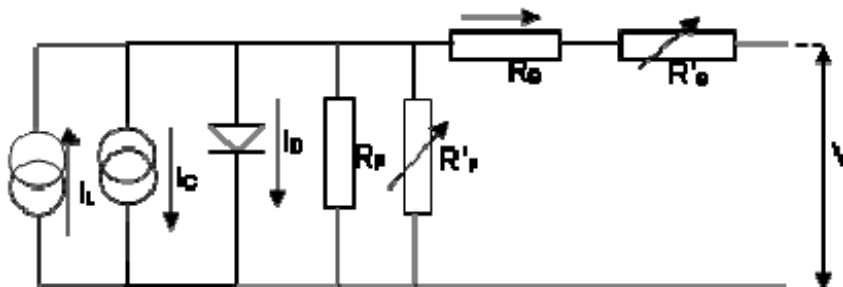


Figura 11. Modelo de circuito equivalente de un módulo degradado. [12]

4.2. Pérdidas mismatch

El concepto mismatch también es conocido como pérdidas por conexionado o por desacoplo y se basa el hecho de que no es posible fabricar todos los módulos perfectamente iguales, por lo que sufren ligeras variaciones sobre los valores de catálogo. Estas variaciones se suelen dar tanto entre las células de un mismo panel o incluso entre los módulos del mismo tipo.

En el caso de sufrir la variación en los valores de corriente, el modulo o célula con menor corriente limita la corriente en serie y en el caso de que el parámetro variado sea de tensión, lo mismo ocurre pero con la conexión en paralelo. De esta manera, la potencia generada es menor a la ideal o la que ofrece el fabricante. No obstante, estas pérdidas se pueden reducir mediante una instalación ordenada de potencias de los módulos fotovoltaicos o mediante la utilización de diodos bypass. ^[7]

4.3. Degradación de los módulos fotovoltaicos

Para considerar un módulo fotovoltaico como degradado, su valor de potencia debe alcanzar un nivel inferior al 80% en comparación con la potencia inicial. Existen diferentes tipos, como la corrosión o la decoloración entre otros, los cuales son causados por los llamados mecanismos de degradación. Ambos conceptos se encuentran explicados con mayor concreción en los siguientes apartados: ^[13]

4.3.1. Mecanismos de degradación

Los mecanismos o modos de degradación son los factores o razones por la cual se crean dicho fenómeno en alguno de los elementos del módulo fotovoltaico, generando un funcionamiento no ideal del mismo. No obstante, hay veces en las que es complicado establecer la causa de la degradación, ya que a menudo influyen varios factores a la vez. Entre otros, los mecanismos de degradación se ven influenciados por los distintos materiales empleados en los módulos (vidrio, metal, polímeros o células) y/o por los factores ambientales del entorno.

- Radiación solar

La radiación solar es uno de los factores ambientales que puede degradar los módulos, ya que, a pesar de ser esencial para la generación de electricidad, un exceso de radiación puede conllevar a un exceso de temperatura en el panel, lo cual resulta perjudicial debido al estrés térmico generado. Además, la radiación ultravioleta puede causar reacciones químicas y degradación en el interior de los polímeros y en el exterior de los módulos fotovoltaicos.

- Humedad

La humedad presente en el aire, la niebla, el rocío o la lluvia también puede causar grandes daños en los módulos fotovoltaicos. En estos casos, la humedad entra en contacto con los elementos metálicos como rejillas o conectores del panel, causando corrosión u oxidación en las mismas. De la misma manera, también puede afectar a la adherencia de las capas de polímeros.

- Nieve y viento

En el caso de la nieve y el viento, estos fenómenos atmosféricos generan cargas estáticas las cuales pueden llegar a causar roturas en el propio módulo o en su estructura. En específico, los valores de las cargas de la nieve pueden variar entre 30-50

kg/m³ (para la nieve fresca) y 800-900 kg/m³ (para nieve congelada). Asimismo, en el caso del viento también se generan cargas dinámicas.

- Granizo

En este caso, se puede llegar a causar estrés por impacto, produciendo una rotura en el vidrio y afectando al rendimiento del módulo.

- Cambios de temperatura

Los cambios de temperatura pueden afectar al módulo causando estrés termo-mecánico en sus diferentes componentes. De esta manera, se pueden alcanzar valores de tensión que den lugar a la rotura de las células o incluso la separación de los componentes, fenómeno también conocido como delaminación.

- Suciedad

La suciedad del panel también es un aspecto a tener en cuenta en cuanto a la degradación de los módulos, ya que el polvo, la tierra en combinación con el viento o incluso los restos orgánicos de aves por ejemplo actúan como un mecanismo de abrasión dañando la superficie de los elementos exteriores de los módulos fotovoltaicos.

- Gases y salitre

Por último, la cercanía de los paneles a la costa o a carreteras e industrias puede causar corrosión en los elementos metálicos y degradación en los polímeros empleados. Esto es causado por la sal y por los gases (O₃, NH₃, SO₂, NO₂, H₂S, Cl₂ entre otros) que se encuentran en la atmosfera y que combinando con humedad se convierten en ácidos (HNO₃, HCl, H₂SO₄, etc.).^[14]

4.3.2. Tipos de degradación

Tras sufrir el efecto de los factores ambientales mencionados en el apartado anterior y su influencia en los distintos materiales de los módulos fotovoltaicos, estas tecnologías tienden a mostrar su deterioro mediante los siguientes tipos de degradación:

- Delaminación

El fenómeno delaminación ocurre cuando se sufre una pérdida de adhesión entre el polímero encapsulado y las células o entre las células y el cristal frontal, como se muestra en la *Figura 12*. Por lo tanto, la resistencia en serie del panel (R_s) aumenta y se disminuye el parámetro I_{sc} y la potencia, ya que el parámetro V_{oc} se mantiene constante.



Figura 12. Módulo fotovoltaico con delaminación.^[13]

Este tipo de degradación se ve favorecida en los climas cálidos y húmedos, facilitando a su vez la filtración de una mayor cantidad de humedad entre los distintos materiales del módulo y produciendo así corrosión con mayor frecuencia. Cabe mencionar que este tipo de degradación es más severa cuando se produce en los bordes del módulo ya que, además de reducir la potencia energética generada, causa problemas eléctricos para el módulo y para toda la instalación fotovoltaica. De esta manera, este fenómeno causa dos efectos en el módulo fotovoltaico dañado: por un lado, aumenta la reflexión de la luz, y por otro lado, incrementa la penetración del agua dentro de la estructura del módulo.^[13]

- Decoloración

La decoloración del módulo es un cambio en el color que se da en el módulo debido a la degradación sufrida en el encapsulante, principalmente a causa de los rayos ultravioleta combinados con agua a temperaturas superiores a 50 C. De esta manera, como muestra la *Figura 13* el color del material se ve modificado y se vuelve de tonos amarillos (fenómeno denominado *yellowing*) o incluso marrones (*browning*). Sin embargo, este tipo de degradación puede aparecer de distinta manera en diferentes zonas del módulo ya que se puede haber empleado polímeros de diferentes características (*Figura 14*).



Figura 13. Módulo fotovoltaico con decoloración. ^[15]

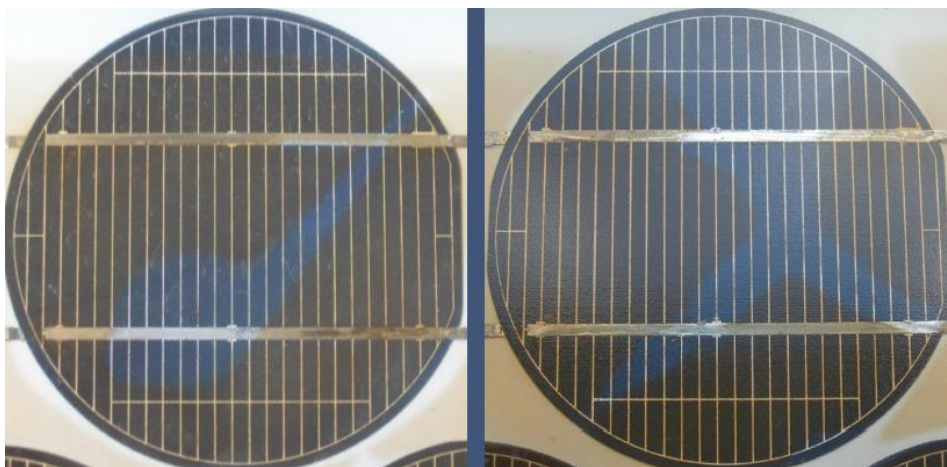


Figura 14. Módulo fotovoltaico con decoloración. ^[15]

Debido a este cambio, se altera la transmisión de la luz que llega a las células fotovoltaicas y por lo tanto, la potencia generada por el módulo se reduce como se aprecia en la *Figura 15*. En específico, a causa de este fenómeno la corriente de cortocircuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico se degrada, entre el 6% y el 8% por debajo del valor nominal para una decoloración parcial (*yellowing*) de la superficie del módulo y del 10% al 13% para la decoloración completa (*browning*). ^[13]

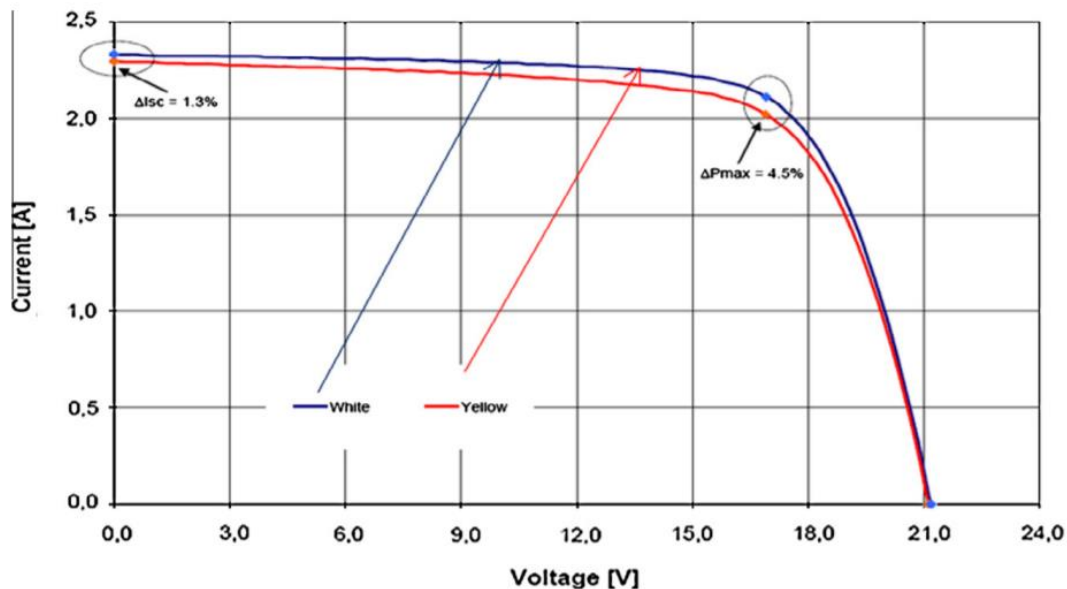


Figura 15. Características de voltaje y corriente de un módulo fotovoltaico sano o blanco (color azul) y módulo con decoloración o amarillo (color rojo). ^[13]

- Corrosión

Se define como corrosión el desgaste que sufren los cuerpos metálicos debido a las reacciones electroquímicas creadas generalmente con la entrada de agua o humedad (*Figura 16*). En concreto, en los casos de los paneles fotovoltaicos este fenómeno se da tras exponer el módulo a 85°C y el 85% de la humedad relativa durante aproximadamente 1000h. De esta manera, la retención de la humedad en el panel aumenta la conductividad eléctrica del material y a su vez aumenta las corrientes de fuga, causando así pérdidas en el rendimiento. Dicho de otra manera, la corrosión aumenta el valor de R_s y al igual que en el caso de la delaminación, el valor de I_{sc} y la potencia disminuye, manteniendo constante el valor de V_{oc} . Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, la corrosión también degrada la adhesión entre las células y el marco metálico, favoreciendo la entrada de más humedad.

Para prevenir su aparición es aconsejable utilizar juntas de baja difusión que contengan una gran cantidad de desecante o una cubierta de doble vidrio. Además, también existen métodos para minimizar sus daños, como el anodizado, un tratamiento químico que se basa en proporcionar una capa de óxido de protección (generalmente óxido de aluminio) al marco metálico del panel.

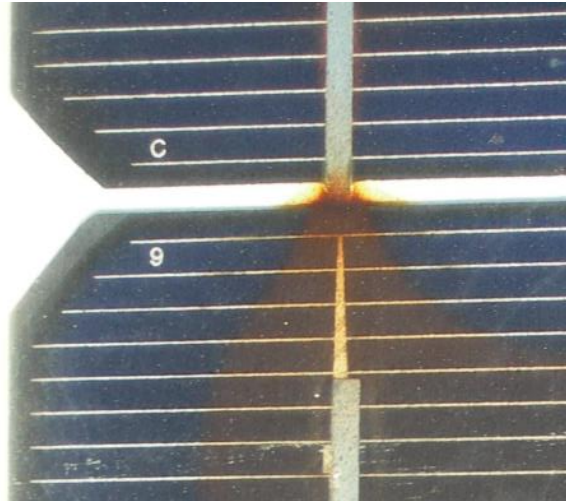


Figura 16. Módulo fotovoltaico con corrosión. [15]

- Rotura del panel

La rotura del vidrio es un importante factor de degradación de los módulos fotovoltaicos. Este tipo de daños se suelen producir mayormente durante la instalación, el mantenimiento y, especialmente, durante el transporte de los módulos en sus lugares de instalación, dejando el panel como se muestra en la *Figura 17*. Normalmente, tras las roturas de los módulos, los valores de I_{SC} y V_{OC} se reducen y el parámetro de R_S aumenta, disminuyendo la curva característica (I-V). Además, aumenta el riesgo de sufrir una descarga eléctrica y de una filtración de humedad. Por otro lado, generalmente las roturas y grietas suelen ir seguidas de otros tipos de degradación, como la corrosión, decoloración o delaminación.



Figura 17. Módulo fotovoltaico con el cristal frontal roto. [13]

En cuanto a los fabricantes, en los últimos años están optando por disminuir el grosor de las células (de 300 μm a menos de 200 μm o incluso 100 μm) y aumentar su superficie (hasta 210 mm x 210 mm), con el fin de reducir los costos de fabricación. No obstante, esto hace que las células fotovoltaicas sean más frágiles y más susceptibles a romperse durante la manipulación.

- Burbujas

Este tipo de degradación se considera un signo previo de delaminación, pero en este caso la pérdida de adhesión de EVA sólo afecta a una pequeña área y se combina con la hinchazón de la superficie donde la adhesión se ha degradado. Sin embargo, eléctricamente hablando tendrá el mismo efecto incrementando el valor de R_S . Sus causas principales son las reacciones químicas que emiten gases y se quedan atrapados en el interior del módulo fotovoltaico. La congestión aparece en el polímero encapsulado o en la parte posterior del módulo, formando así las burbujas. Éstas dificultan la disipación del calor de las células, aumentando su sobrecalentamiento y reduciendo así su vida útil.

En la *Figura 18*, se muestra un módulo fotovoltaico con un gran número de burbujas en la parte posterior. Sin embargo, en los casos donde las burbujas aparecen en la parte frontal del módulo (entre la cubierta frontal y las células solares), la radiación que llega al módulo se reduce y por lo tanto lo mismo ocurre con la producción de energía.



Figura 18. Módulo fotovoltaico con burbujas en la parte posterior. [13]

- Puntos calientes

Un punto caliente o *hot spot* es un área de un módulo fotovoltaico que tiene una alta temperatura que puede llegar a dañar las células o cualquier otro elemento del módulo. Dicho fenómeno se muestra en la *Figura 19*.

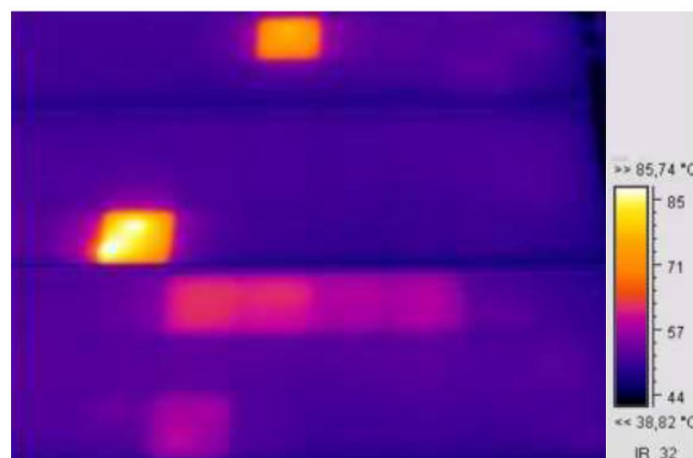


Figura 19. Módulo fotovoltaico con puntos calientes. [15]

Su origen puede producirse por causas como el sombreado parcial, el desajuste de las células o los fallos en sus interconexiones. En condiciones de cortocircuito, cuando una célula fotovoltaica es defectuosa, su voltaje se invierte y se vuelve igual y opuesto al voltaje de las otras células en serie. De esta manera, esa célula defectuosa se convierte tanto en una carga para el resto de células como en una zona de gran estrés térmico convirtiéndose así en un punto caliente.

- Degradación inducida por potencial o PID

Los módulos individuales de los sistemas fotovoltaicos suelen conectarse en serie para aumentar el voltaje del sistema y de esta manera, la diferencia de potencial puede llegar a alcanzar varios cientos de voltios (normalmente 300-500 V). Debido a esta tensión eléctrica entre los módulos fotovoltaicos y su estructura, los electrones de los materiales utilizados para los módulos tienden a desplazarse a través de la estructura conectada a tierra cuando el aislamiento entre la estructura y las capas activas no dañadas, creando así corrientes de fuga. Este fenómeno se conoce como PID o *Potential Induced Degradation* y se caracteriza por la pérdida del rendimiento o disminución de la P_{MPP} que se da progresivamente en los módulos fotovoltaicos, llegando a obtener una reducción del 30%.

Para proteger a las personas frente al contacto directo de dichas corrientes, el marco del panel se conecta a tierra, obteniendo un potencial de 0 V. De esta forma, se genera una diferencia de potencial negativa entre las células y el marco metálico. Por otro lado, para minimizar este tipo de degradación, se debe conectar el polo del inversor a tierra, eliminando así la diferencia de potencial.

- Degradación por descargas eléctricas

Los módulos fotovoltaicos también pueden verse sometidos a descargas eléctricas provenientes de tormentas o relámpagos, dañando los paneles mediante la descarga directa o mediante el acoplamiento magnético que se produce. De hecho, este tipo de degradación produce una reducción de la potencia de salida y un aumento de la R_S . No obstante, este tipo de degradación no es tan común.

4.3.3. Relación de los principales tipos de degradación

Resumiendo, los principales tipos de degradación de los módulos fotovoltaicos son la corrosión, la decoloración, la delaminación y la rotura como muestra la *Figura 20*. En cuanto a los factores ambientales la temperatura, la humedad y la radiación UV son los principales factores de degradación. No obstante, los estudios analizados no apuntan a un modo de degradación en particular, sino a la degradación total de la potencia del módulo, ya que es difícil estudiar el impacto (velocidad, frecuencia) de un modo de degradación particular. ^{[13] [16]}

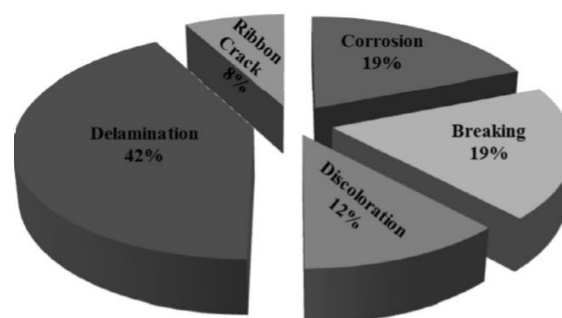


Figura 20. Tipos de degradación más comunes en los módulos fotovoltaicos de silicio. ^[13]

En la siguiente tabla se muestran los tipos de degradación, los factores ambientales y los parámetros eléctricos que se ven directamente afectados entre sí, teniendo en cuenta que todos ellos conllevan una reducción en la potencia generada por el módulo.

Tabla 1. Resumen de la degradación de los módulos fotovoltaicos.

Tipo de Degradación	Factor Ambiental	Parámetro Eléctrico
Decoloración	Radiaciones UV	Disminución de I_{SC}
Delaminación	Calor y humedad	Aumento de R_S
Corrosión	Humedad	Aumento de R_S
Puntos calientes	Sombreamiento parcial, fallo de fabricación	Disminución de I_{SC} y V_{OC}
Burbujas	Calor y humedad	Aumento de R_S
Roturas	Granizo, actos vandálicos, fallo de fabricación	Aumento de R_S , disminución de I_{SC} y V_{OC}
PID	Calor y humedad	Disminución de P_{MPP} y R_P
Descargas eléctricas	Relámpagos	Aumento de R_S

4.4. Sistemas de medida actuales

Actualmente existen varios proyectos dedicados al estudio de la degradación de los módulos fotovoltaicos y en específico al desarrollo de dispositivos portátiles que obtengan los valores reales de las placas.

Un ejemplo de esto es el proyecto de fin de carrera "Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil" [6] de Julio Fernández Ferichola donde se plantea el diseño de dos sistemas portátiles de medida, uno de hasta 65V y otro de hasta 400V. Los dispositivos están formados por un conjunto de condensadores, que desempeñan la función de carga para el panel fotovoltaico, y una resistencia de potencia conectada en paralelo, donde estos se descargan. Por último, la conexión de la resistencia de potencia y el circuito fotovoltaico se realizan mediante interruptores, como muestra la Figura 21. Por último, para obtener los datos de las medidas realizadas, se emplea un osciloscopio portátil, del cual posteriormente se extraen los datos.

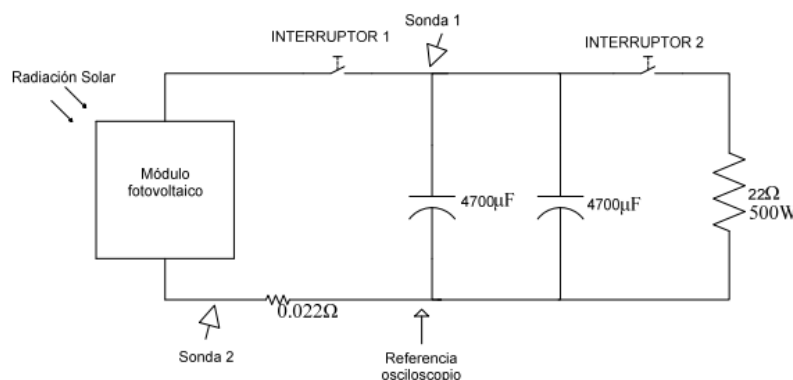


Figura 21. Circuito eléctrico del dispositivo de medida de 65V. [6]

La mayor ventaja de este dispositivo es la precisión con la que realiza las medidas y la independencia energética del sistema, ya que no es necesaria ningún tipo de alimentación. No obstante, tiene un inconveniente muy significativo: el dispositivo planteado tiene un gran tamaño (*Figura 22*) y además hay que conectarle un osciloscopio, por lo cual su transportabilidad y manejabilidad es reducida y su costo elevado.

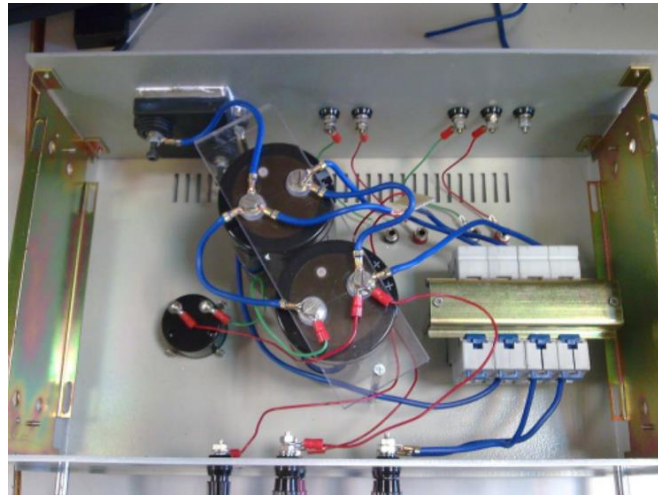


Figura 22. Interior del dispositivo de medida de hasta 65V propuesto en el proyecto "Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil". [6]

Por otro lado, también hay proyectos que en lugar de diseñar el dispositivo de medida optan por comprar uno para realizar sus mediciones. Esto ocurre en el proyecto fin de carreta "Sistema portátil de medida de dispositivos sometidos a ensayos en campo" [17] de Pablo Ramírez Lapausa, donde las mediciones las realiza un multímetro digital y los valores son almacenados mediante un software. El multímetro seleccionado en este proyecto es el modelo MyDAQ de la empresa National Instruments, el cual se muestra en *Figura 23*. Este es un sistema de medición de tamaño y peso reducidos, el cual se debe conectar a un ordenador portátil, permitiendo así realizar las medidas en campo con gran facilidad. De esta manera, permite mostrar los resultados medidos con el dispositivo de una forma inmediata en la pantalla del ordenador. No obstante, su mayor inconveniente es su elevado coste, ya que entre el dispositivo, el software y la carga variable su presupuesto llega a alcanzar los 4.000€, con la necesidad de tener un PC disponible.

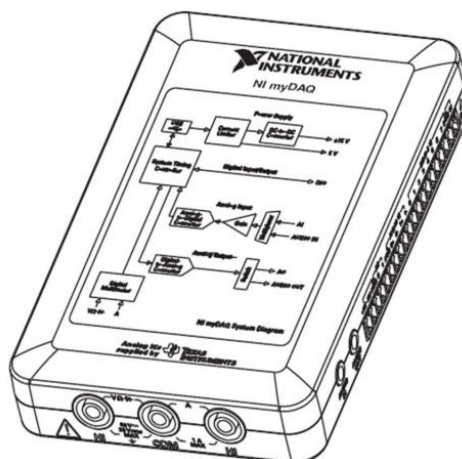


Figura 23. El dispositivo modelo MyDAQ de la empresa National Instruments. [17]

4.5. Normativa de fabricación/verificación de los paneles

La normativa española actual que define la correcta fabricación de los módulos fotovoltaicos es la IEC 62941:2020 "Módulos fotovoltaicos (FV) terrestres. Sistema de calidad para la fabricación de módulos FV." ^[18], donde se definen el diseño de producto, procesos de fabricación, selección y control de los materiales utilizados y ensayos a los que deben someterse los módulos fotovoltaicos para su homologación.

En este documento se hace referencia a los siguientes documentos, de manera que parte o la totalidad de su contenido constituyen requisitos de este documento.

- IEC 60812, *Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE).*
- IEC 60891, *Dispositivos fotovoltaicos. Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos.*
- IEC 60904-1, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos.*
- IEC 60904-2, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de dispositivos solares de referencia.*
- IEC 60904-3, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 3: Fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (FV) de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia.*
- IEC 60904-4, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 4: Dispositivos solares de referencia. Procedimientos para establecer la trazabilidad de calibración.*
- IEC 60904-7, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 7: Cálculo de la corrección por desacoplo espectral para medidas de dispositivos fotovoltaicos.*
- IEC 60904-9, *Dispositivos fotovoltaicos. Parte 9: Requisitos de funcionamiento para simuladores solares.*
- IEC 61215 (todas las partes), *Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.*
- IEC 61730-1, *Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.*
- IEC 61730-2, *Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos.*
- IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems. Terms, definitions and symbols.*
- IEC 61853-1, *Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 1: Medidas del funcionamiento frente a temperatura e irradiancia y determinación de las características de potencia.*
- IEC 62108, *Módulos y sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV). Cualificación del diseño y homologación.*

- IEC 62759-1, *Ensayo de transporte de módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Transporte y envío de pilas de módulos fotovoltaicos.*
- IEC TS 62915, *Photovoltaic (PV) modules. Type approval, design and safety qualification. Retesting.*
- Guía ISO/IEC 98-3:2008, *Incertidumbre de medida. Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.*
- ISO 9001:2015, *Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos.*

5. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Como se ha mencionado en el apartado "4.4 *Sistemas de medida actuales*", actualmente se están desarrollando distintos dispositivos para la medida de los parámetros característicos de los módulos fotovoltaicos, es decir, I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} y P_{mpp} . No obstante, ambos casos analizados tienen sus desventajas. En el caso del dispositivo de la *Figura 22*, su mayor inconveniente es su tamaño y su portabilidad. Además, aparte del gran tamaño del dispositivo también se requiere un osciloscopio para obtener los datos, lo cual dificultaría la obtención de datos fuera del laboratorio. Por otro lado, el dispositivo de la *Figura 23* carece de ese problema, ya que su tamaño y su peso son mínimos. Sin embargo, su mayor problema sería su coste elevado. Debido a este inconveniente, el campo de utilización de estas soluciones es limitado, no siendo aptas para ser usadas por ejemplo en centros educativos con bajo presupuesto, en tareas de autoaprendizaje o en el diseño de sistemas de pequeño tamaño y bajo presupuesto.

Por ello, en este proyecto se ha buscado llevar a cabo un dispositivo de medida que cumpla los siguientes requerimientos: que sea fácil de manejar y de gran sencillez, que su coste no sea muy elevado y que sea fácil de desarrollar y de montar, es decir, que lo pueda llevar a cabo cualquiera en su casa (concepto DiY o Do it Yourself).

6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En este proyecto se ha llevado a cabo el diseño de un sistema de bajo coste y gran manejabilidad para la medición de los parámetros de corriente y voltaje de un módulo fotovoltaico con el fin de caracterizarlo y poder confirmar la degradación sufrida.

El sistema propuesto consta de un Arduino Uno, un monitor de corriente, una pantalla OLED y un adaptador micro-SD. Su funcionamiento es el siguiente: el monitor de corriente DC INA219 mide los valores de corriente y voltaje de la placa fotovoltaica, la pantalla OLED los muestra a tiempo real y el módulo adaptador micro-SD almacena los datos. De esta manera, gracias a los datos guardados se pueden obtener las curvas características reales de los paneles fotovoltaicos mediante el programa Excel.

Por otro lado, para medir los parámetros característicos de los módulos solares es necesario añadir al sistema una carga. En este caso, se ha optado por conectar diferentes potenciómetros y cargas variables, para poder así obtener todos los puntos de las curvas. Sin embargo, el montaje en todos los casos sería el mismo, el que se muestra en la *Figura 24* para ser exactos.

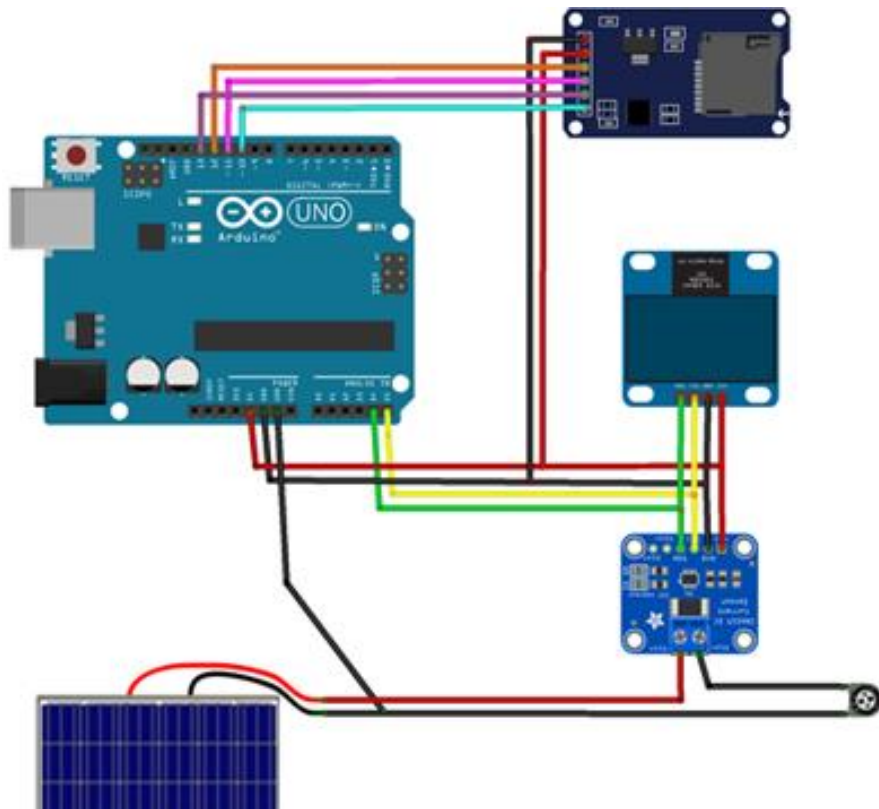


Figura 24. Solución propuesta.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

7. ANTECEDENTES

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar una instalación fotovoltaica es la potencia que cada uno de los módulos fotovoltaicos es capaz de generar ante diferentes valores de radiación y temperatura, ya que sirve para estimar la energía máxima que la instalación sería capaz de generar. No obstante, las metodologías tradicionales generalmente se apoyan en un valor fijo de la potencia al que aplican un factor numérico constante para considerar la degradación que sufrirían dichos paneles en el tiempo.

Sin embargo, la experiencia demuestra que el grado de degradación no varía de forma constante a lo largo del tiempo. Por ello, para garantizar la rentabilidad y la eficiencia de una instalación fotovoltaica, es interesante disponer de un equipo que permita medir los parámetros de operación fundamentales tanto al principio de la instalación como en labores periódicas de funcionamiento, ya que los parámetros característicos (tensiones y corrientes) de los paneles se ven alterados, lo cual conlleva una disminución en la potencia máxima generada en la instalación.^[13]

Actualmente, existen varios métodos para obtener de manera rápida los valores que caracterizan un módulo solar, conectando varios multímetros o mediante prototipos de gran tamaño. Es por ello que en este proyecto se ha planteado un nuevo dispositivo de medida de coste mínimo, tamaño reducido y gran facilidad de implementación.

8. DESCRIPCIÓN GENERAL

El sistema electrónico planteado en este proyecto tiene el objetivo de caracterizar los paneles solares obteniendo los valores reales de corriente y tensión alcanzados en los módulos fotovoltaicos analizados. Con dichos datos se logran las curvas características reales (la curva de corriente y voltaje y la curva de potencia y voltaje) mediante el programa Microsoft Excel, consiguiendo los valores reales de I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} y V_{mpp} . Una vez habiendo obtenido estos datos se han comparado con los proporcionados por los fabricantes de los módulos, los obtenidos mediante el software PV-Syst, los simulados mediante el montaje del sistema en Matlab/SIMULINK y los logrados mediante el emulador DCP150-8.

9. ELEMENTOS EMPLEADOS

Concretamente, para llevar a cabo este sistema electrónico que mida los parámetros característicos de un módulo solar los dispositivos y elementos utilizados han sido los siguientes:

9.1. Placa de prototipo

La placa de prototipo o *proto-board* es un tablero con orificios conectados electrónicamente de manera interna utilizados en proyectos de electrónica y robótica sin necesidad de hacer soldadura. En este caso, se ha optado por una con 830 puntos y un tamaño de 16 x 5 cm, como se muestra en la *Figura 25*. Consta de 10 filas marcadas de la A a la J y dos filas extra en cada lateral para la alimentación marcadas con + y -. Por otro lado, también consta de 60 columnas marcadas de la 1 a la 60, las cuales se componen por cinco puntos conectadas entre sí y aisladas del resto.

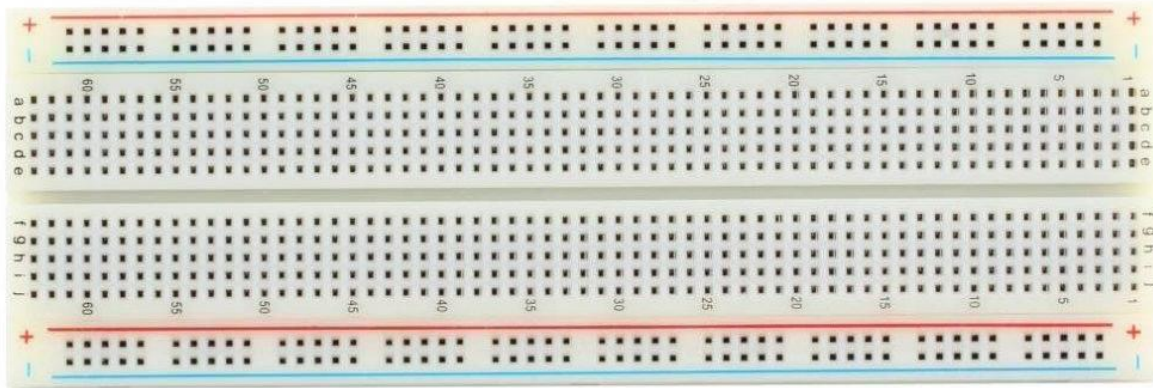


Figura 25. Placa de prototipo utilizada en el proyecto.

9.2. Cables

Para conectar todos los dispositivos electrónicos se han utilizado cables dupont de 10cm de múltiples colores y conectores macho/macho, tal y como se muestra en la *Figura 26*.



Figura 26. Cables utilizados en el proyecto.

9.3. Arduino UNO

Arduino UNO es una placa microcontroladora basada en ATmega328P 16MHz. Consta de 14 pines de entradas/salidas digitales (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 pines analógicos de entrada, una conexión USB y una memoria de 2 KB. Se puede alimentar de tres maneras diferentes: conectándolo a un ordenador mediante un cable USB, mediante un adaptador AC-CC o con una batería.

Para este proyecto se ha optado por alimentar la placa de la primera manera, mediante el cable USB. Por otro lado, se han utilizado las entradas analógicas A4 y A5 para conectar la pantalla OLED y el sensor INA219 al Arduino y los pines digitales D10, D11, D12 y D13 para conectar la placa con el módulo adaptador micro-SD.



Figura 27. Arduino UNO utilizado en el proyecto. ^[19]

9.4. Monitor de corriente DC INA219

En lugar de usar dos multímetros, en este caso se ha optado por añadir una placa de conexión con el chip INA219, ya que debido a su simpleza, consigue reducir considerablemente el tamaño y el precio del sistema final. Además, este dispositivo es capaz de medir de una manera rápida tanto un voltaje de hasta 26 V como una corriente de hasta 3,2 A a través de la interfaz I2C con una precisión del 1%. En cuanto a sus conectores, consta de un cabezal de seis pines los cuales se conectan de la siguiente manera:

- **V_{in+}** (entrada analógica): diferencial positiva del voltaje shunt. Conectar aquí el lado positivo de la resistencia shunt.
- **V_{in-}** (entrada analógica): diferencial negativa del voltaje shunt. Conectar aquí el lado negativo de la resistencia shunt. El voltaje del bus se mide desde este pin a tierra.
- **GND**: tierra.
- **V_s**: fuente de alimentación, de 3V a 5,5V.
- **SCL** (entrada digital): línea de reloj de bus serial.
- **SDA** (entrada/salida digital): Línea de datos del bus serial. ^[20]

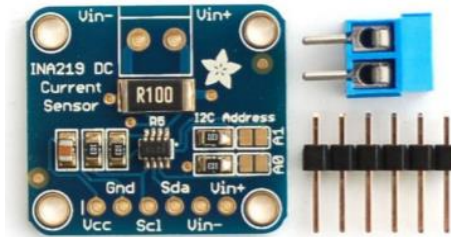


Figura 28. Componente INA219 Board utilizado en el proyecto. [21]

Para este proyecto en concreto donde el objetivo es medir los valores de corriente y voltaje que genera un módulo fotovoltaico, la placa se debe conectar a una carga (en este caso a un potenciómetro o resistencia variable B10K) mediante la siguiente conexión:

- 1- Se debe conectar el pin V_{in+} al terminal positivo de la fuente de alimentación o en este caso el de la placa fotovoltaica.
- 2- Se debe conectar el pin V_{in-} al terminal positivo de la resistencia variable.
- 3- Finalmente, se debe conectar el cable del terminal negativo del módulo al terminal negativo de la resistencia. De esta manera, el sensor mide tanto el voltaje de la carga como la corriente.

Para visualizar la conexión necesaria de este dispositivo de una manera más simple se ha llevado a cabo un montaje en la plataforma *Flitzing*, como se muestra en la *Figura 29*. También cabe mencionar, que en este tipo de componentes es importante conectar el negativo de la fuente de alimentación con el GND de Arduino y el GND de la placa INA219, ya que si no se hace esto la lectura sería errónea y no se establecería una referencia de 0V común en todo el sistema.

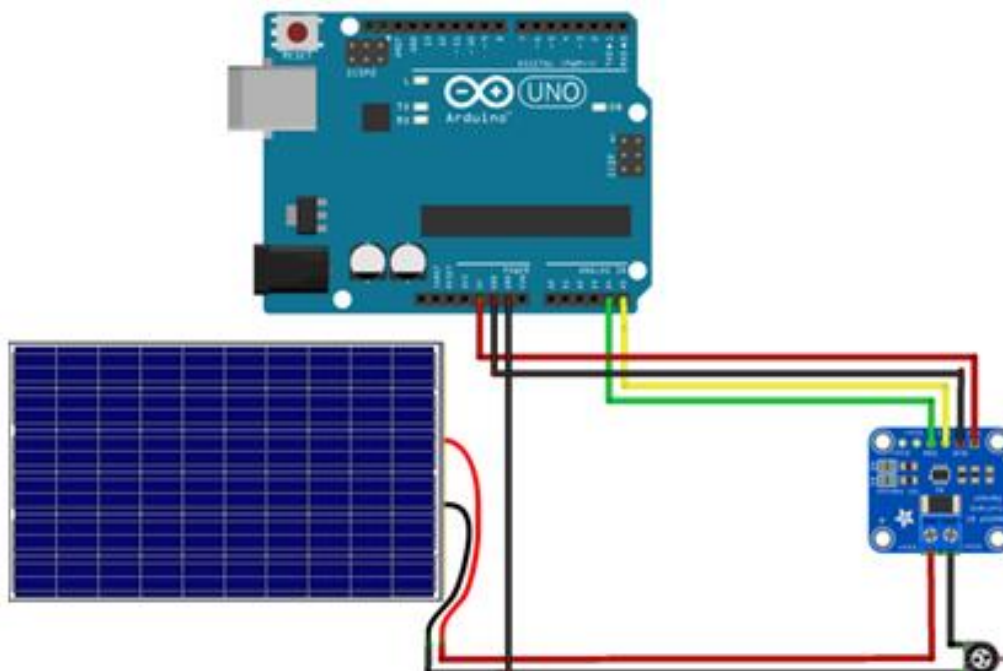


Figura 29. Conexión del componente INA219 con Arduino UNO. [19]

9.5. Pantalla OLED

Para poder visualizar los datos de corriente y voltaje medidos por el sensor INA219 se ha optado por añadir una pantalla OLED al sistema planteado. Para ello, la pantalla seleccionada ha sido una pantalla OLED de 0,96" y con una resolución de 128 x 64 pixeles. Consta del microcontrolador SSD1306, la interfaz I2C y una alimentación desde 3,3V hasta 5V, lo cual facilita la conexión con Arduino. [22]



Figura 30. Pantalla OLED utilizada en el proyecto. [23]

Para conectarlo con el resto del sistema electrónico consta de 4 pines como muestra la Figura 30. Esta conexión se muestra de manera gráfica en la Figura 31.

- **GND:** tierra.
- **VCC:** sirve para alimentar el dispositivo, por ello debe conectarse con la salida de 5V del Arduino Uno en este caso.
- **SCL:** debe conectarse con el pin SCL del componente INA219 o con la entrada analógica A5 del Arduino.
- **SDA:** debe conectarse con el pin SDA del componente INA219 o con la entrada analógica A4 del Arduino.

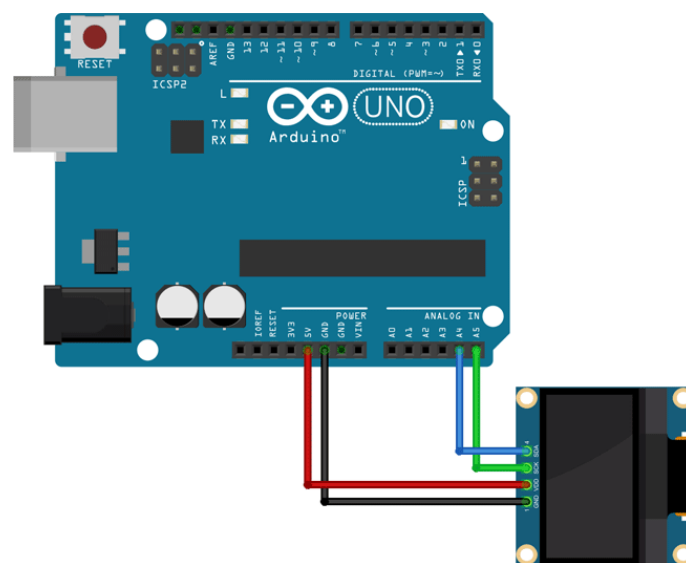


Figura 31. Conexión de la pantalla OLED con Arduino UNO.

9.6. Módulo adaptador micro-SD

Por último, para almacenar todos los datos obtenidos por el sensor se ha añadido un módulo adaptador micro-SD. Este dispositivo es capaz de usar tarjetas micro-SD estándar y micro-SDHC, pero no las micro-SDXC de alta capacidad. Por otro lado, para que su funcionamiento sea el adecuado necesita una alimentación de 3,3V concretamente, pero incluye un regulador de tensión para poder usarse con los 5V del Arduino. ^[24]

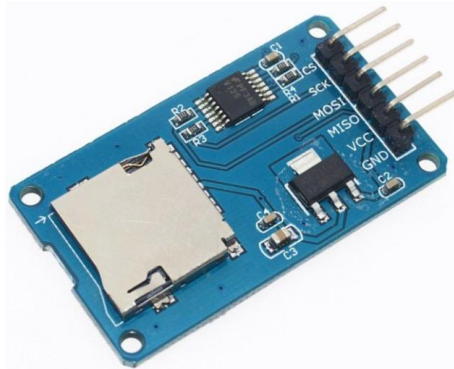


Figura 32. Módulo adaptador micro-SD utilizado en el proyecto.^[25]

Su conexión con el Arduino Uno se puede observar en la Figura 34.

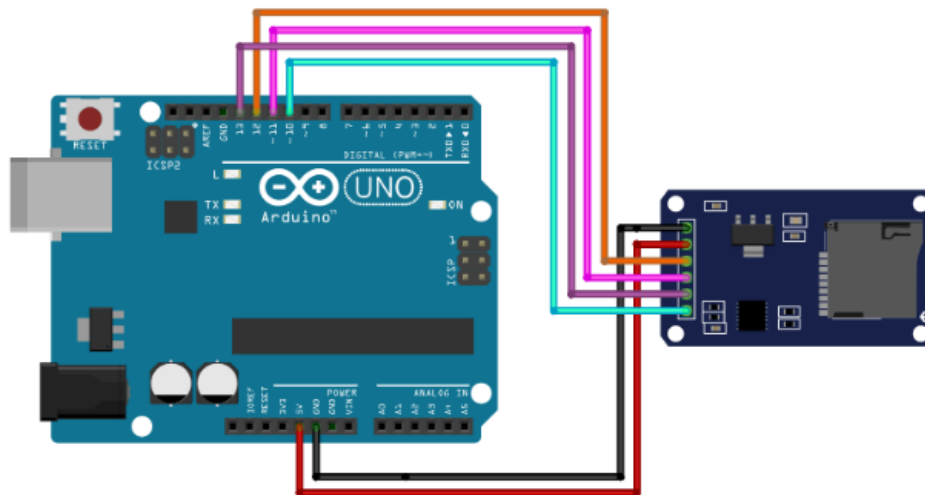


Figura 33. Ejemplo de conexión del módulo adaptador micro-SD con Arduino UNO.

10. CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SISTEMA PROPUESTO

Las conexiones entre los diferentes componentes del sistema se muestran en la *Figura 34*. Como se puede observar, el adaptador micro-SD se conecta al Arduino mediante los pines digitales D10, D11, D12 y D13. Por otro lado, para conectar la pantalla OLED y el sensor INA219 con el mismo, se utilizan las entradas analógicas A4 y A5. En cuanto a la alimentación del sistema, se ha optado por conectar el Arduino a un ordenador mediante un cable USB para obtener el valor de salida de 5V y a la vez poder compilar y subir el comando con facilidad. El comando utilizado se especifica en el ANEXO 1.

Por último, como se ha mencionado en el apartado "9.4 Monitor de corriente DC INA219", para conectar el elemento a medir al sensor existen los pines V_{in+} y V_{in-} . En este caso, como el elemento a medir es un módulo solar, se deberá conectar el borne positivo del panel a la entrada V_{in+} y el borne negativo a la tierra de Arduino, mientras que el pin V_{in+} se debe conectar a la carga.

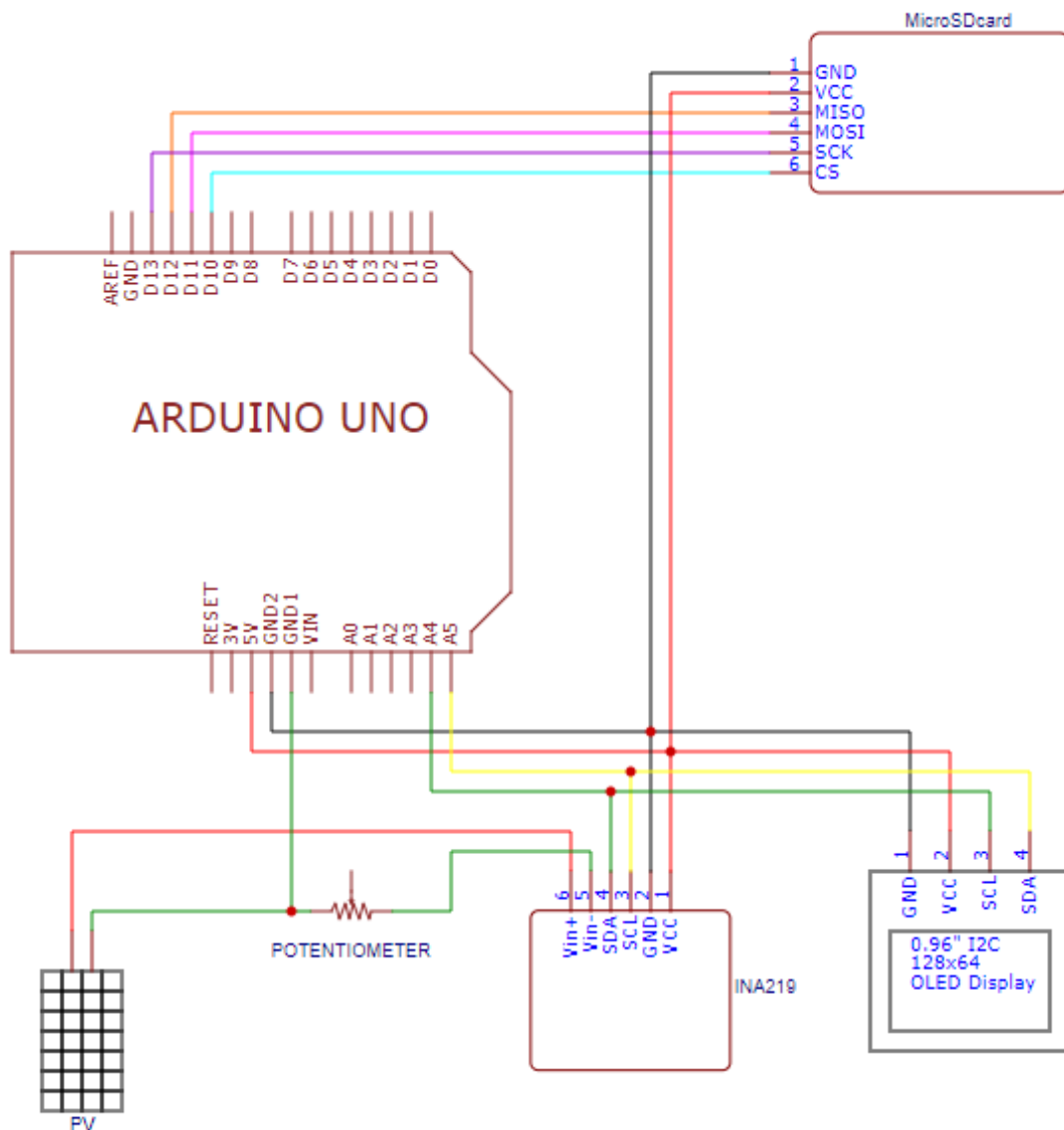


Figura 34. Circuito eléctrico del sistema electrónico planteado.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para comprobar que el funcionamiento del sistema planteado es correcto, se ha comparado los valores medidos conectando los módulos fotovoltaicos analizados (el módulo ET-M53610 y el módulo MS-30P) con los valores obtenidos al conectar el dispositivo electrónico al emulador o fuente programable DCP150-8. No obstante, para llevar a cabo la emulación de los paneles es necesario tener los valores de los parámetros característicos de los módulos para distintas irradiancias y temperaturas. Por ello, para obtener estos datos, se ha llevado a cabo la simulación de ambos paneles en el software PV-Syst, software diseñado específicamente para el diseño de sistemas solares, en la plataforma Matlab/SIMULINK.

11.1. Características especificadas por el fabricante

11.1.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610

El primer módulo solar analizado ha sido el ET-M53610 de la empresa ET Solar. Esta placa puede llegar a generar una potencia de 10W y sus características especificadas por el fabricante son las siguientes:

Tabla 2. Características del módulo solar ET-M53610 obtenidas en condiciones STC (1000W/m² de radiación solar, 1.5 de masa de aire y 25°C de temperatura).

Modelo	ET – M53610
P_{max}	10 W
Tipo de célula	Silicio monocristalino
Peso	1.7 kg
Dimensiones	383 x 299 x 34 mm
V_{mp}	17,82 V
I_{mp}	0,57 A
V_{oc}	21,97 V
I_{sc}	0,63 A
Temp. Coeff. Of I_{sc}	0,058 %/°C

De esta manera, las curvas características que se deberían de obtener con este modelo de placa solar se especifican en la *Figura 35*.

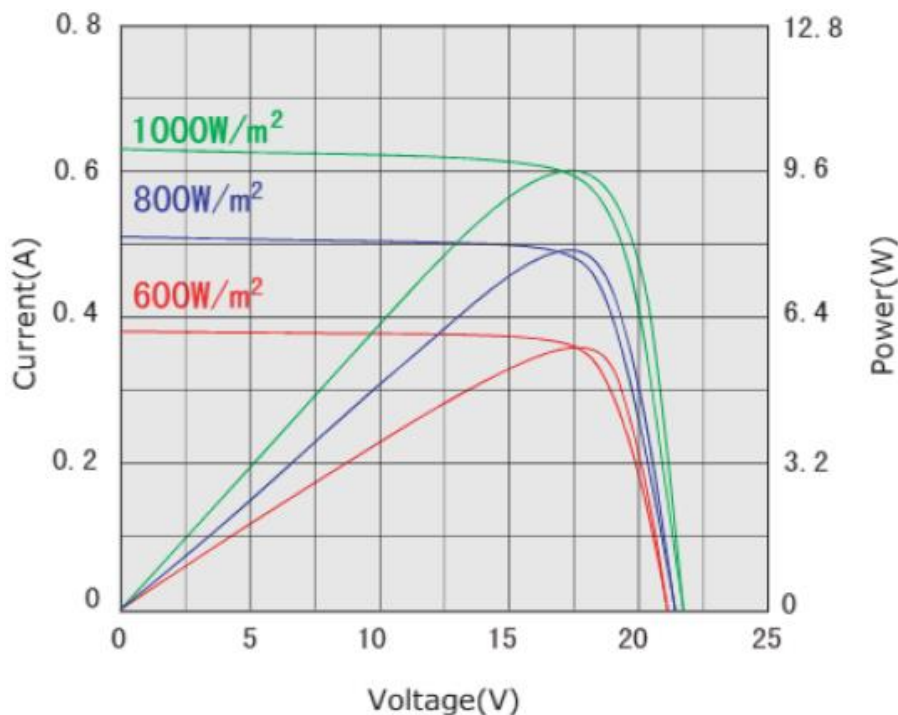


Figura 35. Curvas características especificadas por el fabricante para el módulo ET-M53610.

11.1.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P

El segundo módulo solar analizado ha sido el MS-30P de la empresa SumSol. En este caso, la placa puede alcanzar 30 W de potencia, siendo las características especificadas por el fabricante las que se muestran en la Tabla 3. Sin embargo, en este caso el fabricante no proporciona las curvas características de este modelo.

Tabla 3. Características del módulo solar MS-30P obtenidas en condiciones STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$ de radiación solar, 1.5 de masa de aire y 25°C de temperatura).

Modelo	MS-30P
P_{\max}	30 W
Tipo de célula	Silicio policristalino, con capa antireflexiva
Peso	3 kg
Dimensiones	702 x 362 x 25 mm
V_{mp}	17,40 V
I_{mp}	1,73 A
V_{oc}	21,60 V
I_{sc}	1,91 A
Temp. Coeff. Of I_{sc}	0,10 %/°C

11.2. Simulaciones PV-Syst

11.2.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610

El primer paso que hay que llevar a cabo a la hora de simular cualquier módulo fotovoltaico en el software PV-Syst es añadir los parámetros característicos del panel. De esta manera, introduciendo los datos especificados en la *Tabla 2* se ha llevado a cabo la definición del panel de 10W, como muestra la *Figura 36*.

Definición de un módulo FV

Datos básicos | Tamaños y tecnología | Parámetros del modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Modelo: ET-M53610 | Fabricante: ET Solar
 Nombre de archivo: 10W.PAN | Fuente datos:

Potencia nom. (en STC): 10.0 Wp | Tol. -/+ N/A N/A %
 Tecnología: Si-mono

La potencia nominal no coincide con los datos $V_{mpp} \cdot I_{mpp}$ (discrepancia de 1.57%). Esto distorsionará el resultado de la proporción de rendimiento (PVsyst generalmente acepta hasta 0.2%)

Especificaciones del fabricante o otras medidas

Condiciones de referencia	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	0.630	A	Circuito abierto Voc	21.96	V
Punto de Potencia máx.	Imp	0.570	A	Vmpp	17.82	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	0.4	mA/°C	Núm. de células	36 en series	
	o muIsc	0.058	%/°C			

Herramienta de resultado del modelo interno

Condiciones de operación	GOper	1000	W/m ²	TOper	25	°C
Punto de Potencia máx.	Pmpp	10.2	W	Coef. temper.	-0.46 %/°C	
	Corriente Imp	0.57	A		Voltaje Vmpp	17.7 V
Corriente de cortocircuito	Isc	0.63	A	Circuito abierto Voc	22.0 V	
Eficiencia	/ Área células	N/D %		/ Área módulo	8.87 %	

Resumen del modelo

Parámetros principales

Derivación R: 10234 Ω

Modelo serie R

Modelo serie R: 0.01 Ω
 Serie R máx.: 3.95 Ω
 Serie R aparente: 2.78 Ω

Parámetros del modelo

Gamma: 1.881
 IoRef: 2058.63 nA
 muVoc: -78 mV/°C

Mostrar optimización | Copiar a la tabla | Imprimir | Cancelar | OK

Figura 36. Datos introducidos en el software PV-Syst para el módulo Et-M53610.

De esta manera, tras la definición del módulo, el programa facilita las curvas características de corriente-voltaje, de potencia-voltaje, de eficiencia-irradiancia y de eficiencia-temperatura para diferentes valores de irradiancia incidente, temperatura, resistencia serie o resistencia de derivación. No obstante, en este caso solo se van a analizar las curvas I-V y P-V frente a distintos valores de irradiancia y temperatura.

- Variación de irradiancia

Para observar la variación de la irradiancia incidente se ha simulado el sistema para los valores de 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² y 200 W/m², manteniendo la temperatura del módulo constante en 25°C. Esta variación se puede observar en la *Figura 37* para el caso de las curvas I-V y en la *Figura 38* para las curvas P-V.

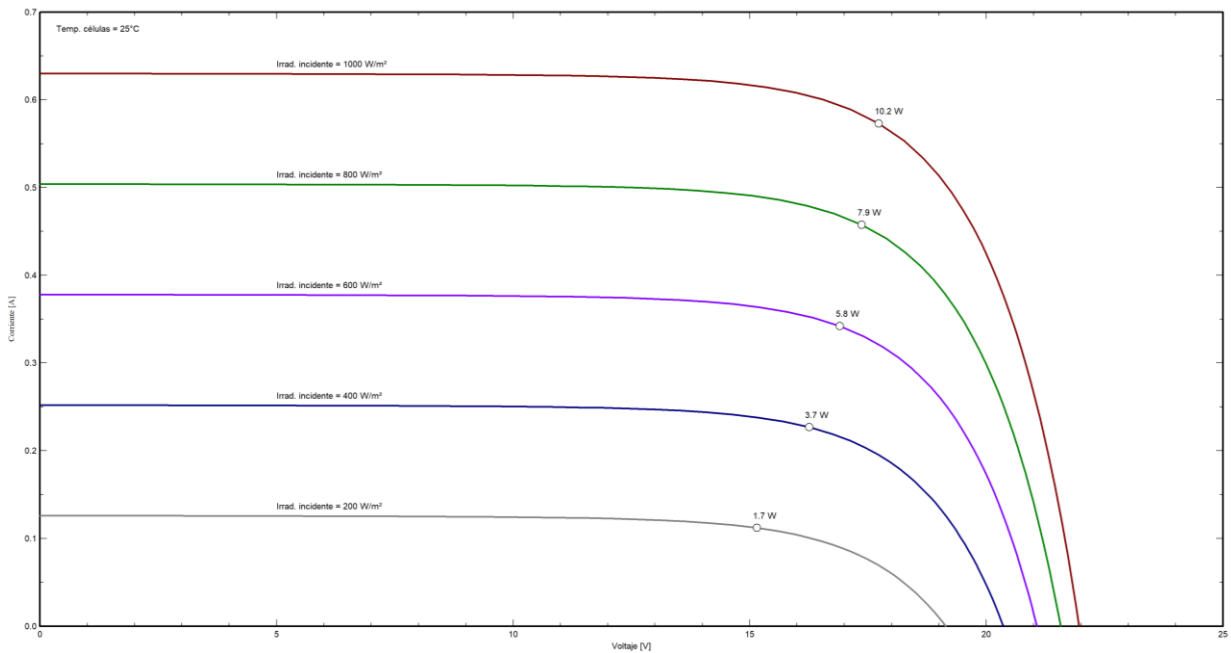


Figura 37. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.

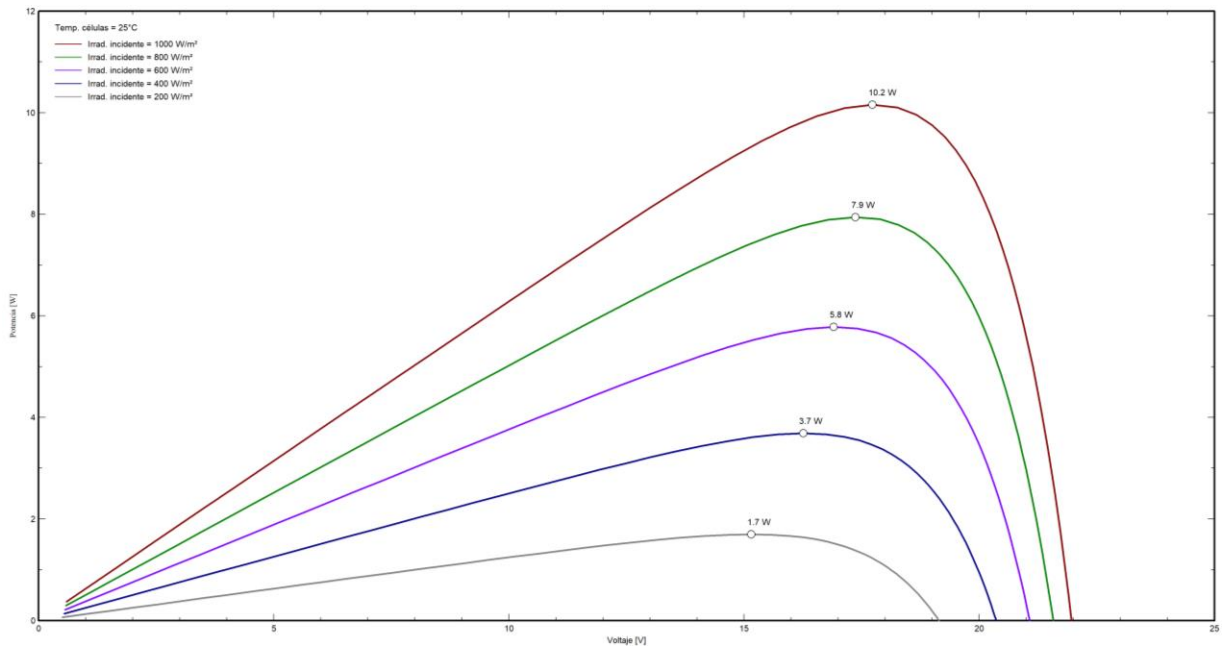


Figura 38. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.

Por último, para apreciar mejor los valores de los parámetros característicos de cada curva se ha rellenado la *Tabla 4* para cada caso de irradiancia analizado.

Tabla 4. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia.

ET-M53610 T=25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
P_{mpp}	10,2 W	7,9 W	5,8 W	3,7 W	1,7 W
V_{mpp}	17,7 V	17,4 V	16,9 V	16,3 V	15,2 V
I_{mpp}	0,57 A	0,46 A	0,34 A	0,23 A	0,11 A
V_{oc}	22,0 V	21,6 V	21,1 V	20,4 V	19,1 V
I_{sc}	0,63 A	0,50 A	0,38 A	0,25 A	0,13 A
Coef. Temper (%/°C).	- 0,46 %/°C	- 0,48 %/°C	- 0,50 %/°C	- 0,53 %/°C	- 0.60 %/°C
Área módulo	8,87 %	8,67 %	8,41 %	8,05 %	7,41 %

- Variación de temperatura

Por otro lado, también se han analizado los parámetros característicos frente a la variación de la temperatura. Para ello, se ha simulado el sistema para un valor de irradiancia constante de 1000 W/m² y unos valores de temperatura del módulo de 40°C, 25°C y 10°C. En este caso, las curvas I-V se muestran en la *Figura 39*, las curvas P-V en la *Figura 40* y los valores de cada curva en la *Tabla 5*.

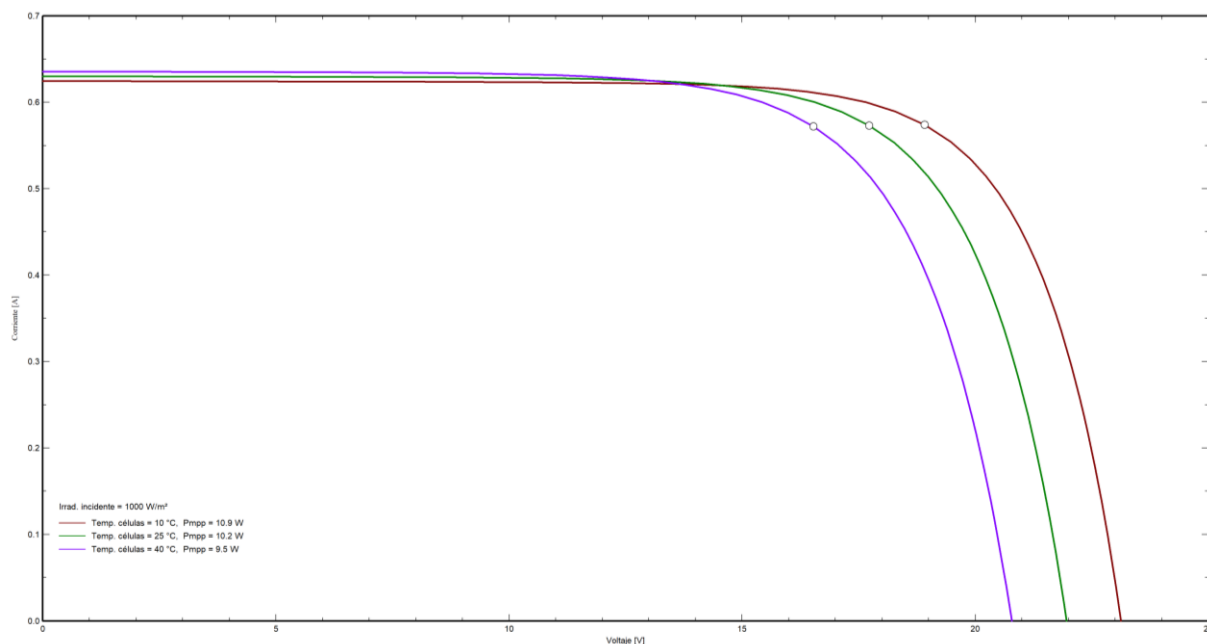


Figura 39. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.

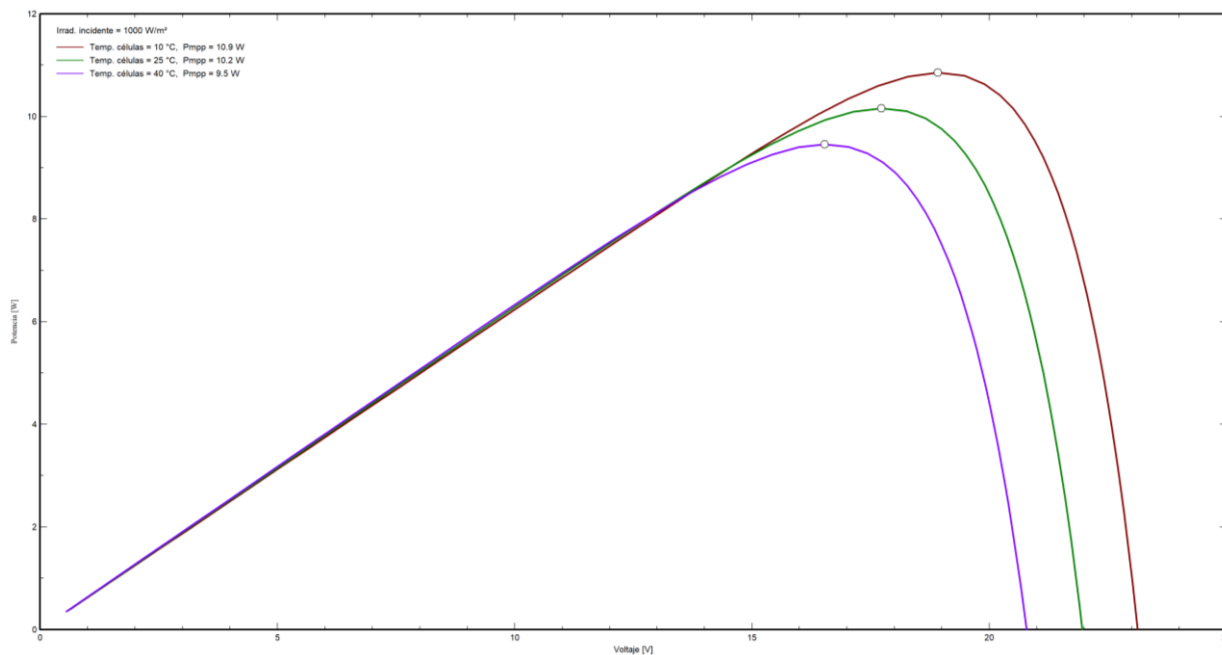


Figura 40. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el software PV-Syst.

Tabla 5. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de temperatura.

ET-M53610 1000 W/m ²	Temperatura del módulo		
	40 °C	25 °C	10 °C
P_{mpp}	9,5 W	10,2 W	10,9 W
V_{mpp}	16,5 V	17,7 V	18,9 V
I_{mpp}	0,57 A	0,57 A	0,57 A
V_{oc}	20,8 V	22,0 V	23,1 V
I_{sc}	0,64 A	0,63 A	0,62 A
Coef. Temper.	- 0,50 %/°C	- 0,46 %/°C	- 0,42 %/°C
Área módulo	8,26 %	8,87 %	9,48 %

11.2.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P

El mismo procedimiento se ha llevado a cabo con el módulo fotovoltaico MS-30P. Para ello, en la Figura 41 se muestran los valores añadidos en el software PV-Syst, especificados anteriormente en la Tabla 3.

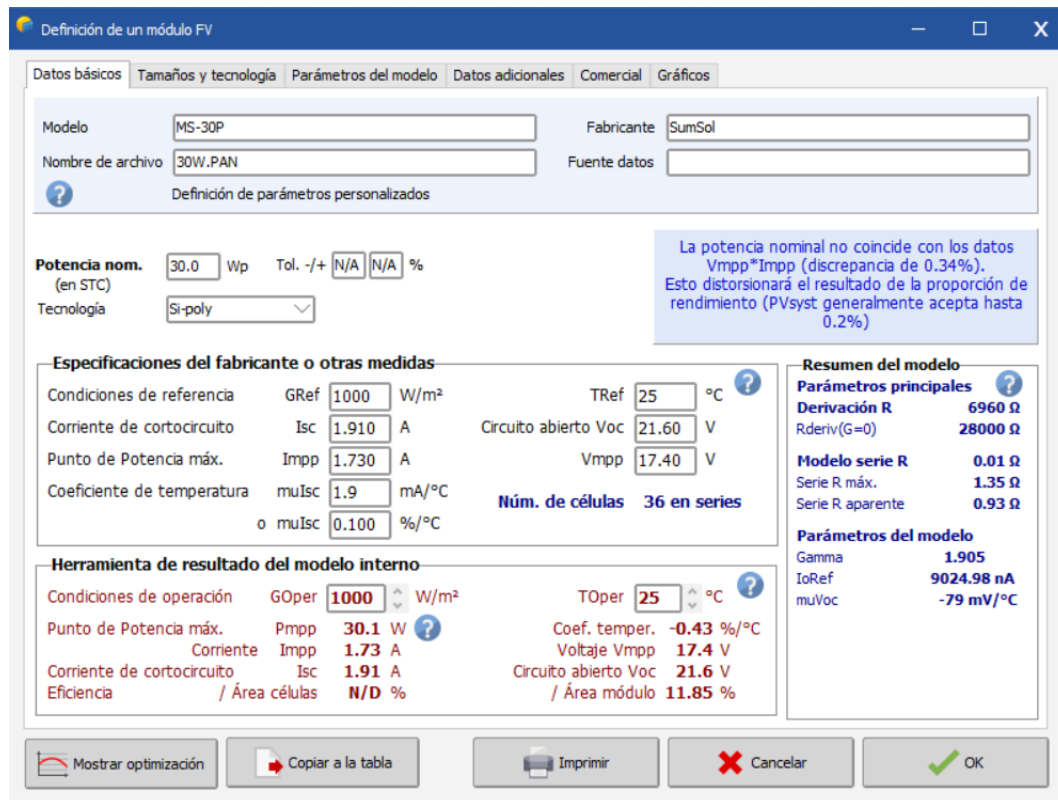


Figura 41. Datos introducidos en el software PV-Syst para el módulo MS-30P.

- Variación de irradiancia

En este caso, también se han analizado las curvas de corriente-voltaje y potencia-voltaje para un valor constante de temperatura de 25°C y una irradiancia incidente de 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² y 200 W/m². Estas curvas se muestran en la Figura 42 (curvas I-V) y en la Figura 43 (curva P-V).

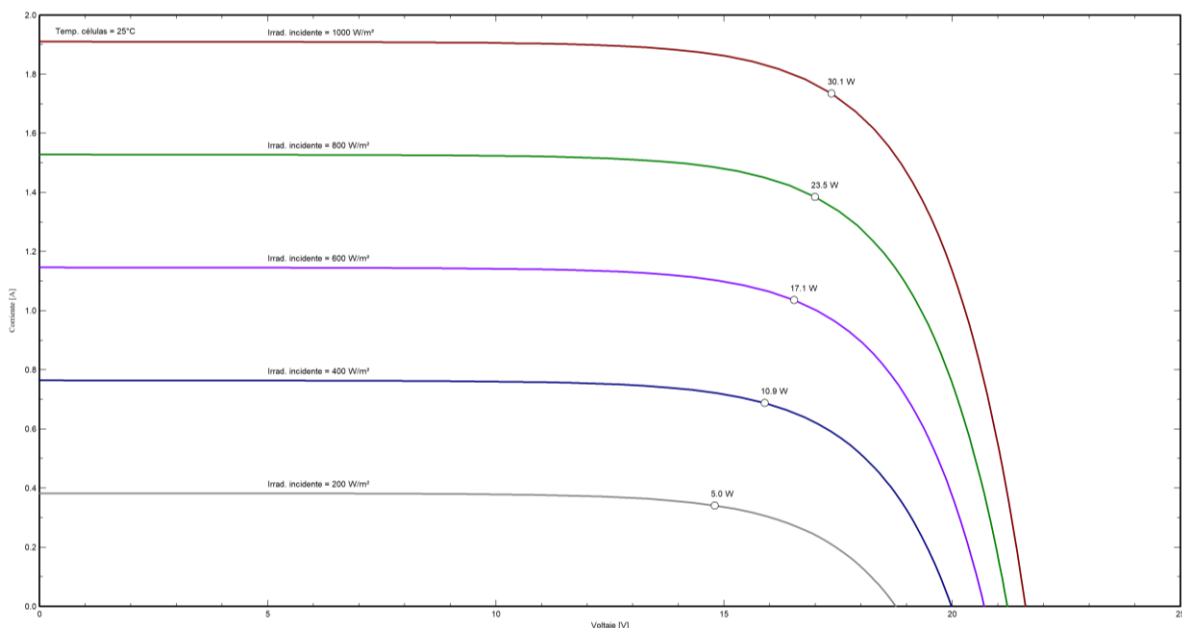


Figura 42. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.

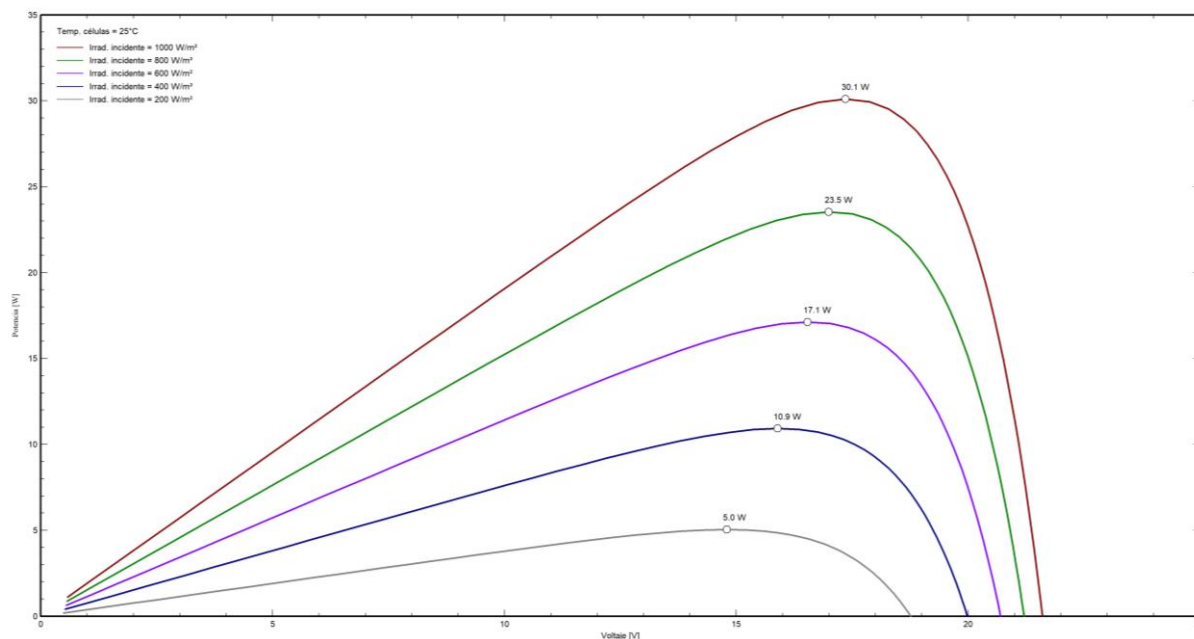


Figura 43. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.

Los valores de las curvas características de la Figura 42 y la Figura 43 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia.

MS-30P T = 25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
P_{mpp}	30,1 W	23,5 W	17,1 W	10,9 W	5,0 W
V_{mpp}	17,4 V	17,0 V	16,5 V	15,9 V	14,8 V
I_{mpp}	1,73 A	1,38 A	1,04 A	0,69 A	0,34 A
V_{oc}	21,6 V	21,2 V	20,7 V	20,0 V	18,8 V
I_{sc}	1,91 A	1,53 A	1,15 A	0,76 A	0,38 A
Coef. Temper.	- 0,43 %/°C	- 0,45 %/°C	- 0,48 %/°C	- 0,51 %/°C	- 0,58 %/°C
Área módulo	11,85 %	11,58 %	11,23 %	10,75 %	9,92 %

- Variación de temperatura

En cuanto a la variación de la temperatura del panel, se han analizado las curvas I-V (Figura 44) y las curvas P-V (Figura 45) para un valor de irradiancia incidente constante de 1000W/m² y unos valores de temperatura de 40°C, 25°C y 10°C.

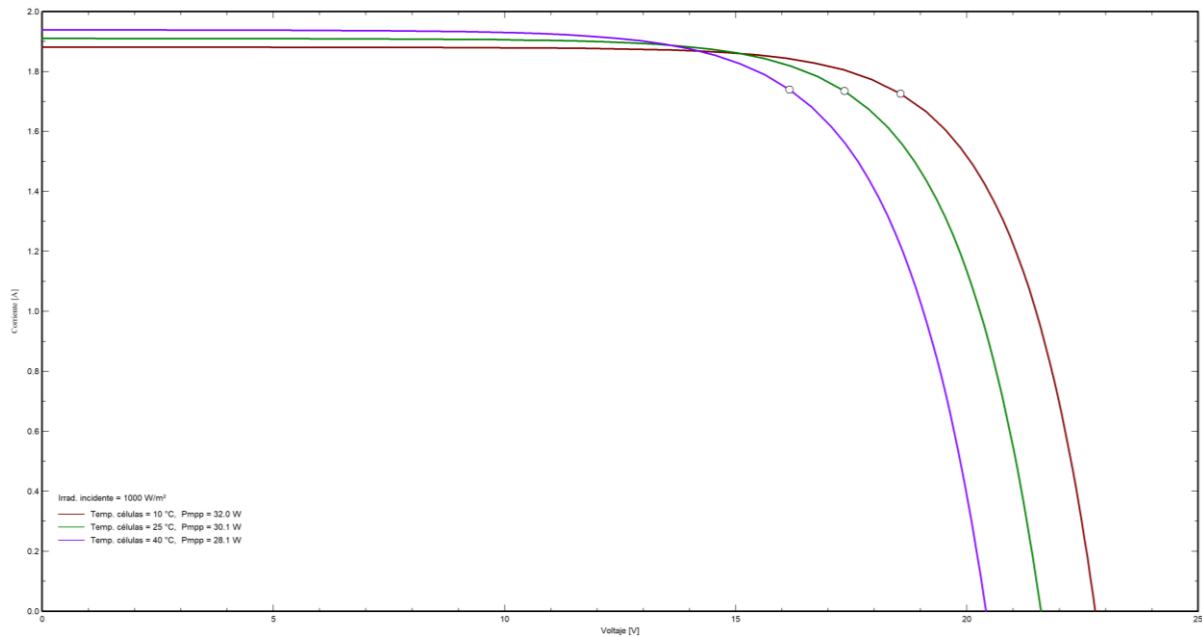


Figura 44. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.

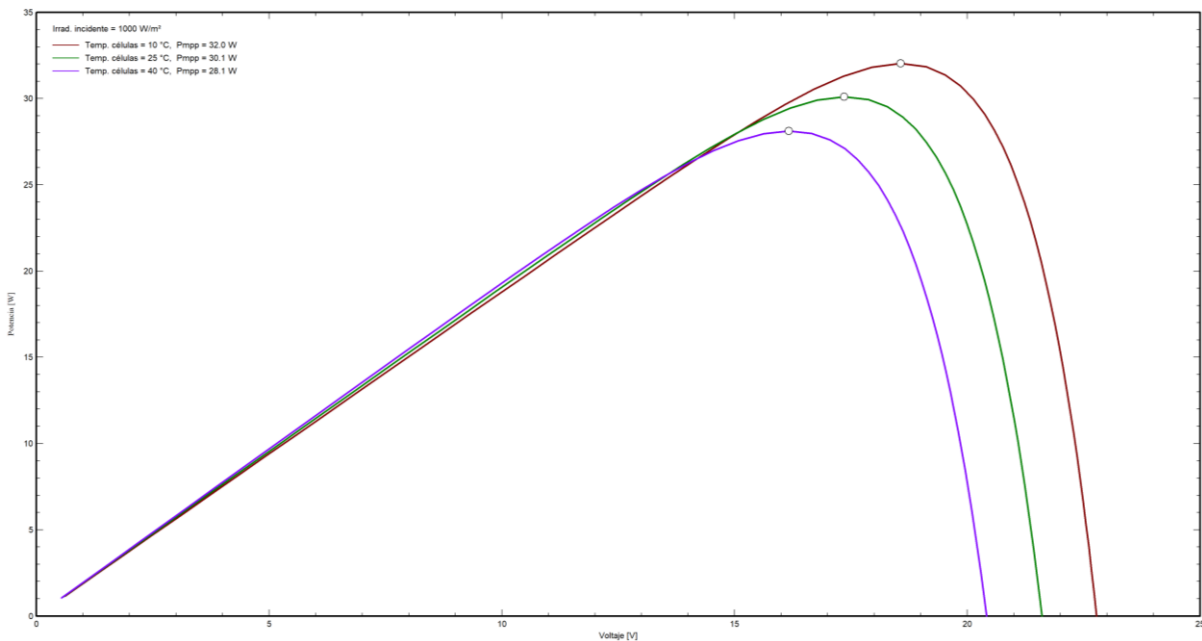


Figura 45. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el software PV-Syst.

Para este caso también, se ha añadido la Tabla 7 con el fin de mostrar los valores de los parámetros característicos que proporciona el software PV-Syst.

Tabla 7. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de temperatura.

MS-30P 1000 W/m ²	Temperatura del módulo		
	40 °C	25 °C	10 °C
P_{mpp}	28,1 W	30,1 W	32,0 W
V_{mpp}	16,2 V	17,4 V	18,6 V
I_{mpp}	1,74 A	1,73 A	1,73 A
V_{oc}	20,4 V	21,6 V	22,8 V
I_{sc}	1,94 A	1,91 A	1,88 A
Coef. Temper.	- 048 %/°C	- 0,43 %/°C	- 0,40 %/°C
Área módulo	11,07 %	11,85 %	12,61 %

11.2.3. Conclusiones

Como se puede observar en ambos casos analizados, cuanto más irradiancia incidente llegue al panel, mayor es el punto de máxima potencia o MPPT, aumentando tanto el valor de la corriente en este punto (I_{mpp}) como la del voltaje (V_{mpp}). Lo mismo ocurre con los valores de corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto.

Por otro lado, en cuanto a la variación de la temperatura del panel, se puede observar que es favorable para el módulo mantener una temperatura mayormente baja, ya que al calentar el panel la potencia generada disminuye. Sin embargo, en este caso el parámetro más alterado es el V_{mpp} mientras que la corriente para el punto de máximo potencia varía de forma mínima. En el caso de la corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto ocurre lo mismo que con la potencia generada, se reducen al aumentar la temperatura del panel.

Por último, comparando los valores de los parámetros característicos especificados por los fabricantes y los sugeridos por el software PV-Syst, se puede observar que la variación entre ambos casos es mínima. Esto se puede observar en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Comparación entre los valores de los parámetros característicos ofrecidos por los fabricantes y los obtenidos mediante el software PV-Syst.

1000 W/m ² T _{panel} =25°C	Et-M53610		MS-30P	
	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst
P_{mpp}	10 W	10,2 W	30 W	30,1 W
V_{mpp}	17,82 V	17,7 V	17,40 V	17,4 V
I_{mpp}	0,57 A	0,57 A	1,73 A	1,73 A
V_{oc}	21,97 V	22,0 V	21,60 V	21,6 V
I_{sc}	0,63 A	0,63 A	1,91 A	1,91 A

11.3. Simulación Matlab

Para llevar a cabo la simulación en el programa MATLAB/SIMULINK se ha utilizado el bloque *PV array*, el cual permite modelar un módulo fotovoltaico o un conjunto de módulos ya preestablecidos por el Modelo de Asesoría de Sistemas del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), así como los módulos fotovoltaicos que el usuario defina. El bloque (*Figura 46*) utiliza una fuente de corriente generada por acción de la radiación (I_L), un diodo, una resistencia en serie (R_s) y una resistencia de derivación (R_{sh}), como se ha definido anteriormente en la *Figura 10*, para representar las características I-V y P-V dependientes de la irradiación y la temperatura del panel.

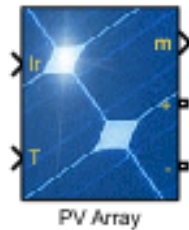


Figura 46. Bloque PV Array del programa Matlab/Simulink.

Como se puede observar, el bloque tiene dos entradas que sirven para definir la irradiación y la temperatura del panel, una salida que ofrece los valores de corriente y tensión generadas por el módulo y la corriente del diodo, y los dos terminales del panel. De esta manera, añadiendo una resistencia al sistema, dos bloques constantes como entrada, un bloque *Bus Selector* y tres bloques *Display*, se puede observar como varían los valores de los parámetros de salida a la hora de crear la curva de corriente y voltaje.

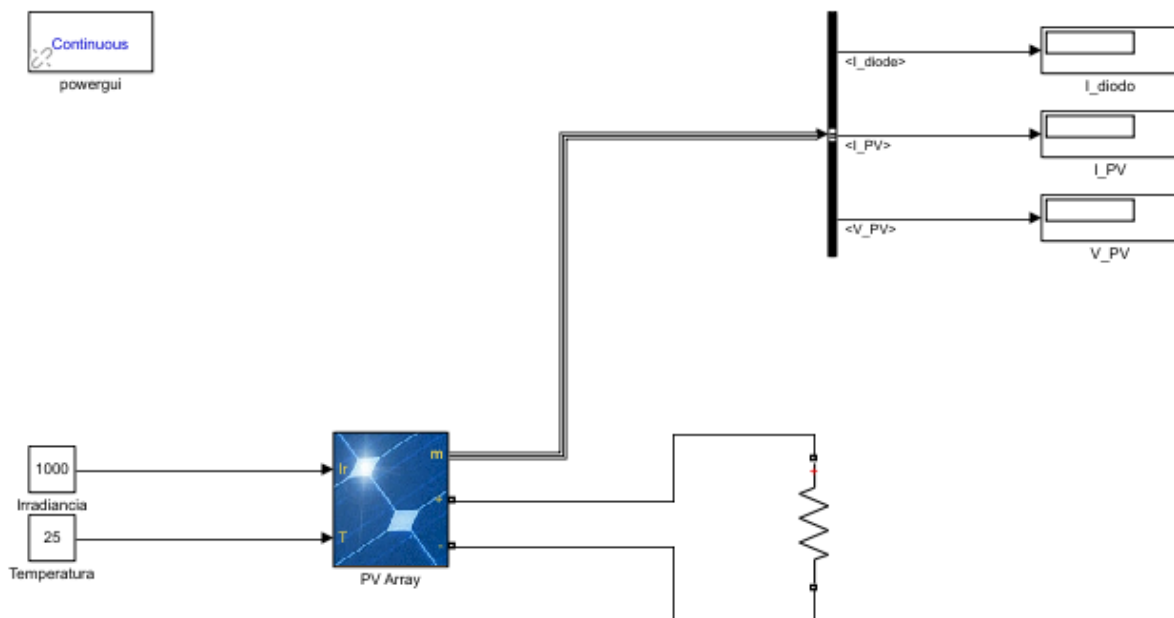


Figura 47. Montaje del sistema en el programa Matlab/Simulink.

11.3.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610

El primer paso a seguir para simular el módulo solar ET-M53610 es añadir los valores de los parámetros característicos al bloque PV Array, como muestra la *Figura 48*.

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module: **User-defined**

Maximum Power (W) Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V) Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V) Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

OK Cancel Help Apply

Figura 48. Valores introducidos en el programa Matlab/SIMULINK para el módulo Et-M53610.

De esta manera, añadiendo distintos valores de irradiancia y temperatura del panel a los bloques de entrada de la *Figura 47* y simulando el sistema, se puede observar como varían las curvas I-V y P-V frente a dichos parámetros.

- Variación de irradiancia

Para analizar la variación de irradiancia se han simulado las curvas características para unos valores de 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² y 200 W/m² manteniendo la temperatura del panel constante en 25°C, igual que en la simulación de PV-Syst. Estos resultados se muestran en la *Figura 49*, *Figura 50* y *Tabla 9*, siendo la curva roja la de las condiciones estándares de medida.

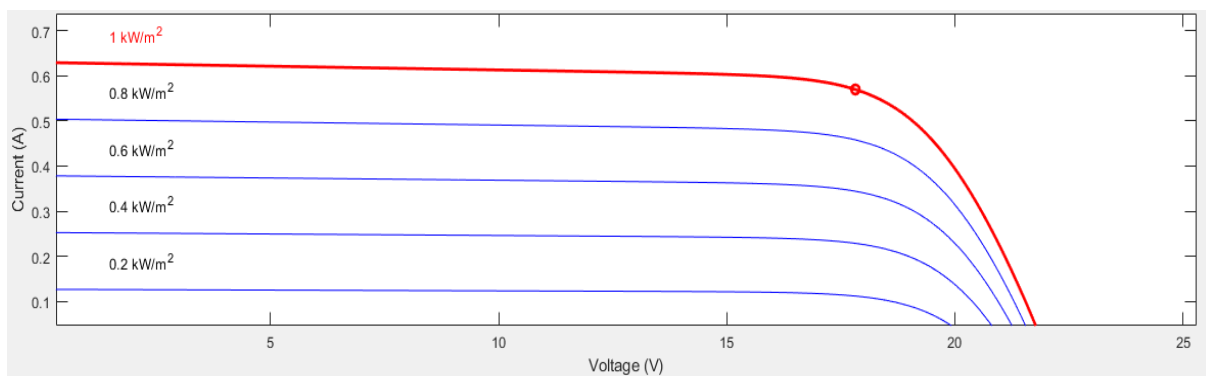


Figura 49. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.

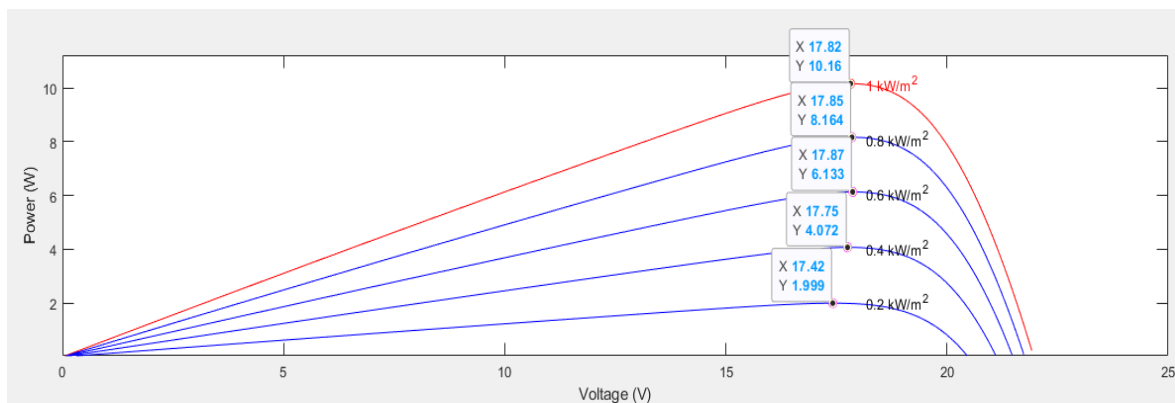


Figura 50. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.

Tabla 9. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de irradiancia.

ET-M53610 T=25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
P_{mpp}	10,16 W	8,164 W	6,133 W	4,072 W	1,999 W
V_{mpp}	17,82 V	17,85 V	17,87 V	17,75 V	17,42 V
I_{mpp}	0,57 A	0,45 A	0,34 A	0,229 A	0,114 A
V_{oc}	21,92 V	21,73 V	21,47 V	21,10 V	20,47 V
I_{sc}	0,63 A	0,504 A	0,379 A	0,253 A	0,126 A

- Variación de temperatura

Por otro lado, para analizar la variación de la temperatura del panel, se ha mantenido constante el valor de irradiancia incidente constante en 1000W/m² y se ha simulado el sistema para los valores de temperatura de 40°C, 25°C y 10°C. En este caso, las curvas características se muestran en la Figura 51 para las curvas I-V y en la Figura 52 para las curvas P-V.

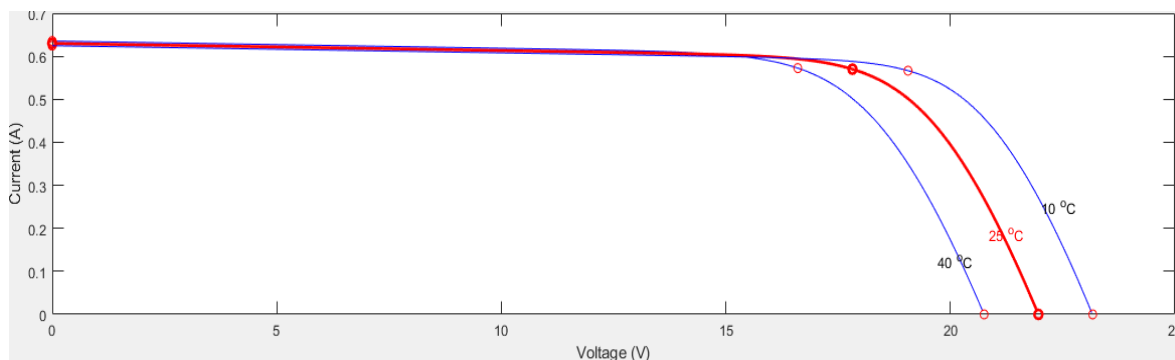


Figura 51. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.

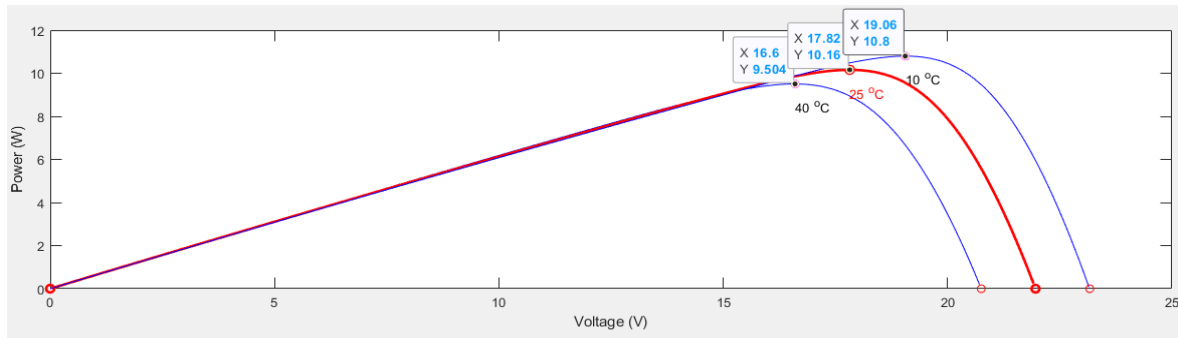


Figura 52. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo ET-M53610 mediante el programa Matlab/Simulink.

De la misma manera, para mostrar los valores de los parámetros característicos que aparecen en los gráficos, se ha añadido la *Tabla 10*.

Tabla 10. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de temperatura.

ET-M53610 1000 W/m ²	Temperatura del módulo		
	40 °C	25 °C	10 °C
P_{mpp}	9,504 W	10,16 W	10,8 W
V_{mpp}	16,6 V	17,82 V	19,06 V
I_{mpp}	0,572 A	0,57 A	0,566 A
V_{oc}	20,75 V	21,96 V	23,17 V
I_{sc}	0,636 A	0,63 A	0,624 A

11.3.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P

Se ha llevado el mismo procedimiento para simular el módulo fotovoltaico MS-30P. El primer paso ha sido introducir los valores de los parámetros característicos en el bloque PV array como muestra la *Figura 53*.

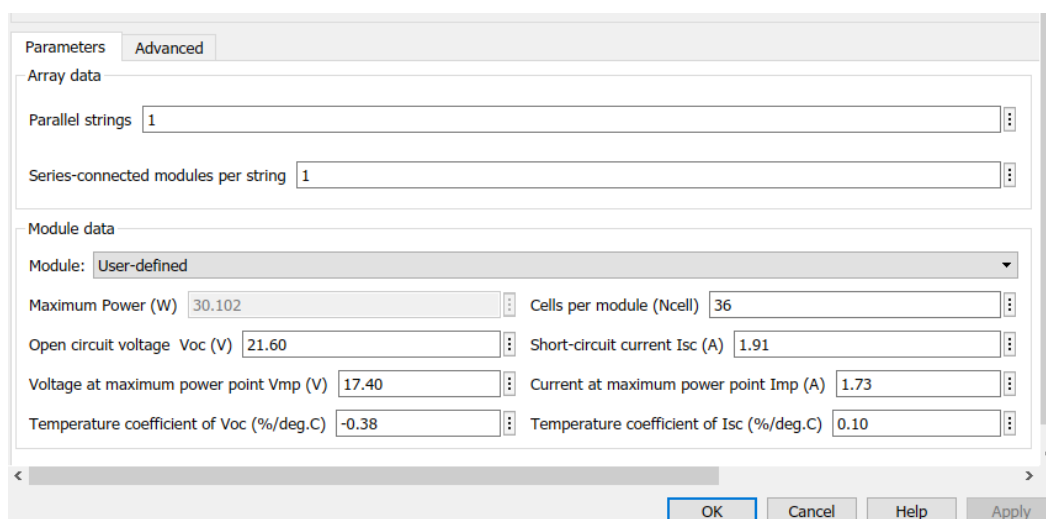


Figura 53. Valores introducidos en el programa Matlab/SIMULINK para el módulo MS-30P.

Después, se ha analizado las curvas características frente a la variación de irradiancia (valores de 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² y 200 W/m² manteniendo la temperatura del panel constante en 25°C) y la variación de temperatura (valores de 40°C, 25°C y 10°C manteniendo la irradiancia incidente constante en 1000W/m²). Estos resultados se muestran en la *Figura 54* y en la *Figura 55* para la variación de irradiancia y en la *Figura 56* y la *Figura 57* para la variación de temperatura.

- **Variación de irradiancia**

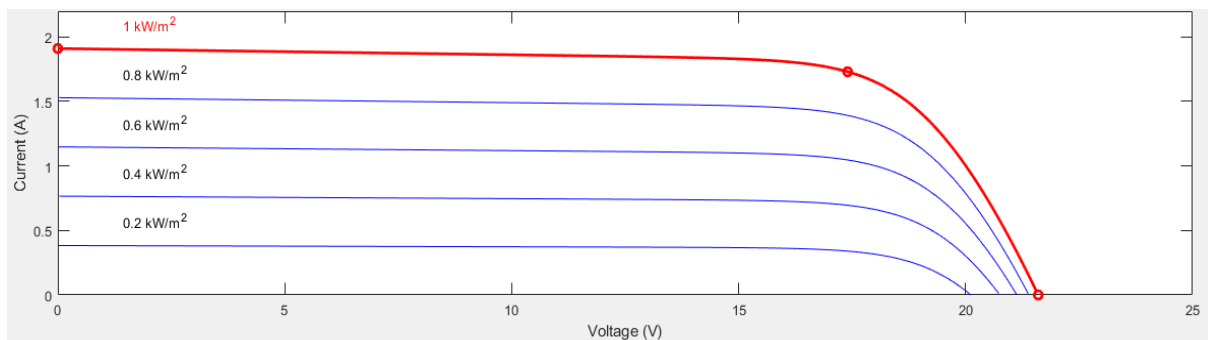


Figura 54. Curva característica I-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.

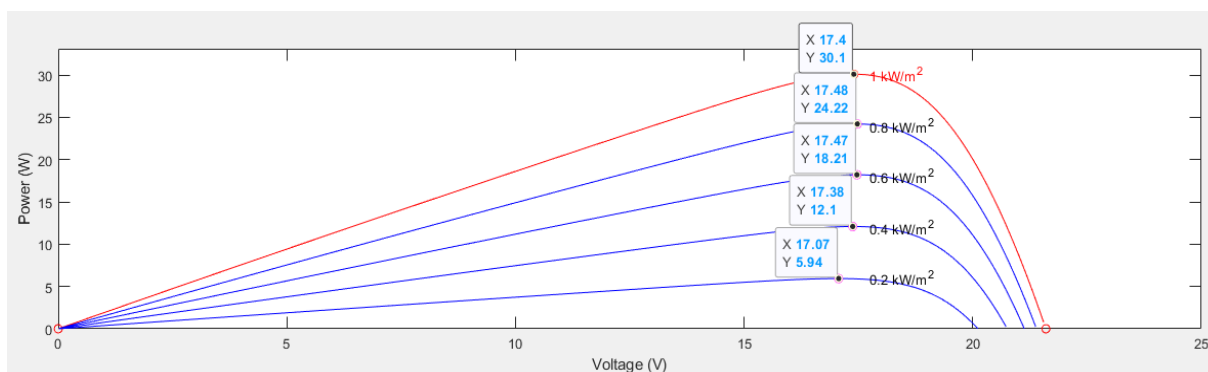


Figura 55. Curva característica P-V frente a distintos valores de irradiancia para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.

Tabla 11. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de irradiancia.

MS-30P T=25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
P_{mpp}	30,1 W	24,22 W	18,21 W	12,1 W	5,94 W
V_{mpp}	17,4 V	17,48 V	17,47 V	17,38 V	17,07 V
I_{mpp}	1,729 A	1,385 A	1,042 A	0,696 A	0,348 A
V_{oc}	21,6 V	21,38 V	21,13 V	20,73 V	20,11 V
I_{sc}	1,91 A	1,529 A	1,148 A	0,7659 A	0,3833 A

- Variación de temperatura

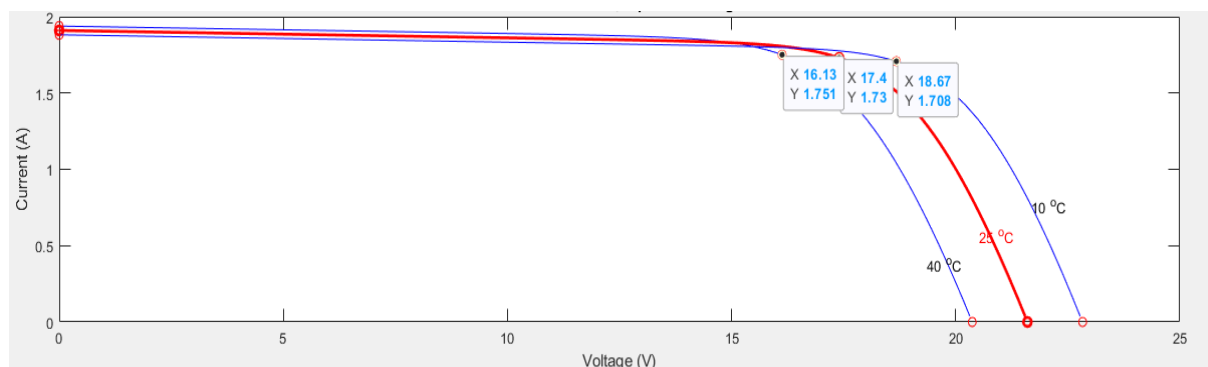


Figura 56. Curva característica I-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.

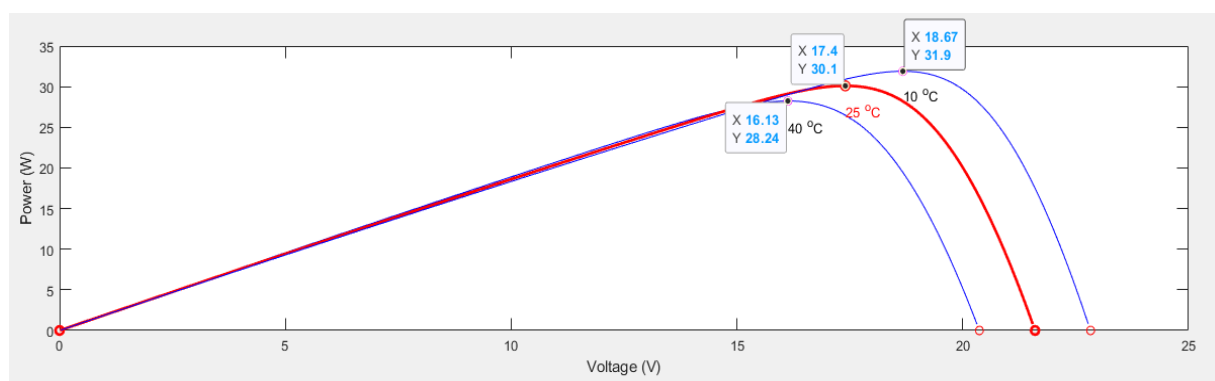


Figura 57. Curva característica P-V frente a distintos valores de temperatura para el módulo MS-30P mediante el programa Matlab/Simulink.

Tabla 12. Valores de los parámetros característicos obtenidos en la simulación del módulo Et-M53610 en el programa Matlab/SIMULINK frente a distintos valores de temperatura.

MS-30P 1000 W/m ²	Temperatura del módulo		
	40 °C	25 °C	10 °C
P_{mpp}	28,24 W	30,1 W	31,9 W
V_{mpp}	16,13 V	17,4 V	18,67 V
I_{mpp}	1,751 A	1,73 A	1,708 A
V_{oc}	20,37 V	21,6 V	22,83 V
I_{sc}	1,939 A	1,91 A	1,881 A

11.3.3. Conclusiones

Como se puede observar en la *Tabla 9* y en la *Tabla 11*, se vuelve a confirmar que a mayor irradiancia incidente mayor potencia genera el panel, debido principalmente a la variación que se da en el valor de la corriente de cortocircuito. Por otro lado, en cuanto a la variación de la temperatura del panel, la *Tabla 10* y la *Tabla 12* muestran que el calentamiento del panel es perjudicial para su funcionamiento, obteniendo el mayor valor de potencia generada en el caso de menor temperatura. Igualmente, en dichas tablas se puede observar que, al variar la temperatura del módulo, el parámetro característico afectado es el voltaje de circuito abierto, manteniendo la corriente de cortocircuito prácticamente constante.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en la simulación en PV-Syst. Sin embargo, para comparar los valores obtenidos con ambos programas se han rellenado la *Tabla 13* y la *Tabla 14*.

Tabla 13. Comparación de los valores obtenidos en la simulación de Matlab/SIMULINK y PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia para los módulos Et-M53610 y MS-30P.

Variación de irradiancia T=25°C		ET-M53610				
		P _{mpp}	V _{mpp}	I _{mpp}	V _{oc}	I _{sc}
1000 W/m ²	PV-Syst	10,2 W	17,7 V	0,57 A	22,0 V	0,63 A
	Matlab	10,16 W	17,82 V	0,57 A	21,92 V	0,63 A
800 W/m ²	PV-Syst	7,9 W	17,4 V	0,46 A	21,6 V	0,50 A
	Matlab	8,164 W	17,85 V	0,45 A	21,73 V	0,504 A
600 W/m ²	PV-Syst	5,8 W	16,9 V	0,34 A	21,1 V	0,38 A
	Matlab	6,133 W	17, 87 V	0,34 A	21,47 V	0,379 A
400 W/m ²	PV-Syst	3,7 W	16,3 V	0,23 A	20,4 V	0,25 A
	Matlab	4,072 W	17,75 V	0,229 A	21,10 V	0,253 A
200 W/m ²	PV-Syst	1,7 W	15,2 V	0,11 A	19,1 V	0,13 A
	Matlab	1,999 W	17,42 V	0,114 A	20,47 V	0,126 A
Variación de irradiancia T=25°C		MS-30P				
		P _{mpp}	V _{mpp}	I _{mpp}	V _{oc}	I _{sc}
1000 W/m ²	PV-Syst	30,1 W	17,4 V	1,73 A	21,6 V	1,91 A
	Matlab	30,1 W	17,4 V	1,729 A	21,6 V	1,91 A
800 W/m ²	PV-Syst	23,5 W	17,0 V	1,38 A	21,2 V	1,53 A
	Matlab	24,22 W	17,48 V	1,385 A	21,38 V	1,529 A
600 W/m ²	PV-Syst	17,1 W	16,5 V	1,04 A	20,7 V	1,15 A
	Matlab	18,21 W	17,47 V	1,042 A	21,13 V	1,148 A
400 W/m ²	PV-Syst	10,9 W	15,9 V	0,69 A	20,0 V	0,76 A
	Matlab	12,1 W	17,38 V	0,696 A	20,73 V	0,7659 A
200 W/m ²	PV-Syst	5,0 W	14,8 V	0,34 A	18,8 V	0,38 A
	Matlab	5,94 W	17,07 V	0,348 A	20,11 V	0,3833 A

Tabla 14. Comparación de los valores obtenidos en la simulación de Matlab/SIMULINK y PV-Syst frente a distintos valores de temperatura para los módulos Et-M53610 y MS-30P.

Variación de temperatura 1000 W/m ²		MS-30P				
		P _{mpp}	V _{mpp}	I _{mpp}	V _{oc}	I _{sc}
40 °C	PV-Syst	9,5 W	16,5 V	0,57 A	20,8 V	0,64 A
	Matlab	9,504 W	16,6 V	0,572 A	20,75 V	0,636 A
25 °C	PV-Syst	10,2 W	17,7 V	0,57 A	22,0 V	0,63 A
	Matlab	10,16 W	17,82 V	0,57 A	21,96 V	0,63 A
10 °C	PV-Syst	10,9 W	18,9 V	0,57 A	23,1 V	0,62 A
	Matlab	10,8 W	19,06 V	0,566 A	23,17 V	0,624 A
Variación de temperatura 1000 W/m ²		ET-M53610				
		P _{mpp}	V _{mpp}	I _{mpp}	V _{oc}	I _{sc}
40 °C	PV-Syst	28,1 W	16,2 V	1,74 A	20,4 V	1,94 A
	Matlab	28,24 W	16,13 V	1,751 A	20,37 V	1,939 A
25 °C	PV-Syst	30,1 W	17,4 V	1,73 A	21,6 V	1,91 A
	Matlab	30,1 W	17,4 V	1,73 A	21,6 V	1,91 A
10 °C	PV-Syst	32,0 W	18,6 V	1,73 A	22,8 V	1,88 A
	Matlab	31,9 W	18,67 V	1,708 A	22,83 V	1,881 A

En el caso de la variación de la irradiancia, se puede observar que en ambas simulaciones los valores de corriente obtenidos se asemejan, tanto para la corriente de cortocircuito como la del punto máximo de potencia. No obstante, en el caso del voltaje de circuito abierto y del voltaje de máxima potencia, el software PV-Syst reduce más los valores que el programa Matlab/SIMULINK, obteniendo los valores de potencia máxima unas decimales menor. Esta alteración es mínima, causada debido a los diferentes algoritmos introducidos en los programas, ya que el software PV-Syst, al ser un software específico para el diseño de sistemas solares, tiene un código más concreto que el de un bloque del programa Matlab/SIMULINK.

Por último, en el caso de la variación de la temperatura, tanto los valores de corriente de cortocircuito y corrientes de máxima potencia, como los de voltaje de circuito abierto y voltajes de máxima potencia, son similares para ambos programas.

11.4. Simulación emulador

Una vez habiendo obtenido los valores de las curvas características de ambos paneles, tanto para la variación de irradiancia como para la de la temperatura del panel, se ha optado por emular dichas situaciones mediante una fuente de corriente continua programable para comprobar así el funcionamiento correcto del dispositivo electrónico propuesto. En este caso, la fuente programable seleccionada ha sido una fuente de alimentación CC de la serie APS DCP, en específico el modelo DCP150-8, la cual se muestra en la *Figura 58*. Este equipo en concreto tiene una función que lo hace trabajar como un módulo fotovoltaico, pudiendo llegar a generar 1200 W de potencia y valores de hasta 150V y 8 A.



Figura 58. Fuente programable DCP150-8 de la empresa Adaptive Power Systems.

En cuanto a su funcionamiento, consta de una entrada de tarjeta SD, mediante la cual se añaden los valores de los parámetros característicos de los paneles analizados para un valor de irradiancia y temperatura en concreto y hace que el emulador funcione como tal. En este caso, los valores añadidos han sido los obtenidos mediante el software PV-Syst.

De esta manera, se ha conectado la fuente programable trabajando como módulo fotovoltaico y un reóstato con función de carga al dispositivo electrónico planteado, como se ha especificado en la *Figura 34*, obteniendo así los valores de corriente y voltaje emulados. Tras graficar estos datos mediante el programa Microsoft Excel se han añadido a los gráficos las curvas obtenidas por el software PV-Syst (ya que este es más específico), para facilitar la comparación entre ambos resultados.

11.4.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610

A la hora de emular los valores característicos del módulo ET-M53610 de 10W se ha seleccionado un reóstato con una resistencia de hasta 450Ω , obteniendo los valores de corriente, voltaje y potencia en las condiciones estándares de medida, frente a distintas irradiancias y frente a diferentes temperaturas. Todos estos valores se encuentran en el ANEXO 3.

- Condiciones estándares de medida (STC)

La primera medición que se ha llevado a cabo ha sido la de condiciones estándares de medida o STC, es decir, una irradiancia incidente de 1000W/m^2 y una temperatura de panel de 25°C . En la *Figura 59* se muestran los puntos de la curvas I-V (color rojo) y de la curva P-V (color azul) emulados mediante la fuente programable. Además, se han añadido las curvas ideales que facilitan el software PV-Syst y el punto de máxima potencia que este marca.

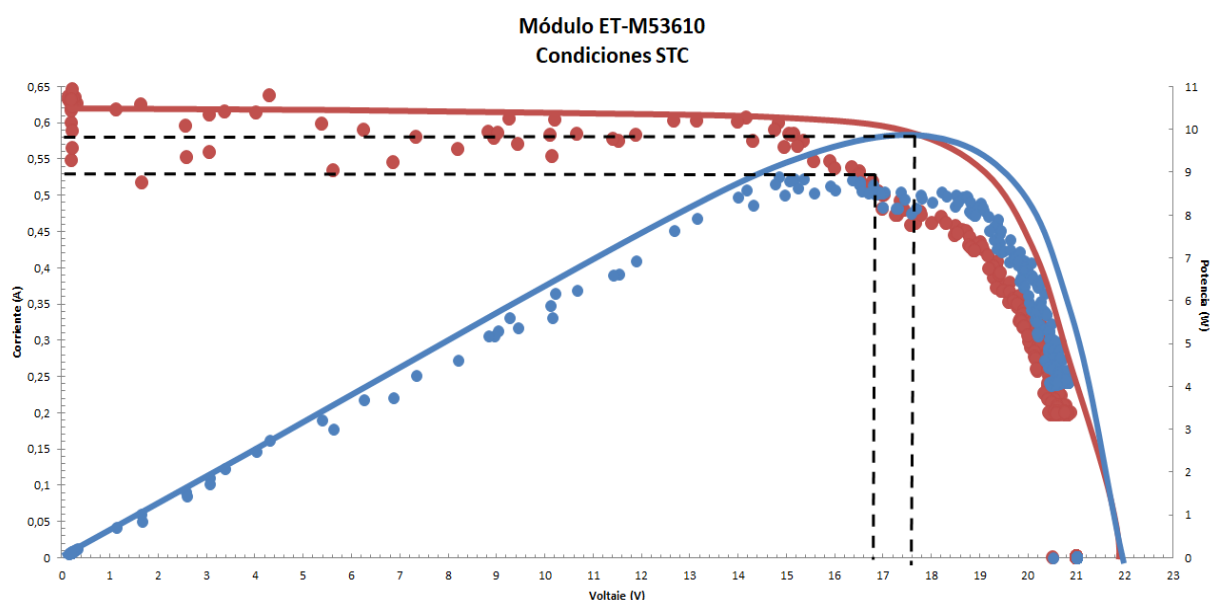


Figura 59. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para 1000W/m^2 y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).

Como se puede observar, los valores medidos por el dispositivo se asemejan de manera significativa a los teóricos. No obstante, en el caso de punto de máxima potencia se puede apreciar una disminución parcial. Esta variación en los valores de los parámetros característicos se ha reflejado en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst y los obtenidos tras la emulación del panel ET-M53610 para 1000W/m^2 y 25°C .

1000 W/m ² T _{panel} =25°C	ET-M53610		
	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst	Datos emulador
P_{mpp}	10 W	10,2 W	8,96 w
V_{mpp}	17,82 V	17,7 V	16,90 V
I_{mpp}	0,57 A	0,57 A	0,53 A
V_{oc}	21,97 V	22,0 V	21,01 V
I_{sc}	0,63 A	0,63 A	0,62 A

- Variación de irradiancia

Por otro lado, también se han analizado las medidas obtenidas frente a distintos valores de irradiancia incidente. Para ello, se ha emulado el sistema para los valores de 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 , 400 W/m^2 y 200 W/m^2 , manteniendo la temperatura del módulo constante en 25°C . El procedimiento ha sido el mismo: graficar los valores obtenidos en la emulación y añadir las curvas simuladas por el software PV-Syst. De esta manera, las curvas características I-V se muestran en la *Figura 60* y las curvas P-V en la *Figura 61*.

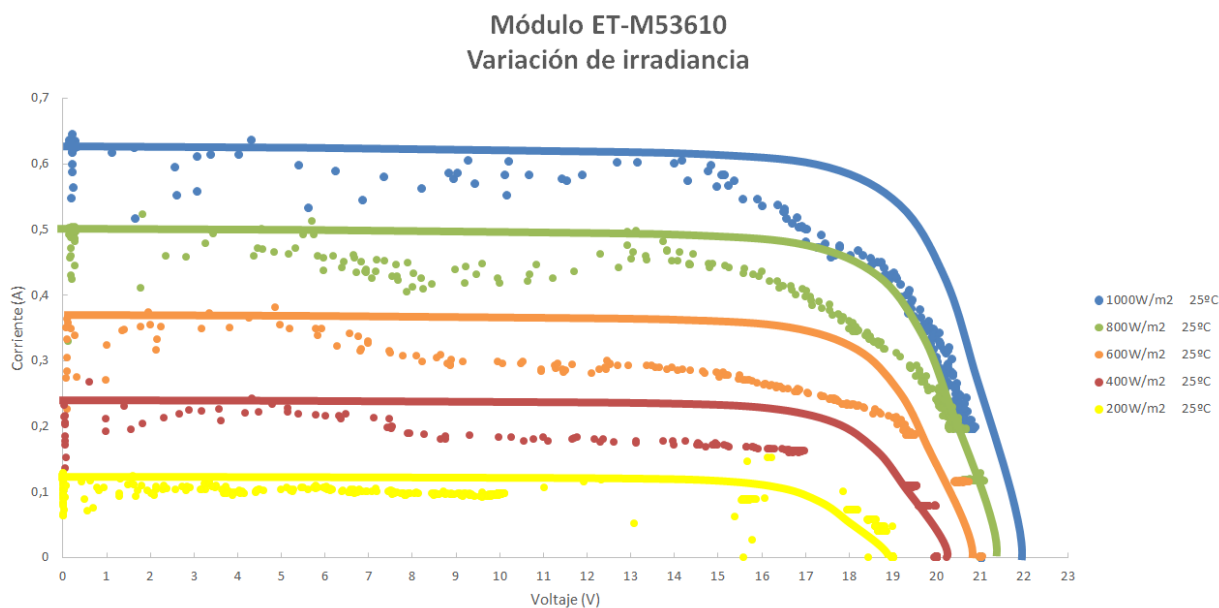


Figura 60. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de irradiancia.

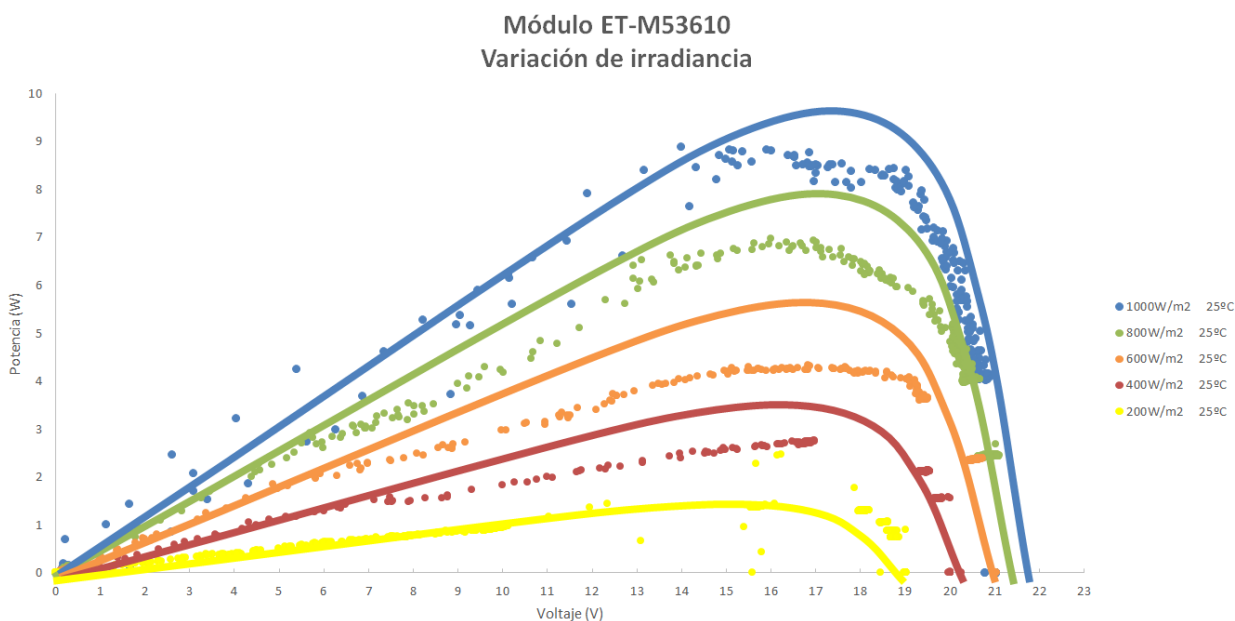


Figura 61. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de irradiancia.

- Variación de temperatura

Por último, se ha llevado a cabo la emulación del módulo ET-M53610 para distintas temperaturas. Para ello, se ha mantenido la irradiancia constante en 1000 W/m^2 y se ha variado la temperatura del módulo entre 40°C , 25°C y 10°C . En este caso, las curvas I-V se muestran en la Figura 62 y las curvas P-V en la Figura 63.

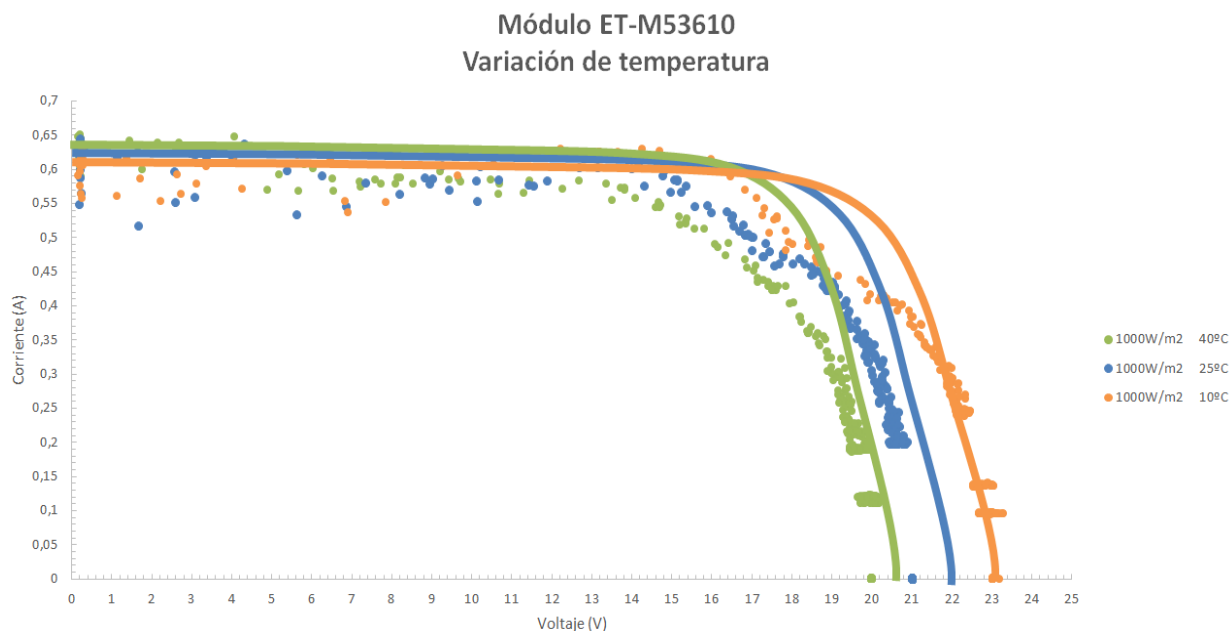


Figura 62. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de temperatura.

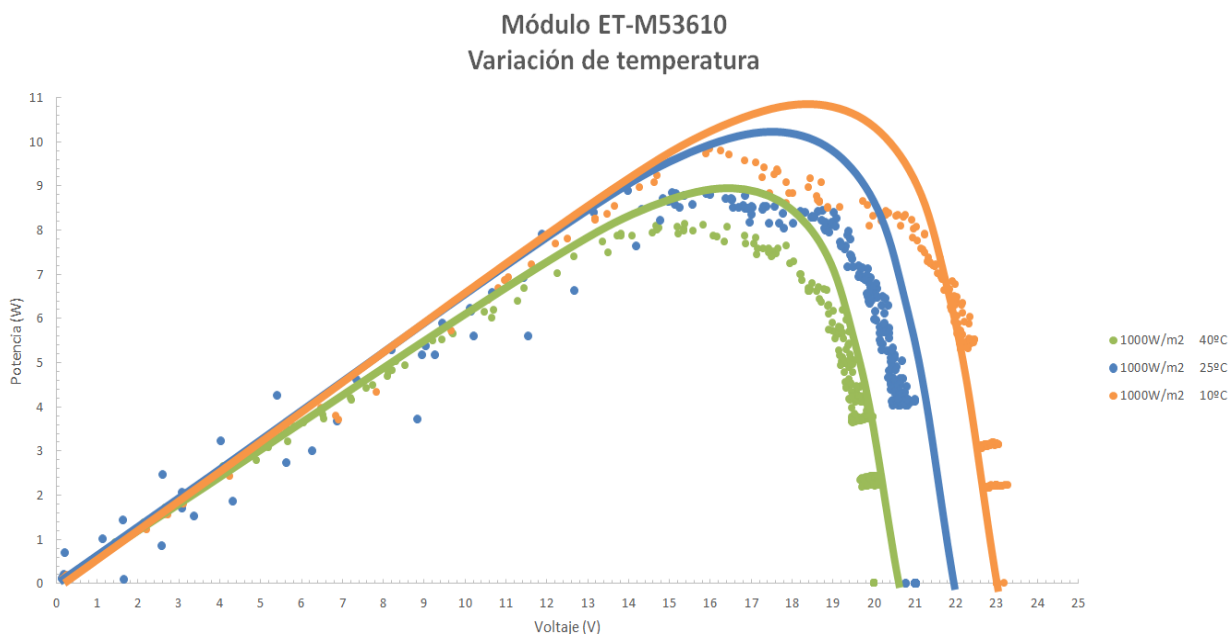


Figura 63. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para distintos valores de temperatura.

11.4.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P

El mismo procedimiento se ha llevado a cabo con el módulo MS-30P, pero conectando un reóstato con una resistencia de hasta 300Ω. En este caso también se ha emulado el panel para las condiciones estándares de medida, variación de irradiancia y variación de temperatura y se ha comparado con los simulados anteriormente con el software PV-Syst.

- Condiciones estándares de medida (STC)

En el caso de las condiciones estándares de medida, ocurre lo mismo que con el anterior módulo, los puntos medidos mediante la emulación se asemejan a las curvas de PV-Syst. No obstante, el punto de máxima potencia disminuye. Este cambio se puede observar en gráficamente en la *Figura 64* y mediante valores en la *Tabla 16*.

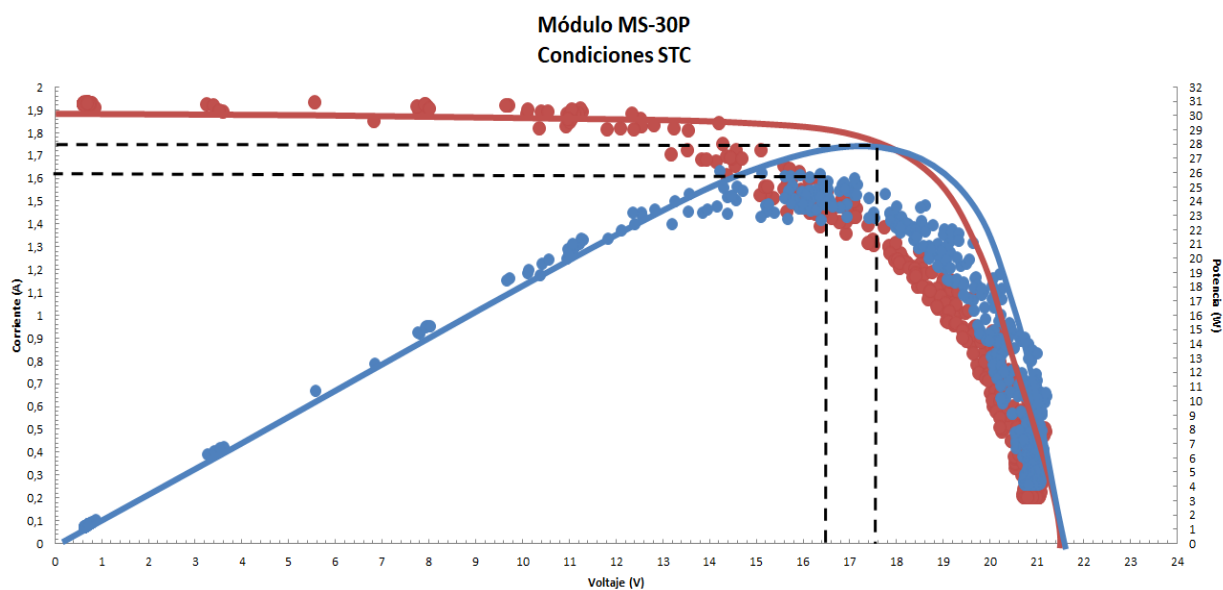


Figura 64. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el MS-30P para 1000W/m² y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).

Tabla 16. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst y los obtenidos tras la emulación del panel ET-M53610 para 1000W/m² y 25°C.

1000 W/m ² T _{panel} =25°C	MS-30P		
	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst	Datos emulador
P_{mpp}	30 W	30,1 W	26,57 W
V_{mpp}	17,40 V	17,4 V	16,5 V
I_{mpp}	1,73 A	1,73 A	1,61 A
V_{oc}	21,60 V	21,6 V	21,2 V
I_{sc}	1,91 A	1,91 A	1,91 A

- Variación de irradiancia

En cuanto a la variación de irradiancia, se han vuelto a analizar los valores de 1000W/m^2 , 800W/m^2 , 600W/m^2 , 400W/m^2 y 200W/m^2 , manteniendo la temperatura del módulo MS-30P constante en 25°C . Estas curvas se muestran en la *Figura 65* para los casos de corriente-voltaje y en la *Figura 66* para las de potencia-voltaje.

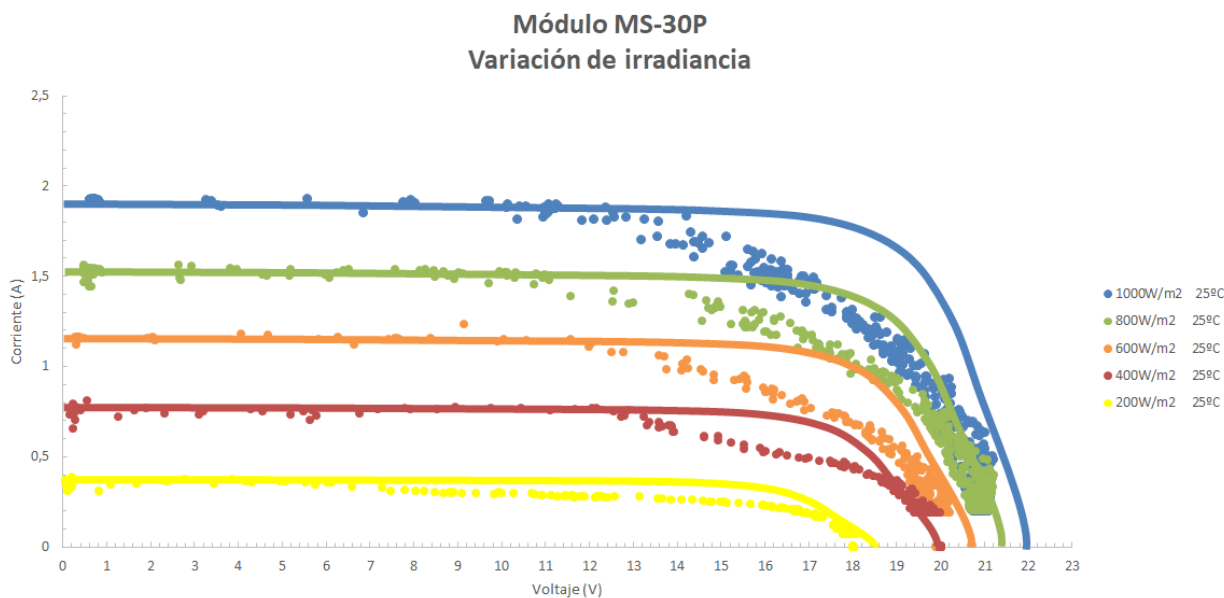


Figura 65. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de irradiancia.

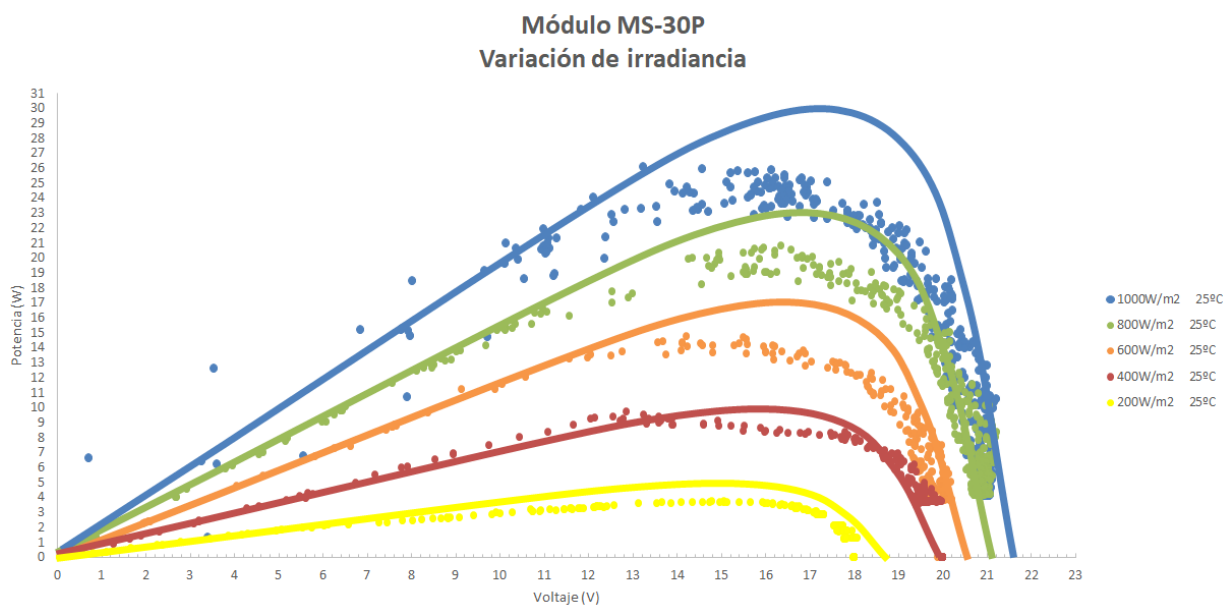


Figura 66. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de irradiancia.

- Variación de temperatura

Por último, se ha llevado a cabo la emulación del módulo MS-30P para las temperaturas de 40°C, 25°C y 10°C, manteniendo la irradiancia constante en 1000 W/m². Esta variación se puede observar en la *Figura 67* (curvas I-V) y en la *Figura 68* (curvas P-V).

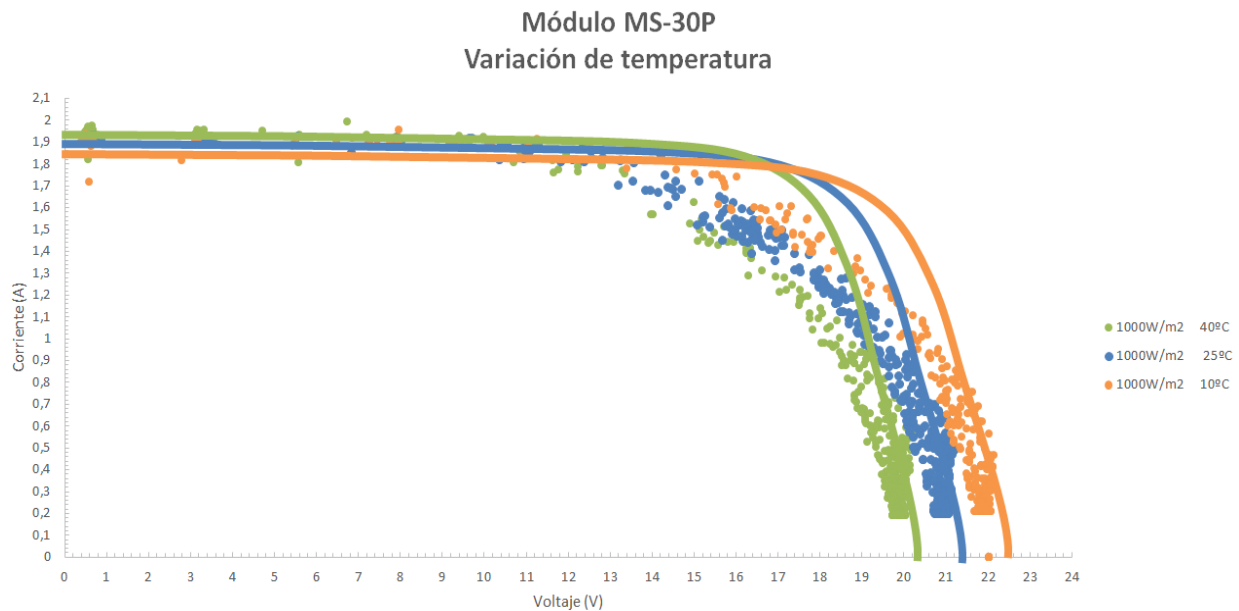


Figura 67. Comparación de curvas I-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de temperatura.

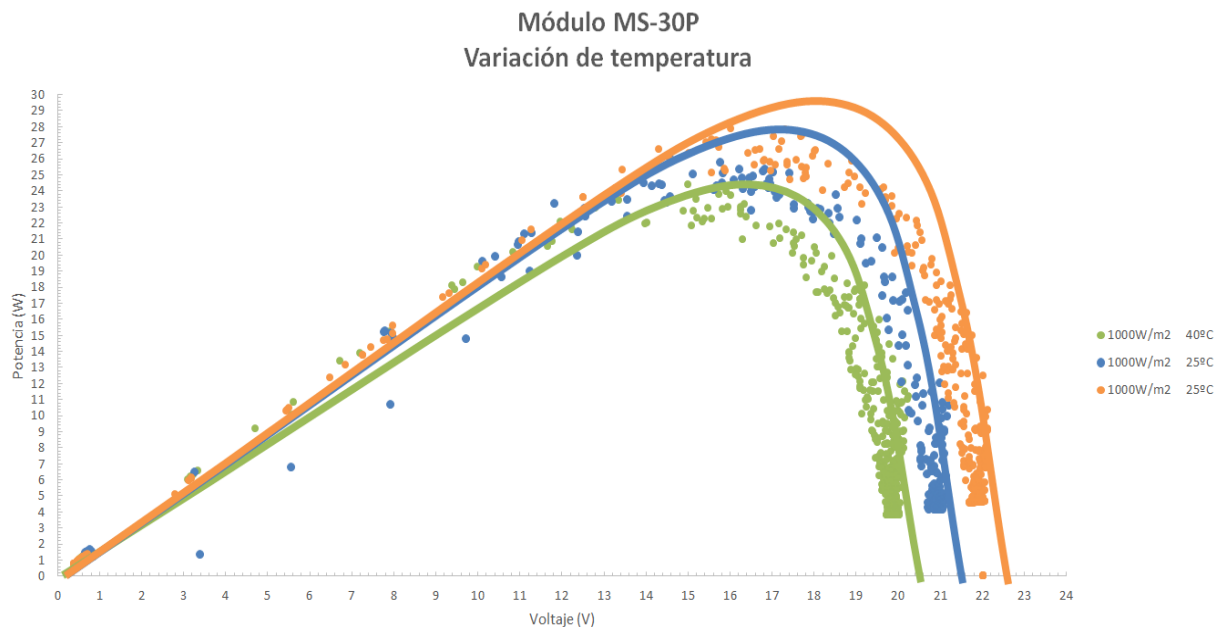


Figura 68. Comparación de curvas P-V obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para distintos valores de temperatura.

11.4.3. Conclusiones

Como se ha observado en todas las medidas, los valores de la corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto del sistema emulado y el teórico de PV-Syst se asemejan significativamente. Sin embargo, al analizar el punto de máxima potencia se observa que este disminuye para las medidas emuladas. No obstante, este fallo no es resultado del mal funcionamiento del dispositivo propuesto, sino de una posible falta de precisión de la fuente programable a la hora de emular los datos, ya que en el momento de tomar las medidas, se pudo observar que los valores que aparecían en la pantalla OLED del dispositivo propuesto coincidían con los valores del Display de la fuente programable.

11.5. Medidas reales

Por último, se han llevado a cabo las medidas reales de los parámetros característicos. Para ello, se han conectado los módulos fotovoltaicos a un potenciómetro o resistencia variable de $10k \Omega$, y estos al dispositivo planteado. Ambas mediciones se han realizado un día soleado (07/09/2020) a la misma hora (aprox. 17h) y desde una terraza situada en un cuarto piso, por eso se estima que el valor de la irradiancia incidente recibida en el panel ha sido $1000W/m^2$ y la temperatura $25^{\circ}C$. Todos los valores de corriente voltaje y potencia obtenidos están disponibles en el ANEXO 3

11.5.1. Módulo solar de 10 W modelo ET-M53610

El primer módulo analizado ha sido el modelo ET-M53610. Tras obtener los valores de corriente, voltaje y potencia, se han graficado los puntos medidos (en rojo los valores I-V y en azul los valores P-V) y se le ha añadido una forma curva a color, para estimar los valores no presentes. Además, se han añadido las curvas especificadas en el software PV-Syst, (en este caso en gris y negro), para las condiciones estándares de medida, facilitando así su comparación. Estos resultados se muestran en la *Figura 69*.

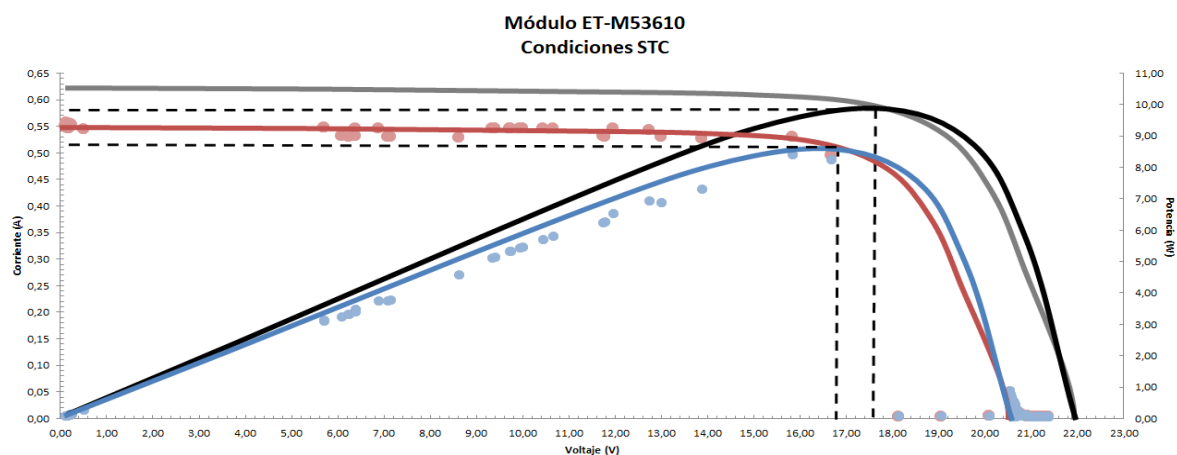


Figura 69. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo ET-M53610 para $1000W/m^2$ y $25^{\circ}C$ (marcando los puntos de máxima potencia).

Como se puede observar, en las medidas llevadas a cabo no se ha podido lograr la cantidad suficiente de valores en la zona del punto de máxima potencia, debido a que el potenciómetro electrónico empleado no pudo posicionar el panel en esos puntos de trabajo. Por ello, se han colocado las plantillas de las curvas ajustándolos a los valores medidos en los puntos de cortocircuito y circuito abierto, pudiendo disminuir la exactitud a la hora de estimar los valores del punto de máxima potencia. Para apreciar mejor la diferencia entre los valores de las mediciones reales y las simuladas en PV-Syst se ha añadido la *Tabla 17*.

Tabla 17. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst, los obtenidos tras la emulación, los obtenidos en Matlab y las mediciones reales para el panel ET-M53610 con $1000\text{W}/\text{m}^2$ y 25°C .

$1000\text{ W}/\text{m}^2$ $T_{\text{panel}}=25^\circ\text{C}$	ET-M53610				
	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst	Datos Matlab	Datos emulador	Datos reales
P_{mpp}	10 W	10,2 W	10,16 W	8,96 w	8,62 W
V_{mpp}	17,82 V	17,7 V	17,82 V	16,90 V	16,9 V
I_{mpp}	0,57 A	0,57 A	0,57 A	0,53 A	0,51 A
V_{oc}	21,97 V	22,0 V	21,92 V	21,01 V	21,0 V
I_{sc}	0,63 A	0,63 A	0,63 A	0,62 A	0,55 A

11.5.2. Módulo solar de 30 W modelo MS-30P

En el caso del módulo fotovoltaico MS-30P, se ha llevado a cabo el mismo procedimiento. En este caso los gráficos de las curvas características se muestran en la *Figura 70* y los valores de los parámetros en la *Tabla 18*.

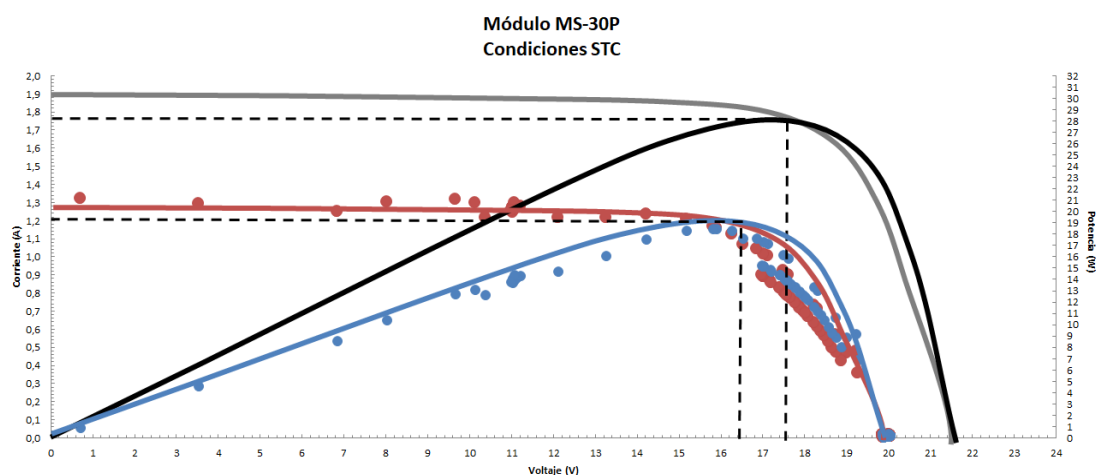


Figura 70. Comparación de curvas obtenidas mediante PV-Syst con las obtenidas emulando el módulo MS-30P para $1000\text{W}/\text{m}^2$ y 25°C (marcando los puntos de máxima potencia).

Tabla 18. Comparación entre los valores facilitados por el fabricante, los simulados por PV-Syst, los obtenidos tras la emulación, los obtenidos en Matlab y las mediciones reales para el panel MS-30P con $1000\text{W}/\text{m}^2$ y 25°C .

$1000\text{ W}/\text{m}^2$ $T_{\text{panel}}=25^\circ\text{C}$	MS-30P				
	Datos del fabricante	Datos de PV-Syst	Datos Matlab	Datos emulador	Datos reales
P_{mpp}	30 W	30,1 W	30,1 W	26,57 W	20,17 W
V_{mpp}	17,40 V	17,4 V	17,4 V	16,5 V	16,5 V
I_{mpp}	1,73 A	1,73 A	1,729 A	1,61 A	1,23 A
V_{oc}	21,60 V	21,6 V	21,6 V	21,2 V	20,0 V
I_{sc}	1,91 A	1,91 A	1,91 A	1,91 A	1,29 A

11.5.3. Conclusiones

Como se puede observar en la *Tabla 17*, los valores de los parámetros característicos reales medidos para el módulo fotovoltaico ET-M53610 se reducen en comparación con los simulados en PV-Syst, disminuyendo la máxima potencia generada de 10W a 8,6W. Sin embargo, comparado los valores reales con las medidas obtenidas en la emulación, el cambio principal se da en el caso de la corriente de cortocircuito, manteniendo los otros valores prácticamente constantes. Esto puede ser a causa de una falta de exactitud a la hora de estimar la irradiancia que había en el momento de tomar las medidas o a causa de la degradación sufrida en el panel a lo largo de sus 10 años de vida.

De hecho, observando la *Tabla 19* se puede estimar que la irradiancia a en el momento de la medición en realidad estaría entre 800 W/m^2 y 1000 W/m^2 , ya que es el valor de la corriente de cortocircuito es el más afectado por este factor y coincidiría con estos rangos. Por otro lado, también se puede apreciar que los valores de los voltajes no coinciden completamente con estos rangos definidos por I_{SC} , pero esto puede ser a causa de la degradación del panel, ya que fenómenos como los puntos calientes generan un aumento de I_{SC} y una reducción de V_{oc} .

Tabla 19. Valores obtenidos en la simulación del módulo ET-M53610 en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia y los valores de las medidas reales.

ET-M53610 T=25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	Valores reales	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²
P_{mpp}	10,2 W	8,62 W	7,9 W	5,8 W	3,7 W
V_{mpp}	17,7 V	16,9 V	17,4 V	16,9 V	16,3 V
I_{mpp}	0,57 A	0,51 A	0,46 A	0,34 A	0,23 A
V_{oc}	22,0 V	21,0 V	21,6 V	21,1 V	20,4 V
I_{sc}	0,63 A	0,55 A	0,50 A	0,38 A	0,25 A

En cuanto al módulo fotovoltaico MS-30P, en la *Tabla 18* se puede observar que los cambios en el caso de las medidas tomadas conectando el panel real son mayores, disminuyendo todos los valores de los parámetros característicos, por ejemplo, reduciendo la potencia máxima de 30W a 20W. No obstante, llevando a cabo el mismo procedimiento que con el módulo anterior, se puede estimar que esta reducción se da a causa de una menor irradiancia incidente en el panel, ya que, como se puede apreciar en la *Tabla 20*, los rangos coinciden para una irradiancia de entre 600 W/m^2 y 800 W/m^2 .

Tabla 20. Valores obtenidos en la simulación del módulo MS-30P en el software PV-Syst frente a distintos valores de irradiancia y los valores de las medidas reales.

ET-M53610 T=25°C	Irradiancia incidente				
	1000 W/m ²	800 W/m ²	Valores reales	600 W/m ²	400 W/m ²
P_{mpp}	30,1 W	23,5 W	20,17 W	17,1 W	10,9 W
V_{mpp}	17,4 V	17,0 V	16,5 V	16,5 V	15,9 V
I_{mpp}	1,73 A	1,38 A	1,23 A	1,04 A	0,69 A
V_{oc}	21,6 V	21,2 V	20,0 V	20,7 V	20,0 V
I_{sc}	1,91 A	1,53 A	1,29 A	1,15 A	0,76 A

11.5.4. Comprobación

Como último paso, se ha querido comprobar que la variación entre los resultados simulados y los resultados de las mediciones reales ha sido causada por compararlos con valores de irradiancia incorrectos. Por ello, se han vuelto a introducir los valores de los parámetros característicos de las placas analizadas en el software PV-Syst como se ha explicado anteriormente en la Figura 36 y en la Figura 41. De esta manera, se ha simulado cada placa para distintos valores de irradiancia, hasta obtener uno que se asemeje con los valores reales. Esta comparación se puede observar en la *Tabla 21*.

En el caso del módulo ET-M35610, se obtienen valores similares entre lo simulado y lo real para unas condiciones concretas de 875 W/m^2 de irradiancia y una temperatura del panel de 25°C . No obstante, los valores de tensión no se ajustan tanto como deberían, por eso, se puede estimar que esta variación es causada por algún tipo de degradación en el panel, como se ha mencionado anteriormente.

Por otro lado, en cuanto al módulo fotovoltaico MS-30P, la similitud entre los valores simulados y los valores reales medidos se daría para una irradiancia aproximada de 697 W/m^2 y una temperatura del panel de 25°C , ya que casi todos los parámetros se asemejan. En concreto, el valor de la corriente en el punto de máxima potencia no coincide con el supuesto rango, pero se trata de una variación mínima.

Tabla 21. Comparación entre los valores obtenidos mediante el software PV-Syst y las mediciones reales para una irradiancia en concreto.

T=25°C	ET-M53610		
	875 W/m ²	Valores reales	800 W/m ²
P_{mpp}	8,8 W	8,62 W	7,9 W
V_{mpp}	17,5 V	16,9 V	17,4 V
I_{mpp}	0,50 A	0,51 A	0,46 A
V_{oc}	21,7 V	21,0 V	21,6 V
I_{sc}	0,55 A	0,55 A	0,50 A
T=25°C	MS-30P		
	697 W/m ²	Valores reales	600 W/m ²
P_{mpp}	20,2 W	20,17 W	17,1 W
V_{mpp}	16,8 V	16,5 V	16,5 V
I_{mpp}	1,21 A	1,23 A	1,04 A
V_{oc}	21,0 V	20,0 V	20,7 V
I_{sc}	1,33 A	1,29 A	1,15 A

ASPECTOS ECONÓMICOS

12. DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO Y MANO DE OBRA

En este apartado se detallan el presupuesto del sistema de medida propuesto y el coste de la mano de obra. En la *Tabla 22* se muestran los componentes adquiridos, la cantidad y sus precios, además de los gastos de envío de cada una de las tiendas online seleccionadas.

Tabla 22. Presupuesto del sistema de medida propuesto.

Tienda	Equipo	Unidades	Precio (€)	Total (€)
TiendaTec	Arduino UNO y cable USB	1	24,74 €	24,74 €
	Pantalla OLED	1	5,95 €	5,95 €
	Módulo adaptador micro-SD	1	2,16 €	2,16 €
	Potenciómetro B10K	1	0,85 €	0,85 €
	Placa de prototipo	1	3,39 €	3,39 €
	Pack de cables	1	1,85 €	1,85 €
	<i>Gastos de envío</i>			
L´reichelt	Sensor INA219	1	3,04 €	3,04 €
	<i>Gastos de envío</i>			
Total				59,34 €

Por otro lado, en este proyecto también se ha tenido en cuenta el coste de la mano de obra, la cual se analiza en la *Tabla 23*. En ella se especifican los distintos procesos que se han llevado a cabo en el desarrollo del sistema, es decir, el diseño, el montaje del prototipo y las pruebas

Tabla 23. Los costes de mano de obra del sistema portátil propuesto.

	Procesos	Precio (€/h)	Cantidad (horas)	Total (€)
Alumna Ingeniera Junior	Diseño	15 €/h	15 h	225 €
	Montaje del prototipo	15 €/h	5 h	75 €
	Pruebas	15 €/h	7 h	105 €
Tutor del trabajo	Supervisión	35 €/h	10 h	350 €
Total				755 €

De esta manera, el coste total del sistema de medida propuesto ha sido aproximadamente 820€, como se muestra en la *Tabla 24*.

Tabla 24. Coste total del sistema de medida propuesto.

	Precio (€)
Presupuesto	59,34 €
Mano de obra	755,00 €
Total	814,34 €

TRABAJOS FUTUROS

Una evolución posible para mejorar del dispositivo electrónico de medida propuesto sería añadir al sistema un medidor de irradiancia y un sensor de temperatura. De esta manera, se podría conocer las condiciones concretas en las que se han tomado las medidas, y por ello, la comparación con los valores ideales obtenidos mediante algún tipo de simulación sería más precisa.

Por otro lado, sería también interesante sustituir el potenciómetro y los reóstatos utilizados como carga, por un conjunto de resistencias, condensadores e interruptores que permitan una variación de la tensión y la intensidad más exactos que la realizada con la resistencia variable que teníamos.

CONCLUSIONES GENERALES

Como se ha comprobado en el apartado ANÁLISIS DE RESULTADOS, el funcionamiento del dispositivo electrónico propuesto ha sido el adecuado, ya que proporciona las curvas de corriente-voltaje y potencia-voltaje de forma inmediata, así pues el objetivo de plantear un sistema electrónico rápido y fiable para la caracterización de los paneles fotovoltaicos se puede dar por realizado. Además, aparte de su rapidez y fiabilidad, otro de los requerimientos del dispositivo era que tuviera un coste reducido y que no necesitara de grandes equipos en su montaje, objetivo que también se ha logrado, puesto que su coste es cuatro veces menor que cualquier sistema de los que están actualmente en el mercado.

Por otro lado, mediante las simulaciones llevadas a cabo con el software PV-Syst y el montaje del programa Matlab/SIMULink, se ha confirmado que las curvas características I-V y P-V varían como se ha especificado en el apartado del ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE. Es decir, cuanto más irradiancia incidente llegue al módulo fotovoltaico, mayor es el punto de máxima potencia o MPPT, aumentando en mayor grado el valor de la corriente de cortocircuito. Sin embargo, la variación de la temperatura del panel causa el efecto contrario en el sistema, dicho de otro modo, cuanto mayor es el valor de la temperatura, más se calienta el panel y la potencia generada disminuye, reduciendo principalmente el valor del voltaje de circuito abierto.

Finalmente, tras observar los valores obtenidos mediante la conexión directa de los módulos fotovoltaicos al dispositivo propuesto, y compararlos con los valores obtenidos mediante las simulaciones y las emulaciones, se ha llegado a la conclusión de que uno de los módulos fotovoltaicos (el módulo ET-M53610) sufre una pequeña degradación después de 10 años de vida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nota de prensa agosto 2020. Red Eléctrica de España. [08/09/2020]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2020/08/la-demanda-de-energia-electrica-de-espana-desciende-un-3-8-en-julio>
- [2] "Diferentes tipos de sistemas solares fotovoltaicos". Sun Supply (Empresa de diseño de sistemas solares fotovoltaicos de Colombia). [29/05/2020]. Disponible en: <https://www.sunsupplyco.com/tipos-de-sistemas-solares/>
- [3] "Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas." Julian Cantos Serrano. Editorial Paraninfo, 2016. [29/05/2020]
- [4] "Energía solar fotovoltaica." Grado de Ingeniería de Energías Renovables, UPV/EHU. [29/05/2020]
- [5] "Análisis de eficiencia y degradación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica". Pedro Gonzalez, Fernando Jurado, David Granados y Francisco Ortiz. Revista Iberoamericana de Ciencias ISSN 2334-2501. [05/09/2020]. Disponible en: <http://reibci.org/publicados/2018/dic/3200116.pdf>
- [6] "Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil". Julio Fernandez Ferichola. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Tecnología Electrónica. [26/07/2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/6037>
- [7] "Photovoltaic Report 2015." Fraunhofer Institut ISE (Alemania), 18 May 2020. [29/05/2020]. Disponible en: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/P_hotovoltaics-Report.pdf
- [8] "Eficiencia en paneles solares". S. Torres-Pacheco, F. Jurado-Perez, D. Granados-Lieberman y A. Lozano-Luna. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Revista del Diseño Innovativo, Enero-Marzo 2018. [29/05/2020]. Disponible en: http://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf
- [9] "Análisis de factores que influyen en la sujeción de paneles fotovoltaicos y su efecto sobre la producción de energía eléctrica". Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Industrial. Manuel Felipe Rosa Iglesias. [29/05/2020]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5745/fichero/PFC+Pablo+Nuevo+Duque+-+An%C3%A1lisis+de+factores+que+influyen+en+la+sujeción+de+paneles+fotovoltaicos.pdf>
- [10] "Célula Solar. Energía Solar Fotovoltaica." O. P. Lamingueiro, pp. 79-83. [05/09/2020]. Disponible en: <https://oscarperpinan.github.io/esf/Celula.pdf>

- [11] "Modelado y simulación de un panel fotovoltaico empleando técnicas de inteligencia artificial". Adalberto Ospino Castro, Carlos Robles Algarín, Alejandro Duran Pabón. Abril de 2014. [05/09/2020]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v35n3/rie07314.pdf>
- [12] "Degradación de módulos fotovoltaicos y su influencia en la pérdida de potencia." M.T. Montero Larocca, C.A. Cadena y M.J.L. Tamasi. Avances en energías renovables y medio ambiente, vol. 18. Septiembre 2014. [05/09/2020]. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/22328/CONICET_Digital_Nro.6752_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [13] "Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review". Ababacar Ndiaye, Abdérafî Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh M.F. Kébé, Pape A. Ndiaye, Vincent Sambou. Solar Energy, Elsevier, October 2013. [07/06/2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>
- [14] "Why do PV modules fail?" Claudio Ferrara and Daniel Philipp. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Germany), 30 March 2012. [07/06/2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.046>
- [15] "Ageing effects in PV cells and modules." Dr.E.Kaplani. Innovation Week on PV Systems Engineering and the other Renewable Energy Systems, 1-12 July 2012 (Greece). [07/06/2020]. Disponible en: https://edulil.ekt.gr/edulil/bitstream/10795/3664/2/3664_EKaplani-PV_Ageing_Effects.pdf
- [16] "Impact of lightning impulse voltage on polycrystalline silicon photovoltaic modules." Jiang, Taosha & Grzybowski, Stanislaw. 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729225
- [17] "Sistema portátil de medida de dispositivos sometidos a ensayos en campo". Pablo Ramírez Lapausa. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación. Febrero 2014. [05/09/2020]. Disponible en: http://oa.upm.es/33837/1/PFC_pablo_ramirez_lapausa.pdf
- [18] UNE-EN IEC 62941:2020 "Módulos fotovoltaicos (FV) terrestres. Sistema de calidad para la fabricación de módulos FV." Asociación Española de Normalización y Certificación. [26/07/2020]. Disponible en: <https://www.une.org/>
- [19] Especificaciones técnicas Arduino Uno. Tienda Arduino. [15/08/2020]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [20] Especificaciones técnicas del dispositivo INA219, monitor bidireccional con la interfaz I2C. Texas Instruments. [15/08/2020]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf?ts=1598896205027&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [21] Adafruit INA219 Current Sensor Breakout. Adafruit learning system. [15/08/2020]. Disponible en: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ina219-current-sensor-breakout.pdf>
- [22] Especificaciones técnicas de la pantalla OLED SSD1306. Solomon Systech, semiconductor technical data. [15/08/2020]. Disponible en: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>

- [23]** Pantalla OLED de 0,96" azul y amarillo SDD1306. Tienda online Tiendatec. [15/08/2020].
- [24]** Especificaciones técnicas del adaptador micro-SD para Arduino. [15/08/2020]. Disponible en: <http://datalogger.pbworks.com/w/file/attach/89507207/Datalogger%20-%20SD%20Memory%20Reader%20Datasheet.pdf>
- [25]** Módulo adaptador micro-SD para Arduino. Tienda online Tiendatec.
- [26]** Proyecto *Make Your Own Power Meter/Logger* de *GreatScottLab*. Noviembre 2016. [17/02/2020]. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/Make-Your-Own-Power-MeterLogger/>

ANEXO 1

CÓDIGO DEL ARDUINO UNO

El código compilado y subido al Arduino UNO se ha obtenido del proyecto *Make Your Own Power Meter/Logger* de *GreatScottLab* ^[26]. En este proyecto se lleva a cabo un medidor de potencia con los mismos componentes que el especificado en este trabajo (el monitor de corriente DC INA219, la pantalla OLED y el adaptador de tarjeta micro-SD) pero con otro modelo de Arduino, en este caso un Arduino Nano o un Arduino Pro Mini.

El código utilizado se puede simplificar de la siguiente manera: incluir las librerías de los componentes, definir los valores iniciales, activar el monitor de corriente DC INA219, iniciar el programa, obtener los valores de tiempo, voltaje y corriente del sensor y almacenarlos en la tarjeta micro-SD y por último mostrar dichos valores en la tarjeta micro-SD. Esto se muestra en el diagrama de flujo de la *Figura 71*.

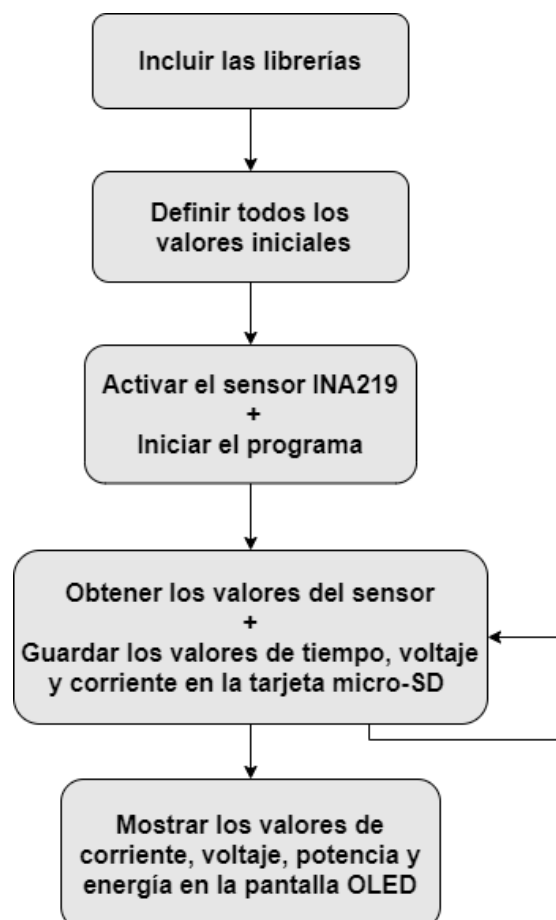


Figura 71. Diagrama de flujo del código utilizado en el sistema electrónico planteado.

De esta manera, el código o programa utilizado ha sido el siguiente:

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <SPI.h>
#include "SdFat.h"
SdFat SD;

#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(OLED_RESET);
Adafruit_INA219 ina219;

unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long interval = 100;
const int chipSelect = 10;
float shuntvoltage = 0;
float busvoltage = 0;
float current_mA = 0;
float loadvoltage = 0;
float energy = 0;
File TimeFile;
File VoltFile;
File CurFile;

void setup() {
  SD.begin(chipSelect);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  ina219.begin();
}

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  if (currentMillis - previousMillis >= interval)
  {
    previousMillis = currentMillis;
    ina219values();

    TimeFile = SD.open("TIME.txt", FILE_WRITE);
    if (TimeFile) {
      TimeFile.println(currentMillis);
      TimeFile.close();
    }

    VoltFile = SD.open("VOLT.txt", FILE_WRITE);
    if (VoltFile) {
      VoltFile.println(loadvoltage);
      VoltFile.close();
    }

    CurFile = SD.open("CUR.txt", FILE_WRITE);
    if (CurFile) {
      CurFile.println(current_mA);
      CurFile.close();
    }
    displaydata();
  }
}
```

```
}  
}  
  
void displaydata() {  
    display.clearDisplay();  
    display.setTextColor(WHITE);  
    display.setTextSize(1);  
    display.setCursor(0, 0);  
    display.println(loadvoltage);  
    display.setCursor(35, 0);  
    display.println("V");  
    display.setCursor(50, 0);  
    display.println(current_mA);  
    display.setCursor(95, 0);  
    display.println("mA");  
    display.setCursor(0, 10);  
    display.println(loadvoltage * current_mA);  
    display.setCursor(65, 10);  
    display.println("mW");  
    display.setCursor(0, 20);  
    display.println(energy);  
    display.setCursor(65, 20);  
    display.println("mWh");  
    display.display();  
}  
  
void ina219values() {  
    shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();  
    busvoltage = ina219.getBusVoltage_V();  
    current_mA = ina219.getCurrent_mA();  
    loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage / 1000);  
    energy = energy + loadvoltage * current_mA / 3600;  
}
```

ANEXO 2

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ET-SOLAR ET-M53610

ET Module

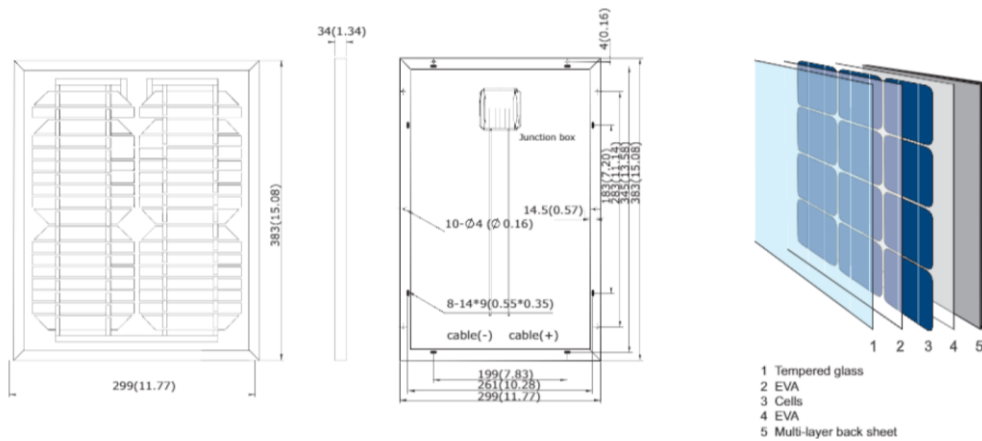
ET-M53610

SPECIFICATIONS

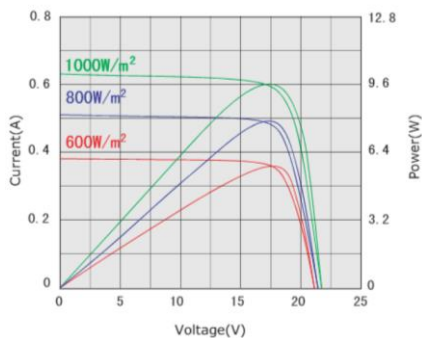
Model type	ET-M53610
Peak power(Pmax)	10W
Weight	1.7kg (3.7lbs)
Dimensions	383×299×34mm 15.1×11.8×1.3inch
Maximum power voltage (Vmp)	17.82V
Maximum power current (Imp)	0.57A
Open circuit voltage (Voc)	21.96V
Short circuit current (Isc)	0.63A
Maximum system voltage	DC 1000V
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.058 %/°C
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.367 %/°C
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.485 %/°C
Normal Operating Cell Temperature	44.4±2°C

Note: the specifications are obtained under the Standard Test Conditions (STCs): 1000 W/m² solar irradiance, 1.5 Air Mass, and cell temperature of 25°C.

PHYSICAL CHARACTERISTICS Unit:mm(inch)



Electrical Performance cell temperature:25°C



Available from: www.solar-wind.co.uk

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SUMSOL MS-30P

Módulos fotovoltaicos SumSol MS-30P



CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

	MS-30P
Potencia nominal – Pmax (Wp)	30
Tensión en circuito abierto – Voc (V)	21,60
Tensión en el punto de máxima potencia – Vmax (V)	17,40
Corriente de cortocircuito – Isc (A)	1,91
Corriente en el punto de máxima potencia – Imax (A)	1,73
Tolerancia de potencia (%/Pmax)	±3%

Datos en condiciones estándar de medida (STC): 1.000 W/m², 25° C; 1,5 ATM.

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

	MS-30P
Dimensiones (mm)	702 x 362 x 25
Peso (kg)	3,0
Tipo de célula	Silicio policristalino, con capa antirreflexiva
Contactos	Redundantes, múltiples, en cada célula.
Células por módulo	36 en serie (2 x 18)
Marco	Aluminio anodizado
Toma de tierra	No
Cajas de conexión	De apertura deslizante, sin diodos.
Cables	No



VALORES PARA DISEÑO DEL SISTEMA

Tensión máxima del sistema	600 V
Máximo valor del fusible en serie	10 A
Sobrecarga máxima de corriente inversa	2 h de sobrecarga al 135% del valor máximo de protección
Máxima carga física admisible	2.400 Pa
Condiciones de operación	De -40 a +85 °C
Resistencia al impacto	Caída de bola de acero de 225 gr desde 1 metro



CERTIFICADOS Y GARANTÍAS

Certificados	CE
Garantía de producto	2 años
Garantía 80% de potencia	20 años

PARÁMETROS DE TEMPERATURA

TONC	45°C ±2°C
CCT – Isc	0,10 %/°C
CCT – Voc	-0,38 %/°C
CCT – Pmax	-0,47 %/°C

Valores Emulados

Módulo: ET-M53610

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 20°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 25°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 30°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 35°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 40°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 45°C. Contains 50 rows of numerical data.

Table with 5 columns: Voltage, A, mA, Potencia, and 50°C. Contains 50 rows of numerical data.

