



Trabajo Fin de Grado

Caracterización automática de placas solares
fotovoltaicas

Automatic characterization of photovoltaic solar
modules

Autor

Jaime Abril Sarvisé

Directores

Raúl Igual Catalán y María Abián Vicén

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel
2020





Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño y la implementación de un sistema electrónico programable hecho con Arduino cuya función es la caracterización automática de placas solares fotovoltaicas.

Se presentarán diferentes mediciones realizadas por el sistema junto con varias células solares para así comparar los diferentes resultados obtenidos y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

Abstract

The following dissertation includes the design and implementation of an embedded system made with an Arduino whose function is the automatic characterization of solar panels.

Different measurements made by the system and several solar cells will be presented in order to compare the various results obtained and to check the correct performance of the system.



Índice

1. Objetivos del proyecto.....	1
2. Las células solares.....	1
2.1 Energía solar.....	1
2.2 Células solares, unión P-N.	2
2.3. Efecto fotovoltaico.....	3
2.4. Tecnologías de células solares.....	4
3. Electrónica alimentada con células solares.	5
3.1. Proyectos Arduino.	5
3.2 Energía solar como fuente de alimentación.....	7
4. Elementos clave de las células solares.....	7
4.1. Curva característica I-V.....	7
4.2. Punto de máxima potencia.....	8
4.3. Seguidores de máxima potencia.....	8
5. Materiales.....	9
5.1. Arduino Uno.....	9
5.2. Célula solar	9
5.3. Potenciómetro digital.....	10
5.4. Resistencias de medida.....	11
5.5. PLX-DAQ.....	12
5.6. Sensor de corriente.....	12
6. Metodología experimental.	17
6.1. Diseño electrónico	17
6.2. Toma de datos.	18
6.3. Diagrama de flujo del programa.....	19
7. Resultados experimentales.....	21
7.1. Resultados del 24 de mayo.....	22
7.2. Resultados del 25 de mayo.....	23
7.3. Resultados del 4 de junio.....	24
7.4. Análisis de las tendencias.	25
7.5. Pruebas adicionales.	26
8. Discusión.....	27
8.1. Acerca del sensor de corriente.....	27
8.2. Acerca de los resultados.	28
9. Conclusiones	29
9.1. Posibles mejoras.	29
10. Bibliografía	30



Índice de figuras, tablas y anexos.

Figura 1	Unión p-n.....	3
Figura 2	Proceso fotovoltaico.....	4
Figura 3	Curva I-V.....	8
Figura 4	Célula solar SP-37.....	10
Figura 5	Potenciómetro digital MCP4251-502.....	11
Figura 6	Resistencias variables.....	11
Figura 7	Esquema eléctrico medición de error.....	12
Figura 8	1 ^a comparativa Bland-Altman.....	14
Figura 9	2 ^a comparativa Bland-Altman.....	15
Figura 10	3 ^a comparativa Bland-Altman.....	16
Figura 11	Esquema eléctrico del sistema.....	17
Figura 12	Diagrama de flujo del programa.....	20
Figura 13	Gráficos 1 ^a medición.....	22
Figura 14	Gráficos 2 ^a medición.....	23
Figura 15	Gráficos 3 ^a medición.....	24
Figura 16	Gráficos medición adicional.....	26-27

Tabla 1	1 ^a comparativa Bland-Altman.....	14
Tabla 2	2 ^a comparativa Bland-Altman.....	15
Tabla 3	3 ^a comparativa Bland-Altman.....	16
Tabla 4	Valores meteorológicos 1 ^a medición.....	22
Tabla 5	Valores meteorológicos 2 ^a medición.....	23
Tabla 6	Valores meteorológicos 3 ^a medición.....	24
Tabla 7	Valores significativos de las mediciones.....	25
Tabla 8	Valores meteorológicos medición adicional.....	26
Anexo 1	Código de programación de Arduino.....	En PDF adjunto





1. Objetivos del proyecto.

El principal objetivo del presente trabajo fin de grado es el desarrollo e implementación del sistema de automatización del proceso de caracterización de células solares fotovoltaicas. Se trata de conseguir un sistema sencillo que permita obtener los parámetros de una célula solar de manera rápida y eficiente. Además, se pretende que el sistema sea de fácil instalación y que no requiera disponer de demasiados programas instalados en el ordenador desde el cual se vayan a realizar las pruebas. Esto permitiría que el sistema fuese semi-“plug & play”, es decir, con la conexión del sistema al ordenador y dos programas, se estaría en condiciones de lanzar una prueba para caracterizar la célula solar.

El conocimiento de los parámetros reales de operación de la célula solar fotovoltaica ayudará a conseguir una mayor eficiencia de la misma, a la vez que permite conocer la energía que en cada momento está produciendo la célula.

La obtención y el tratamiento de los datos, así como la programación de las resistencias digitales, se han realizado mediante un Arduino Uno.

2. Las células solares.

2.1 Energía solar.

Se entiende como energía solar aquella que aprovecha la radiación del sol. Hay diferentes métodos de aprovechar esta energía, si bien la más conocida y utilizada son las células solares fotovoltaicas, de las cuales se hablará más adelante en detalle. Los métodos más comunes son:

- Energía solar térmica:

- *Plantas solares térmicas:* En estas plantas se convierte la energía solar en energía termoeléctrica. El principio de funcionamiento consiste en emplear la radiación solar para calentar un fluido. Una vez calentado el fluido existen dos variantes para la obtención de la energía eléctrica: o bien se hace pasar directamente por una turbina, o se realiza un intercambio térmico con otro fluido para hacerlo pasar por una turbina. A excepción de los equipos solares, es un sistema que comparte buena parte del proceso con las plantas termoeléctricas (conversión del calor y generación de la energía eléctrica)(1).

A pesar de que está considerada como la forma más económica de producir electricidad a gran escala a partir de energía solar, sus costes de instalación y de generación la sitúan aún lejos de un amplio uso comercial(2).



• *Calentadores solares térmicos:* Es un proceso empleado mayoritariamente en viviendas o edificios residenciales. Hay muchas formas de realizar este proceso, pero todas ellas comparten los mismos componentes: tanques de almacenamiento y colectores solares. Estos colectores solares están directamente expuestos a la irradiación solar. Cuando se hace pasar agua por ellos, la temperatura del agua aumenta y se puede emplear para diversos usos: calentamiento de agua para piscinas, suelo irradiante...

En relación con este proceso, hay avances recientes en los que se realiza un aprovechamiento de las células solares y el calor que emiten. Existen diferentes tecnologías, unas basadas en el calentamiento de aire y su posterior aprovechamiento, y otras basadas en el calentamiento de agua. Esto también consigue un efecto negativo en la célula, ya que si la célula almacena este calor durante demasiado tiempo puede sufrir daños. De esta manera se realiza un proceso completo, de obtención tanto de energía eléctrica como de energía térmica (3).

-Energía solar fotovoltaica:

• *Huertos solares fotovoltaicos:* Las células solares son los dispositivos electrónicos que forman los paneles solares empleados para la transformación de energía solar en energía eléctrica a través de un proceso llamado efecto fotovoltaico.

2.2 Células solares, unión P-N.

Las células solares fotovoltaicas pueden ser fabricadas con distintos materiales. A pesar de ello, todos los diseños están basados en una estructura de capas. Dentro de esta estructura, la capa más importante es aquella donde se encuentra el semiconductor. Esta capa a su vez, se divide en dos sub-capas: la capa P y la capa N. La unión de ambas, es lo que se conoce como unión P-N. La capa P la conforma un semiconductor extrínseco de tipo p, que contiene “impurezas” aceptoras de electrones, y por tanto, cargas positivas y la capa N la conforma un semiconductor extrínseco de tipo n, que contiene “impurezas” con electrones libres, y por tanto, cargas negativas. Estas “impurezas” (elementos dopantes) son átomos de otro elemento distinto al elemento principal que conforma el semiconductor, que tienen un exceso o defecto de electrones en sus capas más externas. Este dopaje incrementa considerablemente la concentración de cargas positivas y negativas a ambos lados de la unión. Para que haya un flujo de electrones se debe aportar energía a la unión. Cuando se aporta energía a los electrones, éstos pasan de la banda de valencia en la que se encuentran, a un estado de energía superior, lo que se conoce como banda de conducción. Este “salto” se consigue aportando una cantidad determinada de

energía, que varía dependiendo del material. Con este proceso se consigue que haya un flujo de electrones, y a su vez se cree un campo eléctrico(4). En la figura 1 se puede observar la estructura de la unión P-N. En este caso “*space charge region*” sería la propia unión P-N.

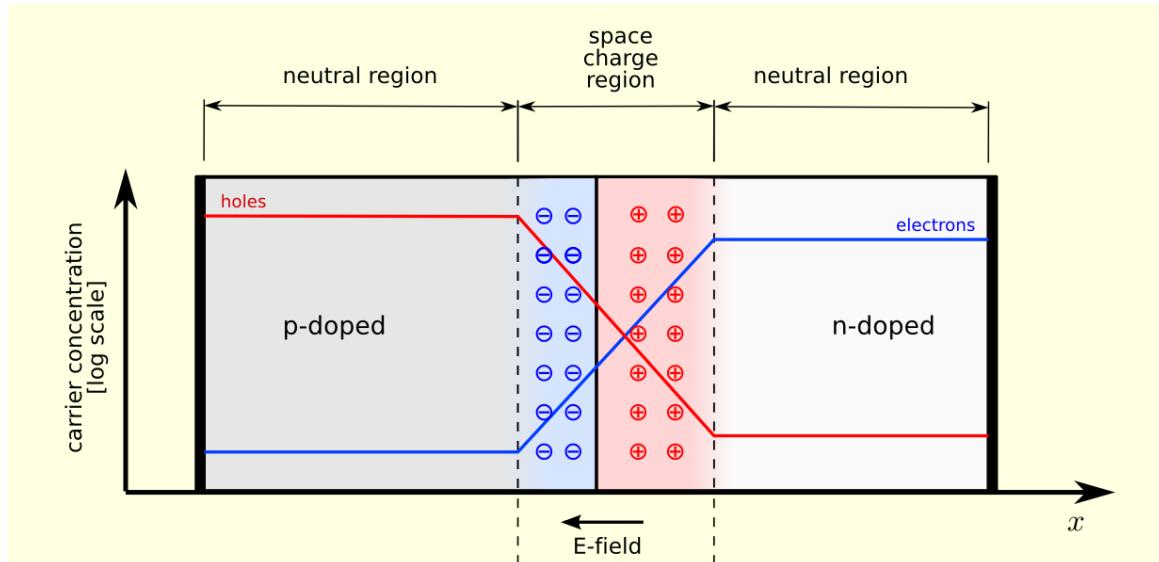


Figura 1. Muestra de la unión p-n(5).

2.3. Efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es un proceso que genera voltaje en una célula solar cuando ésta es expuesta a la luz solar. Así es como se convierte la luz del sol (energía solar) en energía eléctrica.

Este efecto está basado en la unión P-N, ya comentada anteriormente. Se debe conseguir que los electrones reciban energía. En el caso en que nos encontramos, esto se consigue con la energía transmitida por los fotones (luz solar) a las cargas negativas (electrones). Este hecho produce que los electrones salten a la banda de conducción, iniciando así el proceso característico de la unión P-N. Con el proceso iniciado, se obtienen campos eléctricos internos dentro de la célula solar, dando como resultado un voltaje que será aprovechado posteriormente(6). En la figura 2 se muestra un esquema que describe el efecto fotovoltaico.

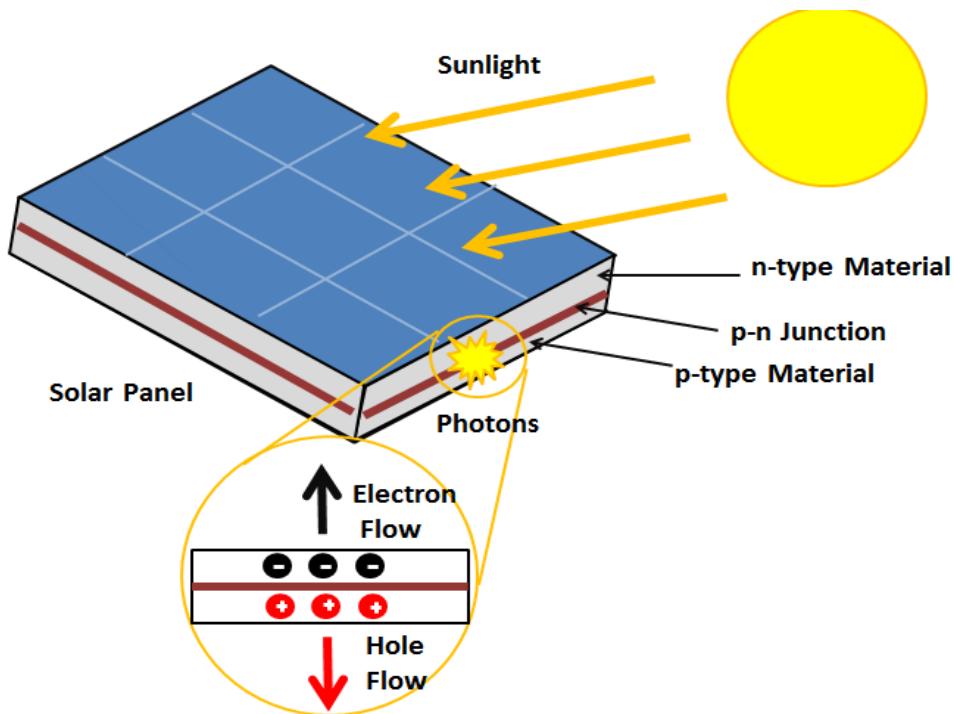


Figura 2. Muestra del proceso fotovoltaico(7).

2.4. Tecnologías de células solares.

En la actualidad, hay diversas tecnologías en la fabricación de células solares. Todas ellas se basan en el uso de semiconductores. A continuación, se muestra una clasificación según su comercialización:

- **Células de silicio:** Son las más comunes, aunque no son las más baratas ni tampoco las más eficientes. Tienen una banda de conducción casi ideal para su uso como célula solar(6). Se pueden distinguir dos tipos:

Monocristalinas: Fueron las primeras células solares que se comercializaron. Como su nombre indica, se componen de un único cristal de silicio puro. Su eficiencia es elevada (26.1 % (9)), pero su fabricación es lenta y muy cara, lo que las hace poco competitivas en comparación con el resto de células solares.

Policristalinas: Son las más utilizadas a nivel mundial. Se componen de una gran cantidad de pequeños cristales de silicio. Su eficiencia no es tan elevada (22.8 % (9)), pero sí que son más baratas de fabricar.

- **Células de película delgada:** Gracias a su composición, son mucho más flexibles y duraderas que las mencionadas anteriormente. Tienen mejores coeficientes de temperatura, así como una mejor respuesta ante luz indirecta. Pueden estar hechas de silicio amorfo, telururo de cadmio o cobre, indio, galio y selenio. Las dos últimas son



mucho más eficientes pero contienen elementos tóxicos, lo que hace que su manipulación y reciclaje deba ser muy cuidadoso(10).

• Células de alta eficiencia: Son células muy eficientes pero su fabricación conlleva un elevado coste económico. Hasta el momento no se han desarrollado para aplicaciones civiles, pero sí que se emplean en sistemas aeroespaciales como la Estación Espacial Internacional. Se diferencian dos tipos:

Arseniu de galio: Tiene una estructura muy parecida a las células monocristalinas de silicio. La ventaja reside en que su coeficiente de absorción de luz es más elevado, así como también su banda de conducción es más ancha. Poseen la eficiencia más alta dentro de las células de una sola unión con un 29.1%(9).

Multiunión: La mayoría de células fotovoltaicas contienen una única unión P-N. Estas celdas multiunión se conforman por dos o más uniones superpuestas una encima de otra, permitiendo que luz con diferente amplitud de onda también produzca energía solar. Con esto se consigue una eficiencia mucho mayor (el récord se sitúa alrededor del 46 %)(9).

• Tecnologías emergentes: Estas células solares todavía se encuentran en fase de desarrollo e investigación. Principalmente, este grupo se compone por:

Células solares orgánicas: emplean polímeros orgánicos para convertir la luz del sol en energía eléctrica(10).

Perovskitas: Estas células solares se componen por el mineral Perovskita. Es un mineral raro en la corteza terrestre, pero ha demostrado una gran eficiencia y actualmente se están realizando muchos ensayos con este material(10).

Células solares sensibilizadas por colorante: Están formadas por nano estructuras de electrodos de óxido metálico cubiertos por tinta (colorante). Tienen una gran proyección como tecnología solar de bajo coste(10).

3. Electrónica alimentada con células solares.

3.1. Proyectos Arduino.

Arduino es una plataforma de hardware y software de código libre. Su inicio data en el año 2005 y desde entonces se emplea mundialmente como herramienta para el desarrollo de diferentes aplicaciones de muy diversos ámbitos(11).



El continuo crecimiento de esta herramienta, así como la gran comunidad que la compone, hace que día tras día se vaya viendo incrementado el número de proyectos. A día de hoy podemos encontrar muchos proyectos realizados con Arduino y que emplean la energía solar como alimentación, o bien, buscan un mayor aprovechamiento de esta energía solar(12).

- **Energía solar como fuente de energía:** Son diversos los proyectos que emplean Arduino y energía solar como fuente de energía. Se pueden distinguir entre aquellos que emplean la energía solar para cargar algún tipo de batería y aquellos que la emplean como fuente de alimentación.

Carga de baterías: La mayoría de ellos se emplean para cargar baterías de pequeños dispositivos electrónicos, tales como móviles, ya que las células solares empleadas no permiten la carga de sistemas más complejos. Existe algún proyecto donde se ha empleado la carga de estas baterías para, por ejemplo, instalar un dispositivo de control de frecuencia cardiaca en diferentes ciudades.

Como fuente de alimentación: Hay ciertos proyectos donde se emplean las células solares como fuente de alimentación. Se pueden encontrar como fuente de alimentación de gran parte de los electrodomésticos de una vivienda (proyecto que emplea placas solares de 1500 W), proyectos donde se emplea como fuente de alimentación de un control de las persianas de una vivienda e incluso el control de un insecticida con Arduino.

- **Mayor aprovechamiento de la energía solar:** Son proyectos que tratan de obtener el mayor rendimiento de una célula solar posible.

Seguidores solares: Su funcionamiento se basa en seguir la estela del sol durante todo el día para conseguir que la incidencia de los rayos en la célula sea la más óptima.

Seguidor del punto de máxima potencia: Al igual que los seguidores comerciales, estos seguidores diseñados con Arduino obtienen el punto de máxima potencia de la célula solar, consiguiendo en todo momento la mayor eficiencia posible.

Medidor de la radiación solar: Cuanto mayor es la radiación solar, mayor es la energía producida por la célula solar. Este tipo de proyectos trata de medir la radiación solar, para ver si es realmente útil hacer una instalación solar en una determinada zona.



3.2 Energía solar como fuente de alimentación.

La energía solar está cada vez más presente en diferentes ámbitos. Es muy común la implementación de paneles solares en los edificios residenciales, junto con el sistema de baterías. Pero quizás un elemento que se encuentre en auge sea la energía solar empleada como batería y alimentación para diferentes aviones no tripulados (UAV). Estos UAV tienen diferentes paneles solares en sus alas, los cuales les permiten obtener la energía solar directamente cuando se encuentran volando. Además, estos UAV incorporan sistemas de propulsores solares controlados por Arduino(13).

4. Elementos clave de las células solares.

4.1. Curva característica I-V.

La curva corriente-tensión (I-V) es aquella que va a caracterizar una célula solar. Dependiendo de las características del medio en que se encuentre la célula solar, así como también de la propia célula solar, obtendremos diferentes curvas I-V. Para dibujar una curva I-V se deben obtener diversos valores de la potencia de la placa. Estos valores vienen determinados principalmente por dos factores(14):

- Irradiación solar: es la cantidad de luz incidente en la célula solar. Para una temperatura constante, la corriente de cortocircuito y la potencia máxima aumentan linealmente con la irradiación solar, mientras que el voltaje de circuito abierto aumenta logarítmicamente(15). Este parámetro es uno de los más relevantes en las células solares, ya que cuando se habla sobre el rendimiento de las mismas, se hace referencia al porcentaje de irradiación recibida que finalmente se convierte en energía eléctrica.

Cuando se tiende a caracterizar una célula solar o se indican sus parámetros característicos, siempre se emplea un valor de irradiación solar estándar de $1000 \frac{W}{m^2}$.

- Temperatura: el efecto de la temperatura en la potencia emitida en las células solares es inverso al de la irradiación solar, es decir, a una mayor temperatura, menor será la potencia emitida por la célula. Lo ideal sería conseguir una temperatura muy baja, pero a partir de un determinado valor de temperatura, la célula solar no es capaz de aumentar más su potencia, ya que se alcanza la máxima eficiencia(16).

4.2. Punto de máxima potencia.

Todas las curvas I-V tienen un punto máximo, que varía dependiendo de los dos factores ya comentados. Este máximo se conoce como punto de máxima potencia (MPP en inglés). Para que la célula solar trabaje en este punto, se le debe forzar a encontrarse o bien en la corriente de máxima potencia (I_{MPP}) o bien en el voltaje de máxima potencia (V_{MPP}).

En caso de que las condiciones ambientales cambien, también cambiará este punto de máxima potencia.

En la figura 3, vemos representadas tanto la curva I-V, como la curva potencia-tensión. La curva I-V vemos que viene marcada en sus extremos por los puntos de máxima intensidad (se da cuando se produce cortocircuito I_{SC}), y el punto de máximo voltaje (se da cuando se produce circuito abierto V_{OC}).

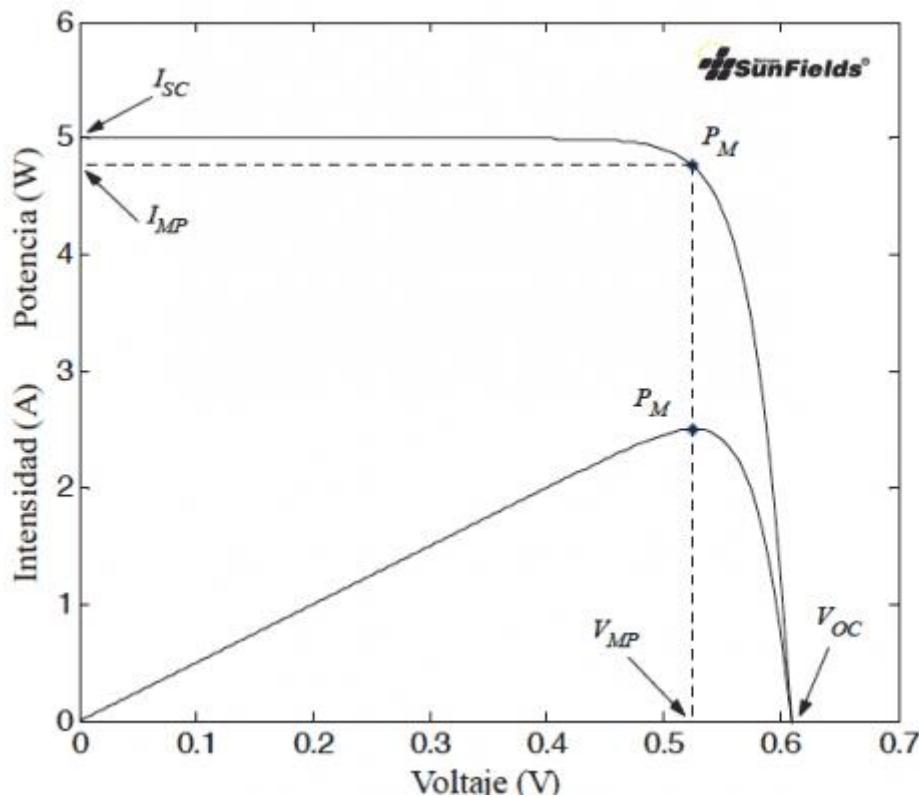


Figura 3. Curva I-V (superior), con punto de máxima potencia (P_M). La curva inferior se corresponde a la curva potencia-tensión (inferior)(17).

4.3. Seguidores de máxima potencia.

Estos aparatos electrónicos tratan de hacer trabajar a la célula solar siempre en el punto de máxima potencia. A través de un análisis en tiempo real del consumo que debe cubrir la placa solar, el nivel de carga de las baterías, la hora del día y la situación



meteorológica, este dispositivo es capaz de encontrar el punto de potencia óptimo o máximo(18).

Existen diferentes métodos para diseñar un seguidor de máxima potencia: perturbación y observación, conductancia incremental, lógica difusa y redes neuronales artificiales(19). Los dos primeros métodos, son sencillos de implementar y su eficiencia es elevada en entornos estables. En caso de que la célula solar se encuentre en un entorno con climatología cambiante y no siempre se den las mismas condiciones, se podría implementar un método de control más sofisticado, combinando uno de los dos primeros métodos con uno de los dos últimos.

Las ventajas de este dispositivo son claras, ya que en todo momento se estaría obteniendo la máxima potencia que puede dar la placa, o en su defecto, la máxima potencia que puede asumir el sistema en el cual se encuentra la placa solar.

5. Materiales.

A continuación se detalla una lista con los materiales empleados en el proyecto para construir el dispositivo automático de caracterización de células solares.

5.1. Arduino Uno.

Tal y como se ha comentado previamente, Arduino es una plataforma de hardware y software de código libre. Sus inicios datan del año 2005, cuando unos estudiantes italianos quisieron desarrollar una herramienta que facilitara la programación, así como hacer que todos los estudiantes que no habían programado nunca pudieran realizar diversos proyectos(11). Actualmente su comunidad se extiende por todo el mundo, lo que hace que cualquier persona pueda utilizar estos microcontroladores y sus periféricos, y se pueda beneficiar de la ayuda del resto de la comunidad.

En el proyecto se ha empleado una tarjeta Arduino Uno Rev3. Es el microcontrolador principal de la compañía. Se ha empleado esta tarjeta ya que su versatilidad nos permite poder conectarnos al potencímetro digital, así como también permite poder leer los datos extraídos de la célula solar.

5.2. Célula solar

La célula solar empleada ha sido la SP3-37 de PowerFilm Solar. Se ha empleado esta célula ya que se adapta muy bien a las exigencias del proyecto. Su corriente de operación de alrededor de 22 mA, la hace perfecta para emplearla junto con el sensor de

corriente utilizado en este trabajo. El voltaje máximo de esta célula es de 4.6 V con lo cual en ningún momento sobrepasarán los 5 V que es capaz de medir el Arduino Uno Rev 3. En la figura 4 se puede observar la célula solar empleada.

Adicionalmente, se han realizado pruebas con diferentes células solares de diferentes características (3 V y 120 mA, 1 V y 80 mA, 2 V y 130 mA, 0.5 V y 130 mA; todos estos valores son valores de voltaje y corriente máximos que pueden proporcionar las células solares).

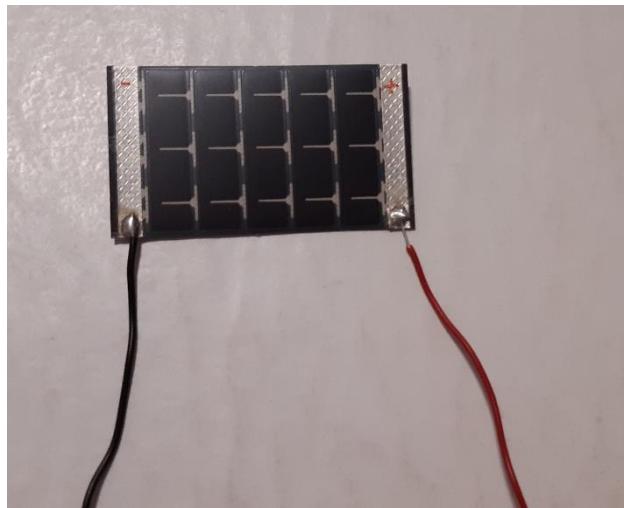


Figura 4. Célula solar SP-37 de PowerFilm Solar empleada en el proyecto.

5.3. Potenciómetro digital.

En un primer momento se decidió emplear el potenciómetro digital MCP41HV51-502, de MicroChip. Este potenciómetro permitía emplear voltajes de hasta 36V, pero al no ser posible leer dicho voltaje con Arduino, se decidió emplear el MCP4251-502. Es un potenciómetro dual digital de $5\text{ k}\Omega$. La resistencia variable se consigue programando sus 8 bits (256 pasos), desde $0\text{ }\Omega$ hasta los $5\text{ k}\Omega$ máximos. En cada paso se aumenta la resistencia en alrededor de $19\text{ }\Omega$. Emplea una memoria RAM (*Random Access Memory*) volátil y se comunica con Arduino a través de una interfaz SPI (*Serial Peripheral Interface*). La figura 5 muestra el potenciómetro empleado.

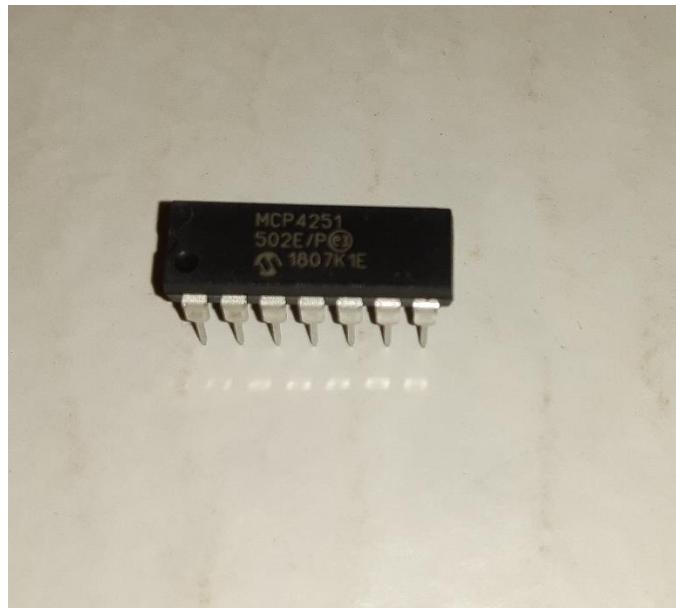


Figura 5. Potenciómetro digital MCP4251-502.

5.4. Resistencias de medida

En este apartado se incluyen las dos resistencias variables empleadas para medir la temperatura y la luminosidad a las cuales se están realizando las pruebas. Se han colocado una NTC NK502C1R5 (Amphenol) (valor nominal de $5\text{ k}\Omega$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) y una LDR NSL-19M51 (LUNA Optoelectronics) (valor nominal de $5\text{ k}\Omega$ a 100 lux). Para la obtención de las medidas se han colocado en sendos divisores de tensión cuya salida está cableada a las entradas analógicas del Arduino. Ambas resistencias de medida se muestran en la figura 6.

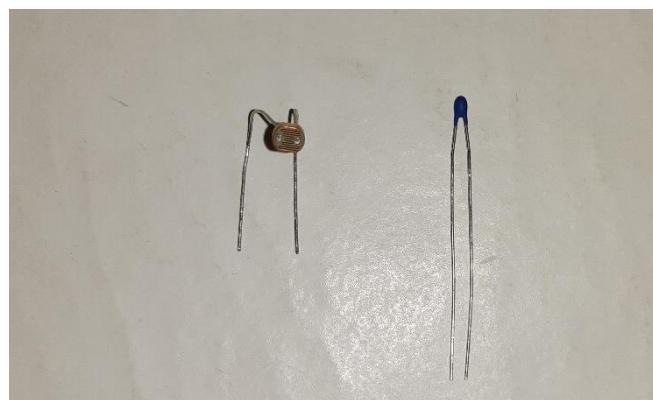


Figura 6. LDR (izquierda) y NTC (derecha) empleadas para medir las variables meteorológicas.

5.5. PLX-DAQ.

Accesorio del programa Excel que permite la lectura de datos a través de un Arduino. Este programa permite programar la forma de presentar los datos en la hoja de Excel directamente en el código de Arduino. Esto presenta una gran ventaja, ya que permite tratar los datos directamente sin tener que emplear otros elementos de Arduino (tarjeta SD). A pesar de ello, es un accesorio que puede presentar problemas si se realizan modificaciones en el documento Excel que presenta, por lo cual se ha optado por copiar los datos en un documento Excel distinto. En este proyecto se ha empleado la versión 2.11, descargada directamente de los foros de Arduino([20](#)).

5.6. Sensor de corriente.

El sensor de corriente es el CLSW6B40M de Honeywell. Es un sensor de corriente capaz de medir entre ± 40 mA. El voltaje de salida en caso de no circular corriente por él, es de 2.5 V. A partir de estos 2.5 V, el voltaje varía hasta ± 1 V, según se tenga una corriente negativa o positiva.

Para determinar la sensibilidad del sensor de corriente con exactitud se han realizado una serie de pruebas, empleando el microcontrolador Arduino, catorce resistencias de diferente valor, el sensor de corriente y un sencillo programa que realiza la conversión de voltaje (obtenido a la salida del sensor) a la corriente que el sensor está midiendo. La figura 7 muestra su esquema eléctrico.

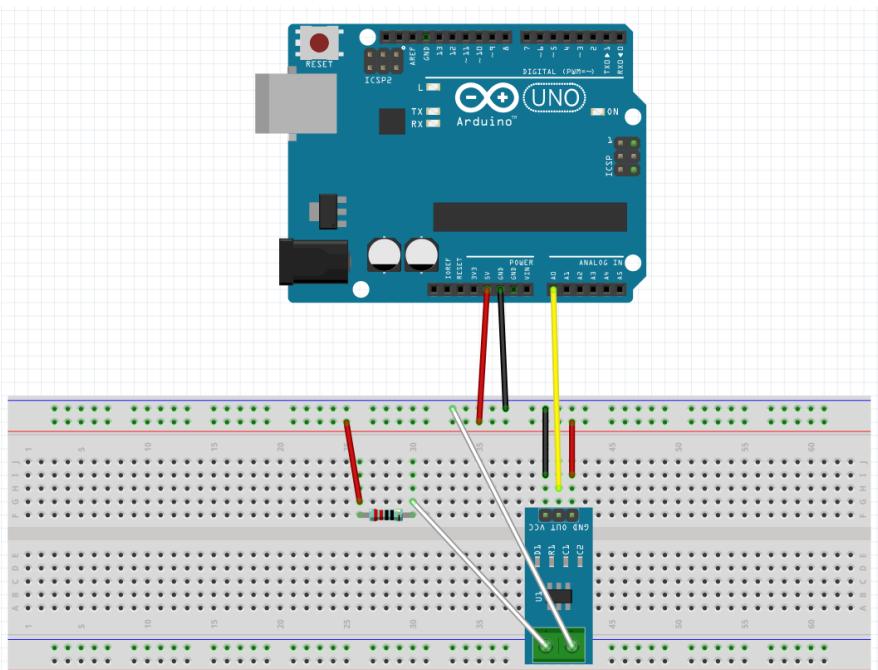


Figura 7. Esquema eléctrico empleado para la determinación del error cometido por el sensor de corriente.



Para realizar este test, se han utilizado los 5 V proporcionados por Arduino y una serie de resistencias, de hasta $10\text{ k}\Omega$. Se realizarán tres medidas diferentes, y así poder obtener unos resultados firmes que muestren si el error cometido por el sensor de corriente es apreciable o no. Los resultados obtenidos se compararán con los obtenidos empleando los mismo 5 V, pero en esta ocasión se medirá la corriente con un multímetro (Klein Tools MM400). Esta corriente medida con el multímetro es la corriente que se empleará como referencia a la hora de comparar los resultados en un gráfico de Bland-Altman.

El sensor de corriente tiene una resistencia interna de $94\text{ }\Omega$. Es una resistencia que a pesar de ser pequeña, cuando se empleen resistencias bajas, sí que se verá afectada la medida obtenida por el sensor.

Como la salida del sensor de corriente no es fija para un mismo valor, ya que tiene cierta oscilación, se tomarán 10 medidas con cada una de las resistencias empleadas y se hará la media de las mismas. Con esta media es con la que se compararán los resultados con el multímetro.

Las resistencias empleadas son de 220, 371.73, 404.76, 680, 820, 1000, 1500, 2200, 3300, 4700, 5600, 6800, 8200 y 10000 Ω .

A continuación se detallan las tres medidas (tablas 1 a 3), acompañadas cada una de ellas por el gráfico de Bland-Altman correspondiente (figuras 8 a 10). En las tablas se han incluido los datos correspondientes a la intensidad teórica del sistema, calculada considerando el voltaje y como resistencia, el valor de las resistencias más los $94\text{ }\Omega$ de la resistencia interna del sensor de corriente.

Tabla 1. 1^a medida de errores del sensor de corriente.

MEDIDA 1				
Voltios (V)	Resistencia (Ω)	Sensor de corriente (mA)	Multímetro (mA)	Teórico sensor (mA)
5	220	18.69	15.93	15.92
	680//820=371.73	10.69	10.81	10.74
	680//1000=404.76	10.00	10.10	10.02
	680	6.67	6.51	6.46
	820	5.71	5.51	5.47
	1,000	4.78	4.62	4.57
	1,500	3.21	3.15	3.14
	2,200	2.33	2.21	2.18
	3,300	1.82	1.49	1.47
	4,700	1.17	1.04	1.04
	5,600	1.08	0.88	0.88
	6,800	0.83	0.72	0.73
	8,200	0.81	0.61	0.60
	10,000	0.69	0.50	0.50

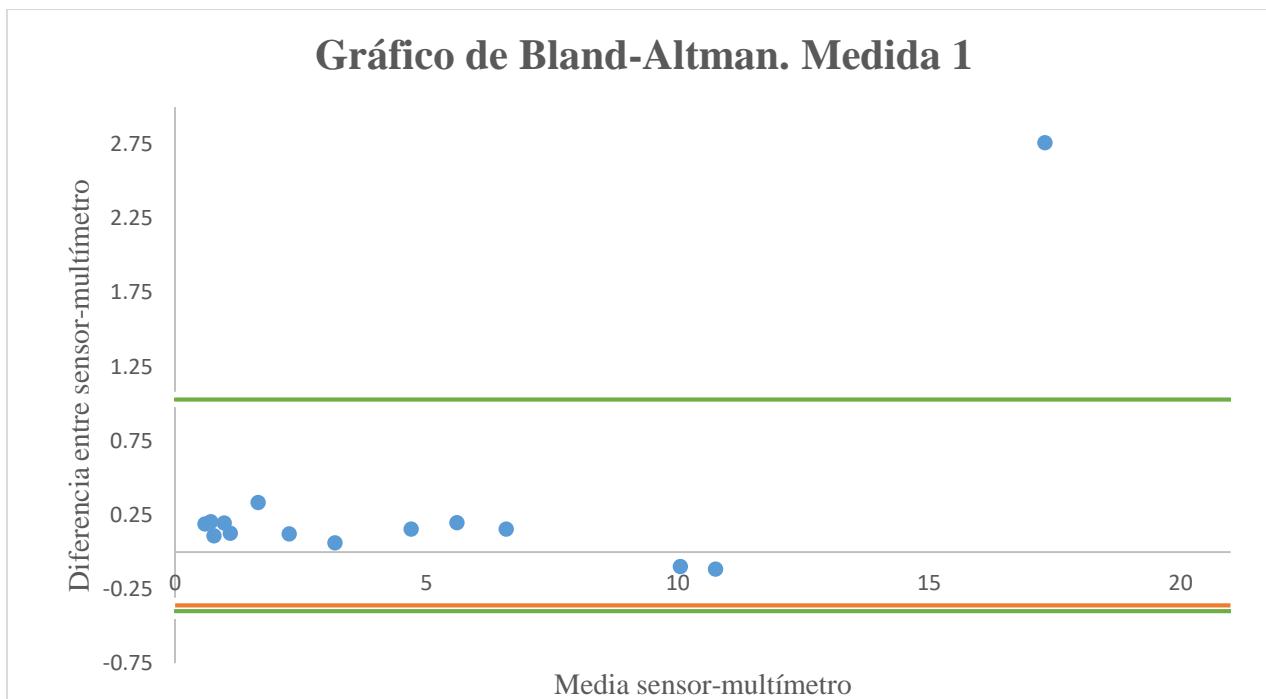


Figura 8. 1^a comparativa Bland-Altman de errores.

Tabla 2. 2^a medida de errores del sensor de corriente.

MEDIDA 2				
Voltios (V)	Resistencia (Ω)	Sensor de corriente (mA)	Multímetro (mA)	Teórico sensor (mA)
5	220	18.99	15.92	15.92
	680//820=371.73	10.73	10.80	10.74
	680//1000=404.76	9.96	10.10	10.02
	680	7.55	6.52	6.46
	820	6.39	5.52	5.47
	1,000	4.91	4.62	4.57
	1,500	3.50	3.15	3.14
	2,200	2.43	2.21	2.18
	3,300	1.75	1.48	1.47
	4,700	1.68	1.04	1.04
	5,600	1.04	0.88	0.88
	6,800	0.90	0.72	0.73
	8,200	0.57	0.61	0.60
	10,000	0.54	0.49	0.50

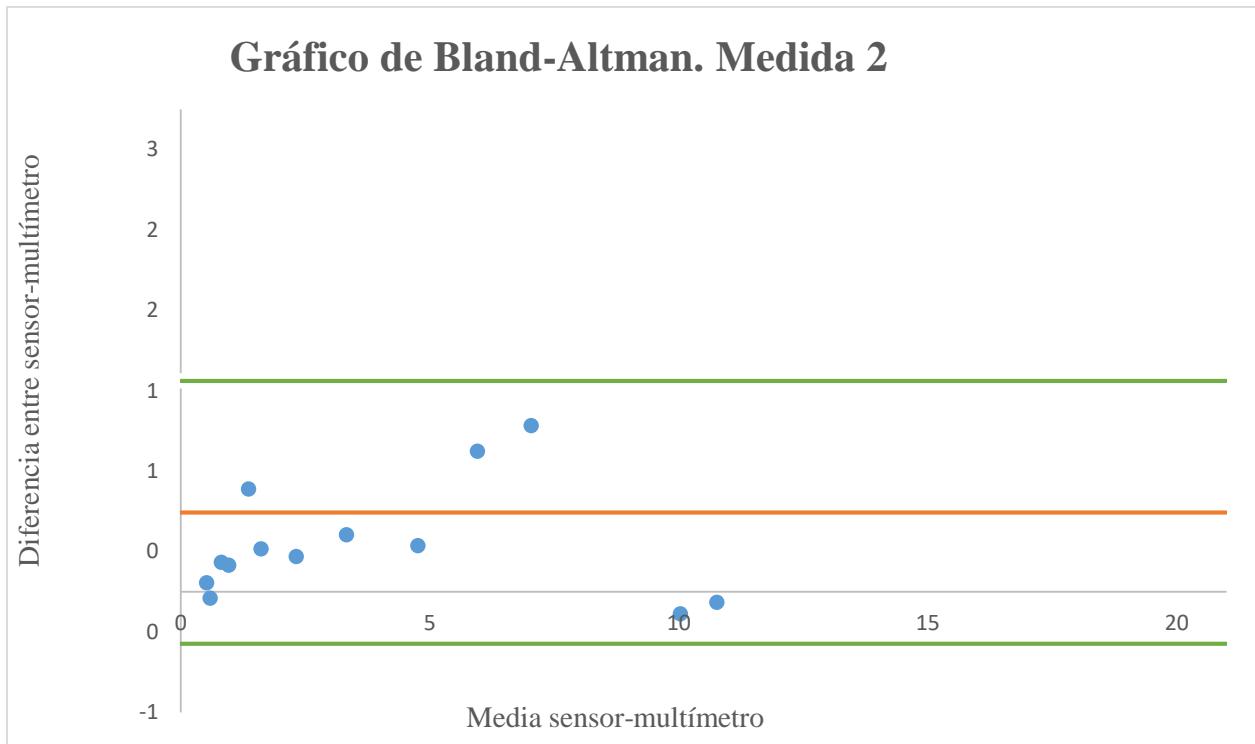


Figura 9. 2^a comparativa Bland-Altman de errores.

Tabla 3. 3^a medida de errores del sensor de corriente.

MEDIDA 3				
Voltios (V)	Resistencia (Ω)	Sensor de corriente (mA)	Multímetro (mA)	Teórico sensor (mA)
5	220	15.83	15.91	15.92
	680//820=371.73	10.90	10.80	10.74
	680//1000=404.76	10.02	10.09	10.02
	680	6.82	6.51	6.46
	820	5.71	5.52	5.47
	1,000	4.92	4.62	4.57
	1,500	3.37	3.15	3.14
	2,200	2.51	2.21	2.18
	3,300	1.59	1.49	1.47
	4,700	1.16	1.04	1.04
	5,600	0.92	0.88	0.88
	6,800	0.73	0.72	0.73
	8,200	0.72	0.61	0.60
	10,000	0.57	0.49	0.50

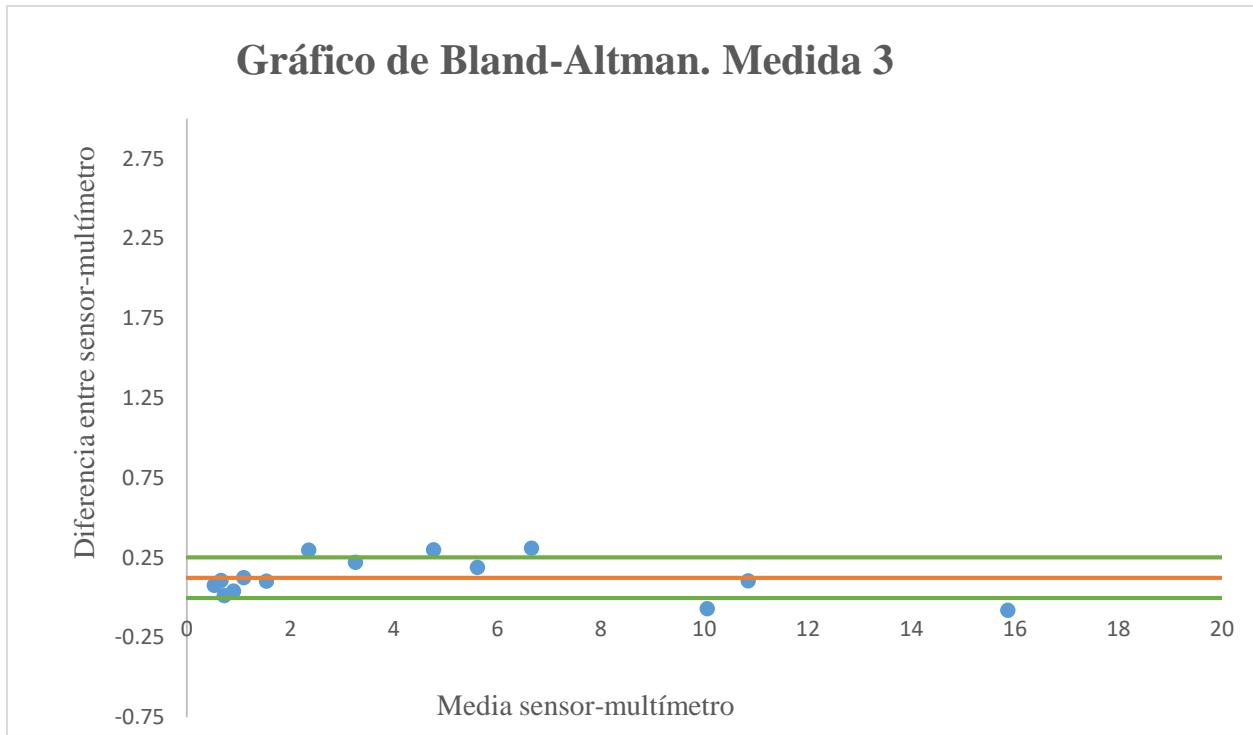


Figura 10. 3^a comparativa Bland-Altman de errores.

6. Metodología experimental.

6.1. Diseño electrónico

El diseño electrónico empleado para la caracterización automática de las células solares, es el mostrado en la figura 11.

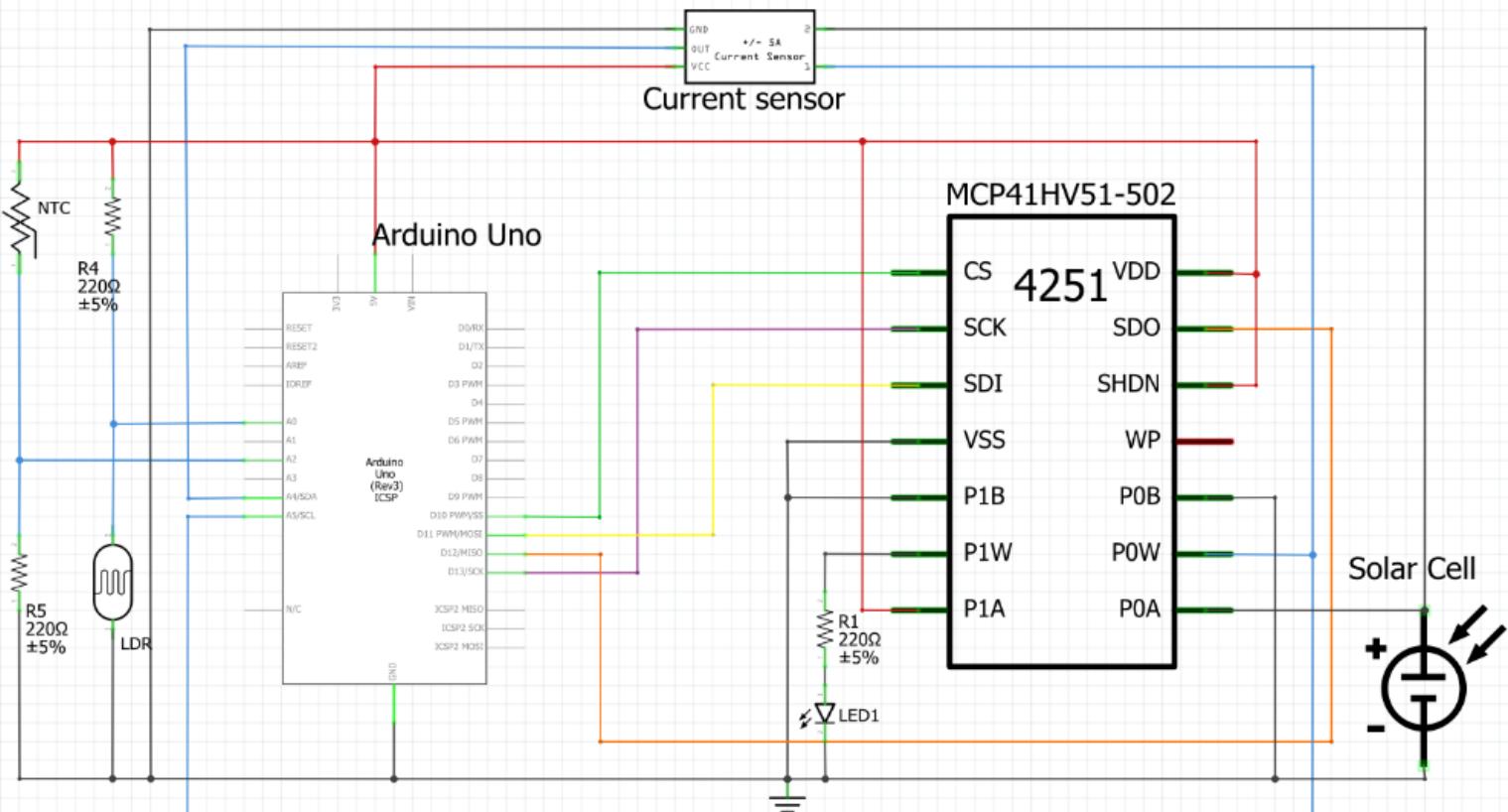


Figura 11. Esquema eléctrico empleado para la caracterización automática de la célula solar.

En el sistema se han integrado, por un lado, el Arduino junto con el potenciómetro digital y el sensor de corriente, y por otro, el Arduino con ambas resistencias variables (NTC y LDR). El microcontrolador, va a ser el encargado, tanto de cambiar el valor del potenciómetro, como a su vez, recibir y mandar al ordenador todos los datos que le proporcionan los diferentes sensores.

Tal y como se puede observar, el Arduino proporciona la tensión de referencia (5 V) empleada como alimentación en el potenciómetro digital, y ambos sistemas de medida de variables meteorológicas, temperatura y luminosidad (NTC y LDR).

Para la LDR se ha empleado un divisor de tensión, conectando la LDR en la parte baja del mismo. La resistencia que se ha empleado en este divisor es de un valor de 220 Ω, ya que el valor nominal de la LDR cuando se trata de iluminación alta (por encima de 10000 lux) es muy bajo, por debajo de los 100 Ω.



En el caso de la NTC también se ha cableado con un divisor de tensión, pero en su caso la NTC va conectada en la parte alta. La resistencia que se ha utilizado es de $5.6\text{ k}\Omega$. Este valor es muy parecido al nominal de la NTC a 25°C ($5\text{ k}\Omega$).

A su vez, la comunicación entre el potenciómetro y el Arduino se realiza mediante los pines SPI del Arduino (pines 10 al 13). A través de esta comunicación se programa el potenciómetro para que haga un barrido desde $5\text{ k}\Omega$ a $0\text{ }\Omega$. Una vez realiza un barrido, empieza de nuevo, pero esta vez, en sentido inverso, de $0\text{ }\Omega$ a $5\text{ k}\Omega$. Simultáneamente, los datos son recogidos mediante el programa PLX-DAQ.

La célula solar se conecta a una de las patillas fijas del potenciómetro y a una de las entradas del sensor de corriente, la patilla variable va conectada a una entrada analógica del Arduino (y de esta manera se lee el valor del voltaje de la célula solar) y también va cableada al sensor de corriente.

Aprovechando la dualidad del potenciómetro, se ha conectado un led en el segundo potenciómetro para comprobar visualmente que el programa y el potenciómetro funcionan correctamente.

6.2. Toma de datos.

Para la realización de la toma de datos, primero de todo se debe cargar el programa en el Arduino. Una vez hecho esto, deberemos abrir el programa PLX-DAQ y cambiar el valor del puerto al mismo que tengamos en la interfaz de Arduino. Con el puerto ya seleccionado, podemos conectar el PLX-DAQ al Arduino y veremos que una vez pasado el tiempo de espera el programa empieza a cargar automáticamente los datos cada vez que detecta un cambio.

Tal y como está diseñado el programa, se realizan dos muestras cada vez que se cambia dos veces el valor del potenciómetro. Esto es, el potenciómetro cambia aproximadamente $40\text{ }\Omega$ y se hacen dos muestras una vez ha cambiado estos $40\text{ }\Omega$. En el cambio de resistencias se realiza una espera de 10 ms, mientras que para cada muestra se realiza una espera de 300 ms, más un cierto valor que emplea el programa PLX-DAQ cada vez que realiza una toma de datos.

Una vez realizado el primer ciclo completo (de $5\text{ k}\Omega$ a $0\text{ }\Omega$), se cogen los últimos 150 datos, ya que son los más relevantes y los que más información aportan. El resto se descartan ya que cuando se encuentra en las resistencias más altas, los valores no difieren demasiado y no aportan demasiada información acerca de la caracterización de la célula solar.



La toma de datos se ha realizado en diferentes días, aprovechando diferentes condiciones climáticas. Esto ha permitido probar el sistema en diferentes condiciones, obteniendo diferentes valores de curvas I-V de la célula solar. A su vez, en cada día de mediciones se han tomado tres mediciones diferentes, empleando un rango de aproximadamente 30 minutos para tomar todas las mediciones. Esto ha hecho que las condiciones de luminosidad y temperatura hayan diferido un poco dentro de la misma medición, pero a su vez, permite realizar una comparación y comprobación de cómo varía la curva I-V según la temperatura y la luminosidad.

6.3. Diagrama de flujo del programa.

La figura 12 muestra el diagrama de flujo del código del programa cargado en Arduino y empleado para la caracterización automática de las células solares. El código tiene un bucle infinito y dentro del mismo tiene dos bucles donde se realizan los cambios de resistencias y toma de datos explicados anteriormente.

Al ser doble el potenciómetro digital se cambia también el segundo potenciómetro y así se va variando la luminosidad del LED colocado en el circuito y que sirve como comprobación para visualizar los cambios de resistencia.

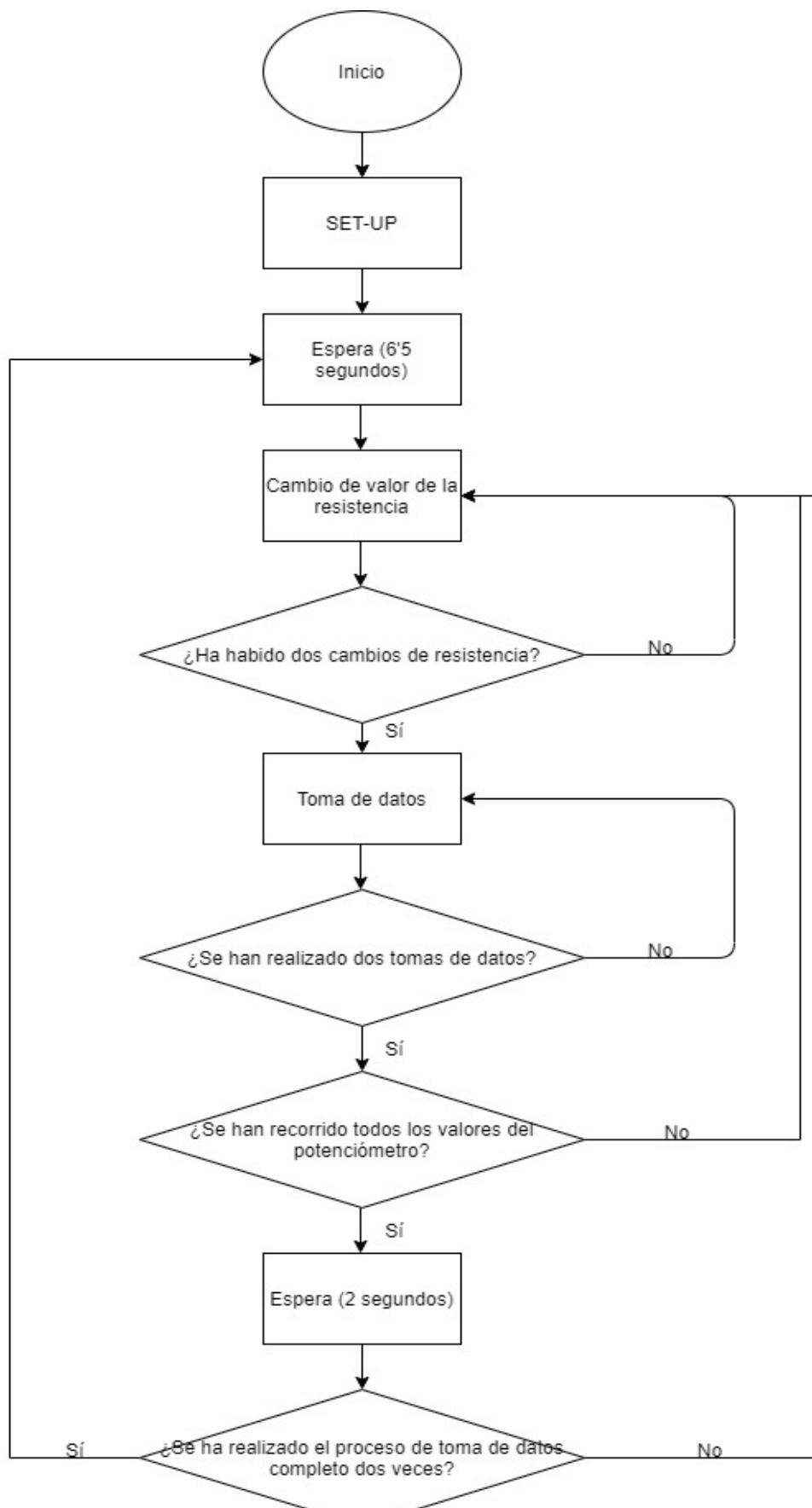


Figura 12. Diagrama de flujo del programa.



7. Resultados experimentales.

Tal y como se ha comentado anteriormente, estos resultados son fruto de la medición en días diferentes y con diferentes condiciones. A continuación se exponen distintos resultados representativos de las pruebas realizadas, junto con el día en el que fueron tomados y la temperatura y luminosidad a la que fueron obtenidos (apartados 7.1, 7.2 y 7.3).

En el apartado 7.4 se incluye un resumen de las distintas pruebas realizadas, donde se muestran los datos de luminosidad, temperatura y potencia máxima (MPP), así como su análisis y explicación.

Adicionalmente, se ha probado el sistema de caracterización automática desarrollado en este trabajo con distintas células solares, comprobando así que el funcionamiento es el mismo sea cual sea la célula empleada. Los resultados de las mediciones con las diferentes células solares se muestran en el apartado 7.5.

Debido a los posibles errores cometidos al estar el sistema implementado sobre una placa de prototipado rápido, posibles errores generados por los elementos propios del sistema y las variaciones climáticas que puedan haber durante la prueba (en ocasiones dentro de la misma prueba no se tenían las mismas condiciones de luminosidad), a cada gráfico que se ha realizado se le ha añadido una línea de tendencia polinómica. Esta línea ayuda a comprobar la forma del gráfico, y además, sirve de referencia para comparar los diferentes gráficos y sus resultados.

7.1. Resultados del 24 de mayo.

Las medidas realizadas este día se hicieron de 17:30 a 18:00. Los valores de luminosidad y temperatura media durante la prueba son los mostrados en la tabla 4, y los resultados obtenidos se muestran en la figura 13.

Tabla 4. Valores de luminosidad y temperatura para la prueba del día 24/05/2020.

	Luminosidad (lux)	Temperatura (°C)
Medida 1	6516	25.88
Medida 2	6946	25.73
Medida 3	7566	25.76

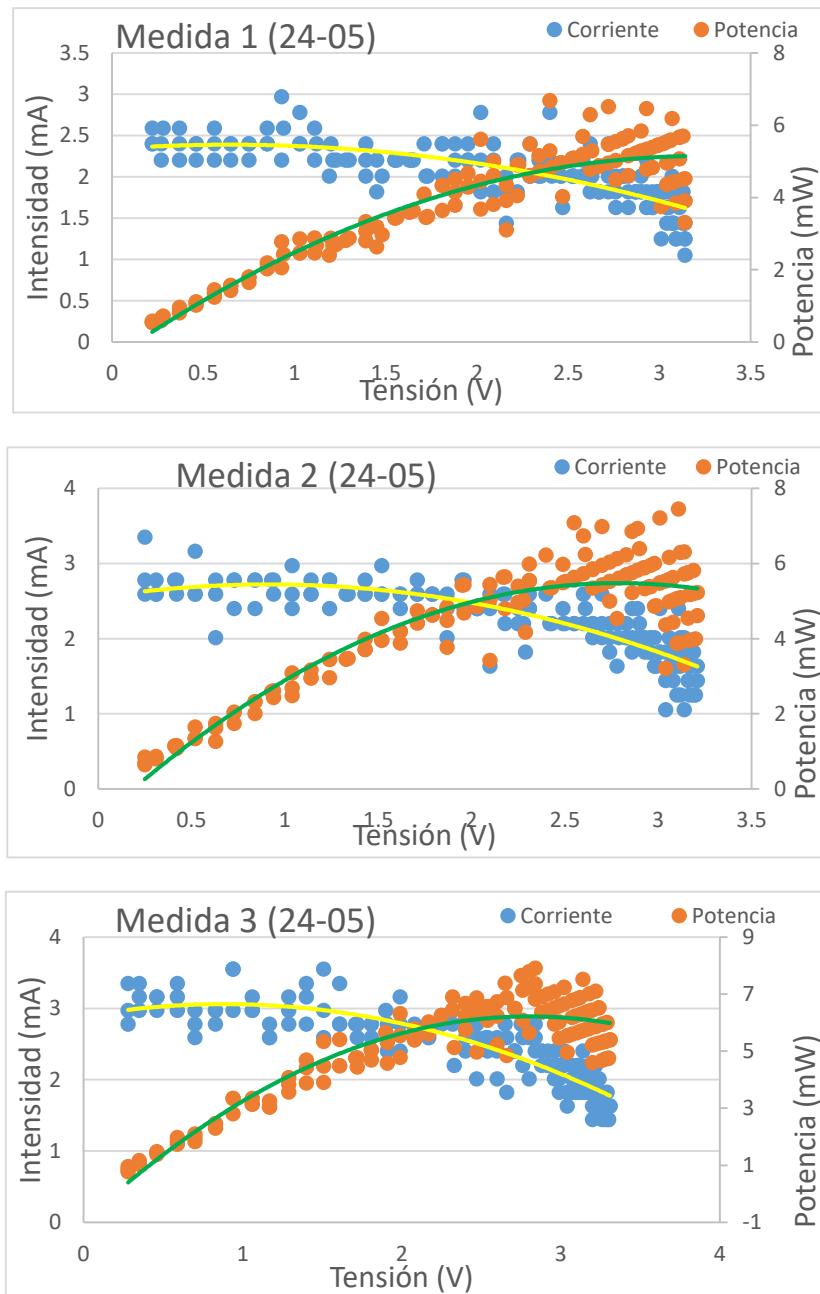


Figura 13. Curvas intensidad-tensión y potencia-tensión para la prueba del día 24/05/2020. Los datos de temperatura y luminosidad para ese mismo día son los mostrados en la tabla 4.

7.2. Resultados del 25 de mayo.

Las medidas realizadas este día se hicieron de 18:30 a 19:00. Los valores de luminosidad y temperatura media durante la prueba son los mostrados en la tabla 5, y los resultados obtenidos se muestran en la figura 14.

Tabla 5. Valores de luminosidad y temperatura para la prueba del día 25/05/2020.

	Luminosidad (lux)	Temperatura (°C)
Medida 1	8596	23.4
Medida 2	8152	23.67
Medida 3	7986	23.67

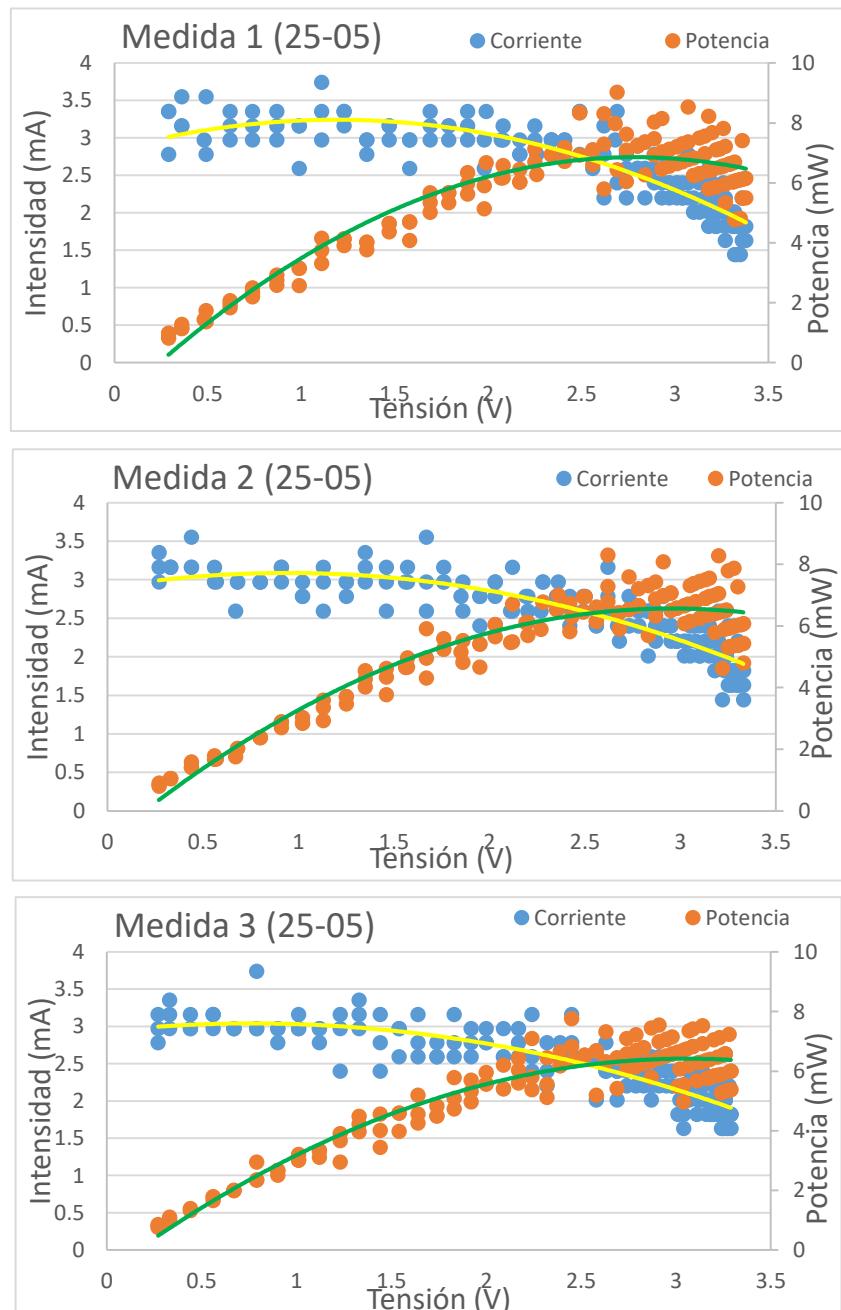


Figura 14. Curvas intensidad-tensión y potencia-tensión para la prueba del día 25/05/2020. Los datos de temperatura y luminosidad para ese mismo día son los mostrados en la tabla 5.

7.3. Resultados del 4 de junio.

Las medidas realizadas este día se hicieron de 13:00 a 13:30. Los valores de luminosidad y temperatura media durante la prueba son los mostrados en la tabla 6, y los resultados obtenidos se muestran en la figura 15.

Tabla 6. Valores de luminosidad y temperatura para la prueba del día 04/06/2020.

	Luminosidad (lux)	Temperatura (°C)
Medida 1	17740	22.81
Medida 2	18192	23.7
Medida 3	12095	22.25

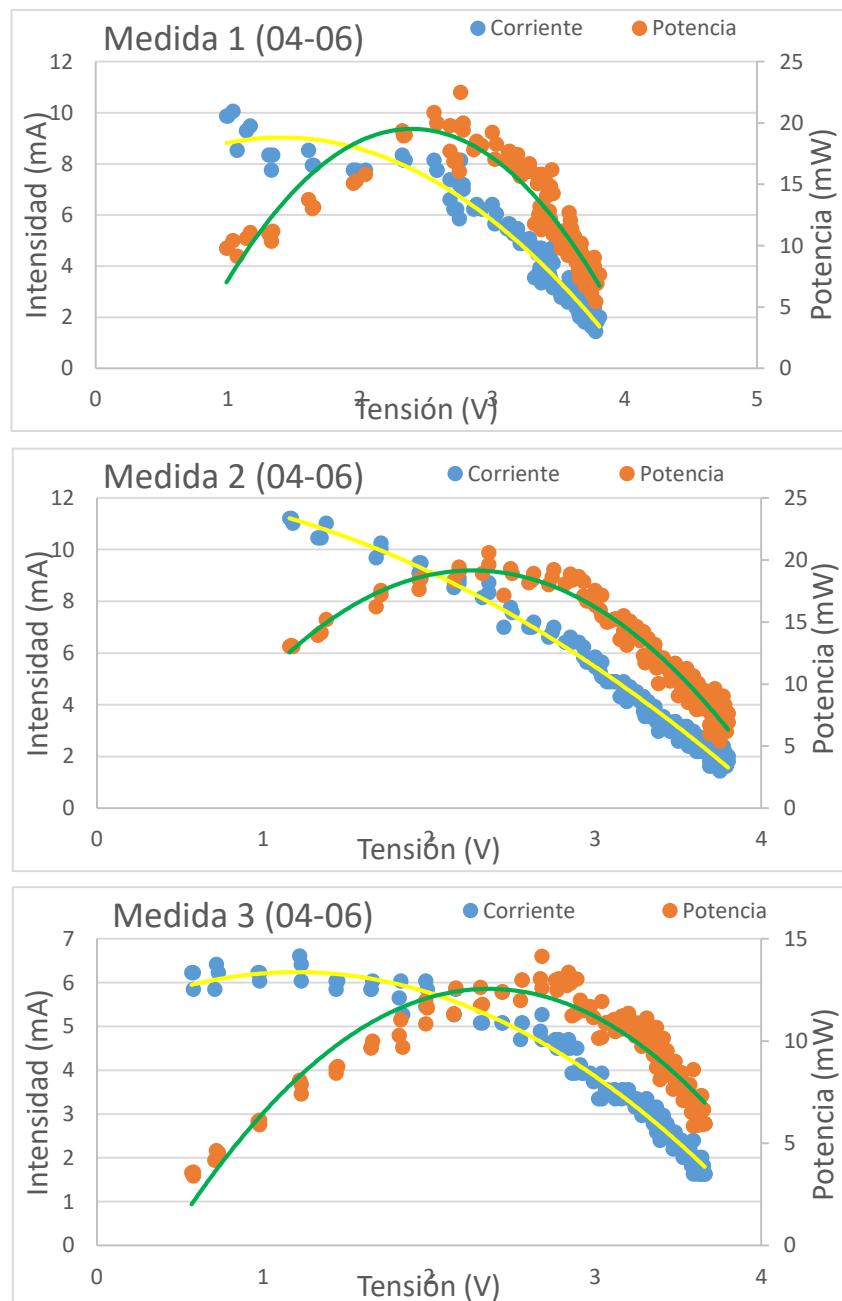


Figura 15. Curvas intensidad-tensión y potencia-tensión para la prueba del día 04/06/2020. Los datos de temperatura y luminosidad para ese mismo día son los mostrados en la tabla 6.

7.4. Análisis de las tendencias.

Una vez obtenidos los datos, se va a realizar una comparativa (Tabla 7) entre los mismos y de esta manera ver si como se esperaba, al aumentar la luminosidad y disminuir la temperatura, se obtienen valores de potencia mayores.

Tabla 7. Valores más significativos de cada medición realizada.

	Luminosidad (lux)	Temperatura (°C)	Máxima potencia (mW)
Medida 1.1 - 24/05	6516	25.88	6.68
Medida 1.2 – 24/05	6946	25.73	7.45
Medida 1.3 – 24/05	7566	25.76	7.91
Medida 2.1 - 25/05	8596	23.4	9.02
Medida 2.2 – 25/05	8152	23.67	8.29
Medida 32. – 25/05	7986	23.67	7.76
Medida 3.1 - 04/06	17740	22.81	22.5
Medida 3.2 – 04/06	18192	23.7	20.59
Medida 3.3 – 04/06	12095	22.25	14.14

La variación de temperatura en el primer set de mediciones (medidas 1.1-1.3) es mínima entre los tres valores. Sin embargo, sí que se aprecia un valor más elevado de luminosidad, en la medida 1.3. Tal y como era previsible, en esta medida 1.3, al mantener el mismo valor de temperatura, pero la luminosidad sobre la célula ser mayor, se obtiene el máximo valor de potencia.

Los mismos resultados se obtienen en el segundo set de mediciones (medidas 2.1-2.3). Como se puede ver, se dan las condiciones perfectas para que la primera medida (medida 2.1) sea en la que más potencia se obtenga, al tener la temperatura más baja y luminosidad más alta.

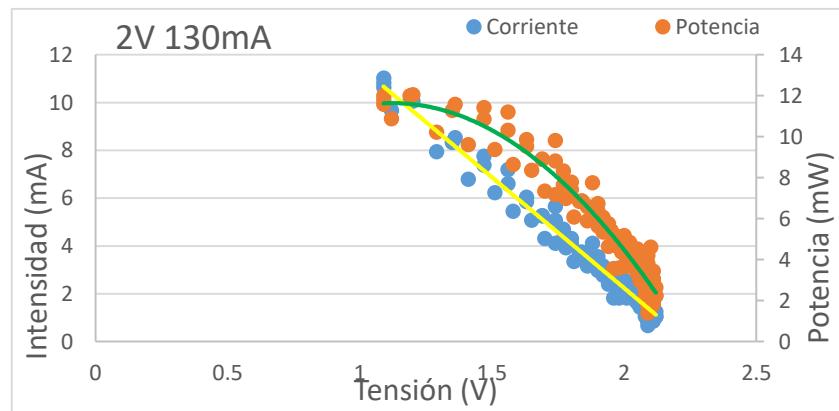
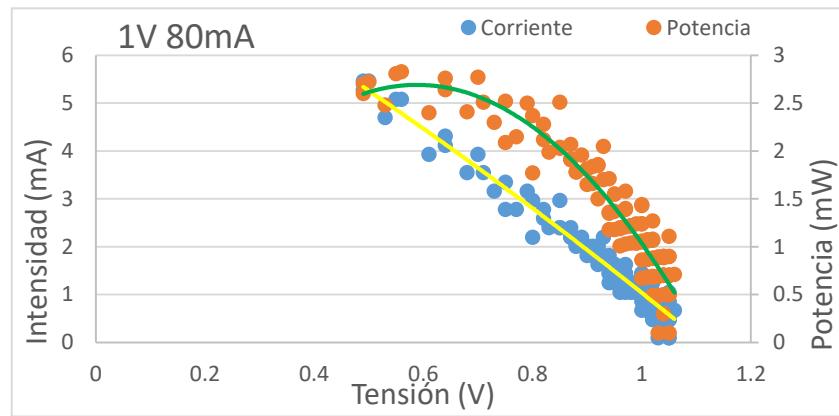
Con respecto al tercer set de mediciones, los resultados hacen que el análisis sea más complejo. Por un lado, en la tercera medición (medida 3.3) se da la temperatura más baja, pero a la vez la luminosidad durante esa medida fue mucho menor que durante las otras dos, por lo que es previsible que la potencia obtenida sea mucho menor y no se deban tener muy en cuenta esos resultados a la hora de realizar comparativas. La comparativa en esta medición se encuentra realmente entre la segunda medida y la primera. Por un lado tenemos que en la segunda medición (medida 3.2) se produce una mayor luminosidad (alrededor de 450 lux de diferencia), pero sin embargo la diferencia de temperaturas entre ambas medidas nos indica que la segunda medida es un grado más elevada. Estos resultados nos pueden indicar que la temperatura es más crítica que la luminosidad en el caso de esta célula solar.

7.5. Pruebas adicionales.

Adicionalmente, se realizó una medida con cada una de las cuatro células solares diferentes cuyas características ya han sido explicadas previamente. La tabla 8 muestra las condiciones en las que se realizó cada una de las mediciones y la figura 16 los resultados experimentales obtenidos. Se realizaron el 4 de junio de 2020 todas ellas, pero la climatología fue cambiante y por ello los valores de luminosidad y temperatura son tan dispares.

Tabla 8. Valores característicos de cada una de las medidas de las pruebas adicionales.

	Luminosidad (lux)	Temperatura (°C)	Potencia máxima (mW)
1V 80 mA	6228	20.76	2.83
2V 130 mA	9597	21.41	12.05
0.5V 130 mA	11630	21.96	0.82
3V 150 mA	26803	26.77	28.3



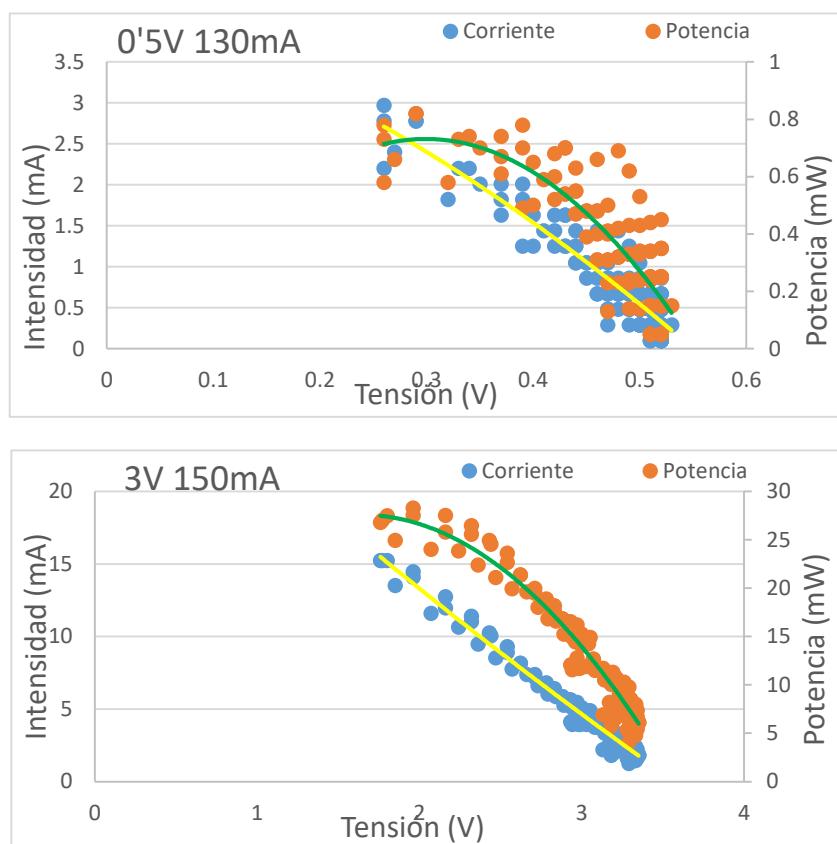


Figura 16. Curvas intensidad-tensión y potencia-tensión para las pruebas adicionales. Los datos de temperatura y luminosidad para ese mismo día son los mostrados en la tabla 8.

8. Discusión.

Son varios los aspectos a comentar:

8.1. Acerca del sensor de corriente.

Tal y como se muestra en los gráficos de Bland-Altman previamente presentados se puede concluir que el error que induce el sensor de corriente, no es significativo. En todas las gráficas la gran mayoría de puntos quedan dentro de la suma media de las diferencias más desviación típica de las diferencias. Parece ser que el error que quizás cometa el sensor de corriente es mayor para resistencias bajas (el punto que suele quedar fuera de los márgenes es el de la resistencia de 220Ω).

Sí que queda patente que este sensor no acaba de ser exacto, pero en comparación con un multímetro, el error cometido por el sensor es aceptable para las magnitudes que se miden.



8.2. Acerca de los resultados.

Los resultados obtenidos son cercanos a los esperados. Si bien se esperaban curvas I-V con una forma más parecida a la explicada en los puntos 4.1 y 4.2 de esta misma memoria, la forma de las curvas obtenidas no difiere demasiado con las curvas ideales. Ciertamente se deben poner los datos en contexto, ya que no todos los días las condiciones fueron las mismas.

Se puede observar, que, efectivamente cuando a la célula solar le incide una mayor luminosidad, la curva I-V “sube” y también se ve un aumento significativo en la potencia. Esto se ve claramente comparando los días 24 y 25 de mayo con el día 4 de junio. El último día la luminosidad fue muy elevada (más de 10000 lux durante toda la prueba), mientras que los otros dos días la luminosidad más bien fue poca (6500 lux a 8500, valores estimados), ya que estos días el parte meteorológico indica que había nubes. Esta curva I-V se ve más pronunciada cuanto mayor es la incidencia solar, como se ve en las medidas del día 4 de junio.

Con respecto a la curva de potencia, en todas las gráficas hay un máximo claro, que nos indicaría que es el punto de máxima potencia (MPP). Con los resultados obtenidos, se tiende a ver que a mayor luminosidad, la curvatura de esta gráfica es mayor, siendo el punto de máxima potencia más claro cuanto mayor es la luz que incide en la célula solar.

Las pruebas adicionales muestran claramente que independientemente de que las células solares posean diferentes características, una mayor luminosidad conlleva una mayor potencia emitida por la célula. Se debe observar también, que a pesar que la luminosidad aumenta conforme las diferentes pruebas, la temperatura hace lo propio y por ello quizás los valores de corriente no sean tan elevados como podría esperarse.

A pesar de que las células solares deban estar siempre bien iluminadas y en la medida de lo posible a temperaturas bajas, el hecho de que los resultados se hayan tomado en días diferentes con diversas condiciones climáticas ayuda a la comparativa de los resultados, así como a poder ver qué muestran estos resultados y si todo lo obtenido era lo esperado.



9. Conclusiones

Tal y como se ha podido comprobar, el sistema funciona correctamente y los resultados obtenidos así lo demuestran. Si bien es cierto que la caracterización, en ciertos casos no llega a ser completa, ya que las gráficas no son exactamente iguales a las teóricas, este sistema permite caracterizar rápidamente células solares. El hecho de que una vez implementado el circuito, y con los dos programas necesarios (PLX-DAQ e interfaz de Arduino) sea posible la caracterización, sin ayuda de ningún elemento externo, hace muy sencillo su uso.

Al ser un proyecto Arduino, la explicación del proyecto, el código y los diferentes esquemas estarán disponibles en la web de programación GitHub([21](#)). Es una manera de compartir los conocimientos con otras personas que estén interesadas en este tema y a las cuales les interese disponer de un sistema parecido para caracterizar células solares.

9.1. Posibles mejoras.

Las posibles mejoras a implementar en este sistema no han sido implementadas a la hora de realizarlo debido a distintos factores tales como la falta de recursos, originado principalmente por el estado de alarma del COVID-19. Estas posibles mejoras son:

- *Diseño de una placa de circuito impreso.* Tal y como se ha comentado, los resultados obtenidos pueden ser mejores si se eliminase el ruido producido por los diversos cables y la placa de prototipado rápido. Sería mucho más sencillo implementar todo el sistema en un circuito impreso, donde se eliminarían estos posibles ruidos, a la vez que se haría que el sistema fuera mucho más sencillo de transportar y manejar.

- *Implementación del sistema en una base de apoyo más óptima.* Siguiendo con el punto anterior, con el sistema ya en el circuito impreso, se podría diseñar un elemento en 3D y realizar su impresión, para disponer de un sistema compacto y sencillo de transportar. Esto haría que la realización de medidas fuera mucho más fácil de tomar en cualquier condición y lugar.

- *Sensor de corriente.* Si bien el sensor de corriente empleado ha sido suficiente, y tal y como se ha demostrado, el error inducido por el mismo no es significativo, usar otro sensor de corriente diferente habría sido una posible mejora. Es cierto que actualmente en el mercado no hay gran variedad de sensores de corriente que sean útiles para medir corrientes tan pequeñas y con poco error, pero otros sensores más adaptados al entorno y electrónica de Arduino (ACS723 o ACS712) probablemente habría sido mejor. Además,

otro de los inconvenientes del sensor empleado, es su diseño físico, ya que implementarlo en la placa de prototipado rápido ha sido ciertamente difícil debido a la poca distancia entre sus diferentes patillas y a la complejidad que conlleva soldar los cables en sus extremos.

• *Células solares más potentes.* El uso de células solares con algo más de potencia nominal y con voltaje y corriente máximos más elevados, hubiera hecho que los errores cometidos fueran menores y habría permitido obtener gráficas más similares a las teóricas. Por otra parte, esto tampoco ha sido posible, ya que las entradas analógicas de Arduino sólo permiten como máximo 5 V de entrada, con lo cual empleando otras células solares quizá se habría tenido que implementar un sensor de voltaje en el circuito.

10. Bibliografía

1. Mancini T, Kolb GJ, Prairie M. “Solar Thermal Power”, Advances in Solar Energy: An Annual Review of Research and Development. In: Boer KW, editor. Boulder, CO: American Solar Energy Society; 1997.
2. Enermodal Engineering Limited. Marbek Resource Consultants Ltd. World Bank. Cost Reduction Study for Solar Thermal Power Plants: Final Report. Enermodal Engineering Limited, editor. 1999. 115 p.
3. Diwania S, Agrawal S, Anwar , Siddiqui S, Singh · Sonveer, Siddiqui AS, et al. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. Int J Energy Environ Eng [Internet]. 2020 [cited 2020 Apr 2];11(3):33–54. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>
4. Balenzategui J. Fundamentos De La Conversión Fotovoltaica. 2008;1–13.
5. Wikipedia. p–n junction [Internet]. [cited 2020 Apr 20]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/P–n_junction
6. Lynn PA. Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics . John Wiley & Sons, editor. 2010.
7. Hanania J, Stenhouse K, Donev J. Photovoltaic effect - Energy Education [Internet]. 2015 [cited 2020 Mar 25]. Available from: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect
8. Phelan PE, Wani C, Gupta KK. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Towards improving the performance of solar photovoltaic energy system: A review Recent citations Effects of Rooftop Photovoltaics on Building Cooling Demand and Sensible Heat Flux Into the Environment for an Installation on a White Roof Towards improving the performance of solar photovoltaic energy system: A review. 2019;
9. NREL. National Renewable Energy Laboratory Photovoltaic Research: Best Research-Cell Efficiency Chart [Internet]. 2019 [cited 2020 Apr 8]. Available from: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
10. Shubbak MH. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. 2019 Nov;
11. Arduino. Arduino - AboutUs [Internet]. [cited 2020 Apr 14]. Available from: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>

12. Arduino Community. 33 solar Projects [Internet]. [cited 2020 Apr 14]. Available from: <https://create.arduino.cc/projecthub/projects/tags/solar>
13. Catuogno C, Catuogno G. Fault Tolerant Control in three and six-phase PM and SynR Machines View project UAV autonomos de largo alcance-Long-range autonomous UAVs View project [Internet]. 2019 [cited 2020 Jun 16]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/336085788>
14. Chikate B V, Sadawarte YA. The Factors Affecting the Performance of Solar Cell. International Journal of Computer Applications. 2015.
15. Chegaar M, Hamzaoui A, Namoda A, Petit P, Aillerie M, Herguth A. Effect of illumination intensity on solar cells parameters. Vol. 36, Energy Procedia. Elsevier Ltd; 2013.
16. Fesharaki VJ, Dehghani M, Fesharaki JJ, Tavasoli H. The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency. 2011.
17. SunFields. Módulo Fotovoltaico: Parámetros Fundamentales [Internet]. [cited 2020 Apr 22]. Available from: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-parametros-fundamentales/>
18. Popa GN, Diniş CM, Deaconu SI. Study on a maximum power point tracking controller for photovoltaic panels. 2019;
19. Vamne J, Arya R. A Review on different Maximum Power Point Tracker (MPPT) Techniques for PV and wind Systems. Int J New Innov Sci Technol. 2019;7(1):70–7.
20. NetDevil. PLX-DAQ version 2 [Internet]. [cited 2020 May 15]. Available from: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=437398.msg3013761#msg3013761>
21. Abril J. GitHub -Automatic-characterization-of-photovoltaic-solar-modules: Automatic characterization of photovoltaic solar modules with an Arduino Uno, digital pot MCP4251, current sensor CSLW6B40M and a solar cell. [Internet]. [cited 2020 May 15]. Available from: <https://github.com/JaimeAbril/Automatic-characterization-of-photovoltaic-solar-modules>