



TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

**CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE
CÉLULAS SOLARES DE SILICIO EN
DIFERENTES CONDICIONES DE
ILUMINACIÓN**

ELENA ÁLVAREZ CASTRO

TUTOR:
JUAN ANTONIO LÓPEZ VILLANUEVA



Facultad de Ciencias
Universidad de Granada



UNIVERSIDAD DE GRANADA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE CÉLULAS SOLARES DE SILICIO EN
DIFERENTES CONDICIONES DE ILUMINACIÓN

Autor: Elena Álvarez Castro

Director: Juan Antonio López Villanueva

Departamento: Electrónica y Tecnología de Computadores

Palabras clave:

Fotovoltaico, Célula Fotovoltaica, Característica I-V, Panel Solar, Modelo, LED.

Resumen:

Este informe propone un sistema de extracción experimental de las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos y la posterior verificación de diferentes modelos teóricos que describen el funcionamiento de dichos paneles. La extracción de los datos se realiza en diferentes condiciones de iluminación, tanto naturales como artificiales para verificar un amplio rango de condiciones ambientales. Los modelos teóricos se basan en diferentes propuestas de investigadores en el ámbito de la extracción de parámetros de las curvas no lineales de las células fotovoltaicas.

Para su implementación y visualización se utiliza Matlab y/o Octave. La conexión entre la extracción experimental de datos, la visualización y la verificación de modelos se automatiza utilizando los protocolos de Internet, trabajando con los datos en tiempo real.



UNIVERSIDAD DE GRANADA

INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTORIZACIÓN DE LECTURA DE
TRABAJO FIN DE CARRERA

D. Juan Antonio López Villanueva profesor del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada, como director del Trabajo Fin de Grado titulado '*Caracterización y modelado de células solares de silicio en diferentes condiciones de iluminación*' y realizado por la alumna Dña. Elena Álvarez Castro.

CERTIFICA: que el citado Trabajo Fin de Grado, ha sido realizado y redactado por dicho alumno y autorizan su presentación.

Granada,

Fdo. Juan Antonio López Villanueva



UNIVERSIDAD DE GRANADA

INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

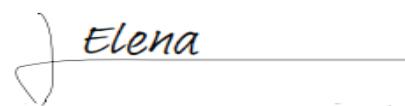
AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO EN LA BIBLIOTECA

Yo, Dña. Elena Álvarez Castro con DNI 75576450-Z autora del Trabajo Fin de Grado titulado '*Caracterización y modelado de células solares de silicio en diferentes condiciones de iluminación*' realizado en la Universidad de Granada

DECLARO: explícitamente que asumo la originalidad del trabajo, entendida en el sentido de que no ha utilizado fuentes sin citarlas debidamente.

AUTORIZO: al depósito de dicho Trabajo en la Biblioteca de la Universidad de Granada, y de la visualización a través de Internet.

Granada,


Elena

Fdo. Dña. Elena Álvarez Castro

Resumen

Este informe propone un sistema de extracción experimental de las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos y la posterior verificación de diferentes modelos teóricos que describen el funcionamiento de dichos paneles. La extracción de los datos se realiza en diferentes condiciones de iluminación, tanto naturales como artificiales para verificar un amplio rango de condiciones ambientales. Los modelos teóricos se basan en diferentes propuestas de investigadores en el ámbito de la extracción de parámetros de las curvas no lineales de las células fotovoltaicas.

Para su implementación y visualización se utiliza Matlab y/o Octave. La conexión entre la extracción experimental de datos, la visualización y la verificación de modelos se automatiza utilizando los protocolos de Internet, trabajando con los datos en tiempo real.

Palabras Clave

Fotovoltaico, Célula Fotovoltaica, Característica I-V, Panel Solar, Modelo, LED.

Abstract

This paper proposes a system of experimental extraction of the electrical characteristics of the photovoltaic panels and the subsequent verification of different theoretical models that describe the operation of these panels. The extraction of the data is done in different lighting conditions, both natural and artificial to verify a wide range of environmental conditions. The theoretical models are based on different proposals of researchers in the field of extraction of parameters of the non-linear curves of photovoltaic cells. Matlab and / or Octave are used for its implementation and visualization. The connection between experimental data extraction, visualization and model verification is automated using Internet protocols, working with data in real time.

Key Words

Photovoltaic, Photovoltaic cell, I-V characteristic, PV panel, Model, LED.

Índice general

1. Objetivos	1
2. Introducción	3
3. Células Fotovoltaicas	5
3.1. Curva Característica I-V	6
3.1.1. Características del panel Solar Utilizado	8
3.2. Modelado de Células Fotovoltaicas	8
3.2.1. Modelos	9
3.2.2. Comparación de Modelos	11
4. Circuito Trazador de Curvas	13
4.1. Diseño Circuito Trazador de Curvas I-V	13
4.2. Implementación del Circuito de medida	15
4.3. Microcontrolador y conexión Ethernet	16
4.4. Software de Medida y control	18
4.4.1. Algoritmo de toma de Muestras	19
4.4.2. Sistema de Comunicación con MatLab	20
4.4.3. Curvas Obtenidas	22
5. Métodos Utilizados en la Estimación de Parámetros	25
5.1. Método Propuesto Randy Williams [10]	25
5.2. Método Xiao [4]	26
5.3. Método Silva [4]	27
5.4. Método Villalva [4]	28
5.5. Procedimiento General de Cálculo	29
5.6. Resultados Obtenidos	29
5.6.1. Método Randy Williams	30
5.6.2. Método Xiao	31
5.6.3. Método Silva	34
5.6.4. Método Villalva	35
5.7. Comparación Resultados de los Métodos utilizados	36
6. Fuente de Iluminación	41
6.1. Diseño	41
6.2. Implementación	43
6.3. Curvas Obtenidas con Fuente de Iluminación. Eficiencia.	43
7. Caracterización con diferentes niveles de Iluminación	51
8. Conclusión	67
A. Scripts MatLab	69

B. Programa Arduino	89
Bibliografía	97

1. Objetivos

El objetivo es realizar un sistema de adquisición de datos experimentales, de una placa solar (Curvas I-V), bajo diferentes condiciones de iluminación y obtener el modelado matemático de dichos datos.

El sistema se diseña con objetivos didácticos para aquellas asignaturas relacionadas con dispositivos fotovoltaicos; con el fin de que pueda ser utilizado en prácticas laboratorio, facilitando la visualización experimental frente a modelos teóricos de dichos dispositivos.

Para esta finalidad, se describen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un circuito trazador de curvas con el fin de obtener la característica corriente-tensión experimental de un panel fotovoltaico. A partir de este diseño, construir un prototipo que sirva como prueba de concepto. Para ello se definen una serie de especificaciones del circuito, basadas en las características del panel fotovoltaico que se va a utilizar como dispositivo de test:
 - Rango de corriente medida: de 0.02 a 0.32 A.
 - Rango de tensión medida: de 0 a 22 V.
 - Tiempo de medida de una curva I-V completa: menos de un segundo, entre 300 y 500 milisegundos.
- Comunicar con MatLab para la visualización automática de datos experimentales, extraer los datos característicos de la placa en las condiciones ambientales dadas y generar el comportamiento teórico a partir de estos datos característicos. La comunicación entre el software de procesamiento matemático y la extracción de datos se realiza mediante los protocolos de Internet: capa física y de enlace Ethernet; capa de red y transporte tcp/ip y en la capa de aplicación HTTP. Esta comunicación permite la automatización de todo el proceso:
 - Captura de datos
 - Visualización de datos experimentales
 - Extracción de características de la placa
 - Generación de diferentes modelos matemáticos
 - Comparación de los resultados experimentales con los propuestos por los diferentes modelos.
- Diseñar e implementar una fuente de radiación alternativa con el objetivo de controlar la variación de las condiciones de iluminación. El sistema de iluminación deberá generar una radiación que varíe de forma controlada permitiendo proporcionar diferentes condiciones ambientales para realizar las medidas.
- Desde el punto de vista físico el sistema diseñado debe ser manejable, no muy pesado, con el fin de poder transportarlo con facilidad.

2. Introducción

Actualmente, la energía solar fotovoltaica es una de las alternativas renovables más viables a los combustibles fósiles, junto con la energía eólica e hidráulica. Después de estas dos últimas, la energía solar es la tercera fuente de energía renovable capaz de generar mayor densidad de potencia [5].

Un dispositivo fotovoltaico (o PV del inglés Photovoltaic) es un elemento que convierte la energía de la luz en Electricidad. El dispositivo PV elemental es la célula fotovoltaica. Un conjunto de células conectadas forman un panel o módulo. Un conjunto de paneles solares conectados forman un sistema fotovoltaico.

Estos sistemas, se pueden clasificar en tres categorías [6]:

- Sistemas Aislados: suelen usarse en lugares donde no existe conexión a la red eléctrica o es de difícil acceso. La mayoría constan de dispositivos de almacenamiento de energía, puesto que, por la noche, el sistema PV no es capaz de suministrar energía. El dimensionamiento de estos sistemas debe cubrir, tanto la demanda de energía como la recarga de baterías. Requiere de un sistema de conversión para procesar la electricidad que estos dispositivos proporcionan. Los sistemas de conversión son usualmente convertidores DC/DC. Éstos se encargan de regular el voltaje y la corriente que pueda adquirir la carga, para controlar la potencia que las placas solares suministran o para sistemas de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT) [11]. La salida del convertidor se puede conectar a un sistema inversor, obteniéndose una fuente de tensión alterna.
- Sistemas Conectados a la red: a diferencia de los anteriores, éstos sistemas no suelen estar provistos de baterías, pues, la energía producida a través de un inversor, es compatible con la red eléctrica y canalizada a ella.
- Sistemas Híbridos: se trata de complementar un sistema aislado, conectándolo con otra fuente de energía, ya sea renovable o no. Esto garantiza el suministro eléctrico, sin depender de baterías.

Cuando se interconectan un número elevado de paneles pueden proporcionar altos niveles de potencia, suministrando energía suficiente para cubrir las necesidades de una comunidad de viviendas o de instalaciones industriales.

Para realizar un buen dimensionamiento de los convertidores utilizados para regular el voltaje y la corriente, primero se necesita saber cómo se comportan las células solares desde el punto de vista eléctrico. Los dispositivos PV presentan una característica I-V no lineal con diversos parámetros teóricos. Es necesario conocer éstos parámetros para encontrar un modelo teórico que se aproxime adecuadamente a la característica experimental.

Un sistema que englobe la captación de las curvas experimentales y su posterior modelado matemático es esencial para realizar análisis dinámicos de los convertidores DC/DC, optimización de los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia y simular el comportamiento de los paneles solares con el fin de mejorar su eficiencia y los procesos de fabricación.

En este trabajo se pretende diseñar un sistema capaz de trazar curvas I-V de forma experimental, bajo condiciones de iluminación tanto natural como artificial. En este segundo caso será controlable, de forma que, se podrán crear diferentes niveles de iluminación. El diagrama de bloques del sistema aparece presentado en la Figura 2.1.

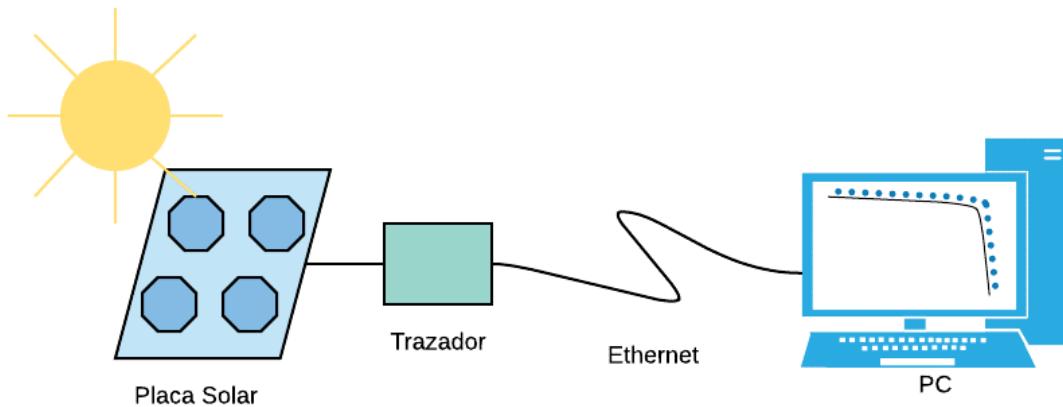


Figura 2.1.: Diagrama de bloques del sistema.

El uso de este sistema en prácticas de laboratorio permitirá una mayor comprensión de los algoritmos teóricos, de los cuales se extraen los parámetros que modelan las curvas I-V. Estos conceptos pueden llegar a ser muy abstractos, si no se llevan a a práctica. Su montaje será de unas dimensiones pequeñas, que permita su transporte y la realización de modificaciones.

3. Células Fotovoltaicas

Una célula fotovoltaica (PV), también llamada célula solar, es esencialmente un diodo semiconductor cuya unión P-N está expuesta a la luz. Al incidir la luz en la célula, se generan portadores de carga (pares electrón-hueco). Esto origina una corriente eléctrica cuando la célula está cortocircuitada. La radiación Solar está compuesta por fotones de diferentes energías. Los portadores de carga se ocasionan cuando la energía del fotón incidente es suficiente para liberar electrones del semiconductor. Es decir, la energía del fotón supera la energía de su banda prohibida¹. Este fenómeno depende de material semiconductor y de la longitud de onda de la luz incidente [11].

Por lo tanto, el fenómeno fotovoltaico se puede describir en un proceso que engloba los siguientes pasos:

- Absorción de la radiación solar por la célula fotovoltaica,
- Generación y transporte de los portadores de carga liberados en la unión P-N.
- Recolección de esas cargas eléctricas en los terminales del dispositivo fotovoltaico, generando energía Eléctrica.

Las células fotovoltaicas más utilizadas son las formadas por una unión P-N y utilizando como material semiconductor el silicio monocristalino o policristalino. Existen diversos tipos de materiales para la fabricación de células PV. Cada material consta de un grado de cristalinidad (formación de átomos en estructura cristalina), un coeficiente de absorción (determina si la luz se absorbe con facilidad) y un coste y complejidad de fabricación. Los materiales más utilizados son:

- Silicio. Según el grado de cristalización pueden ser [6]:
 - Monocristalino: estructura de los átomos completamente ordenada, haciendo que su comportamiento sea totalmente uniforme.
 - Policristalino: estructura de los átomos ordenada en regiones separadas por las fronteras de grano, lo que hace que existan enlaces irregulares en las fronteras cristalinas, disminuyendo la eficiencia.
 - Amorfo: estructura totalmente desordenada, generando gran cantidad de defectos.
- Película Delgada. Las más desarrolladas son las de Sulfuro de Cadmio, Sulfuro Cuproso y Telururo de Cadmio.
- Arseniuro de Galio. Elevado coste de fabricación, pero proporcionan un rendimiento del 27 %.

¹La energía de la banda prohibida es la cantidad mínima de energía que necesita un electrón para liberarse de su estado de enlace.

Los paneles o módulos fotovoltaicos son un conjunto de células PV conectados en serie o en paralelo, de tal forma que reúnan unas condiciones de Tensión, Corriente y Potencia que las hacen adecuadas para su aplicación. Las células que se utilizan para construir un panel fotovoltaico deben tener las mismas características eléctricas. Los paneles PV deben de tener una cierta protección mecánica y eléctrica contra agentes ambientales como son el agua o el polvo [5, 6].

Un sistema fotovoltaico está formado por paneles solares distribuidos en una cierta formación, equipados con convertidores DC/DC, inversores (para el caso de conexión con la red eléctrica) y sistemas seguidores del punto de máxima potencia.

3.1. Curva Característica I-V

La representación de la característica de salida de un dispositivo fotovoltaico se denomina curva I-V (Corriente-Tensión). Esta curva muestra los diferentes valores de corriente y tensión proporcionados por una célula PV dependiendo de la carga conectada en sus terminales, desde cortocircuito hasta circuito abierto.

La Figura 3.1 muestra una curva I-V típica. Ésta consta de tres condiciones importantes de operación, las cuales determinan sus valores característicos [9]:

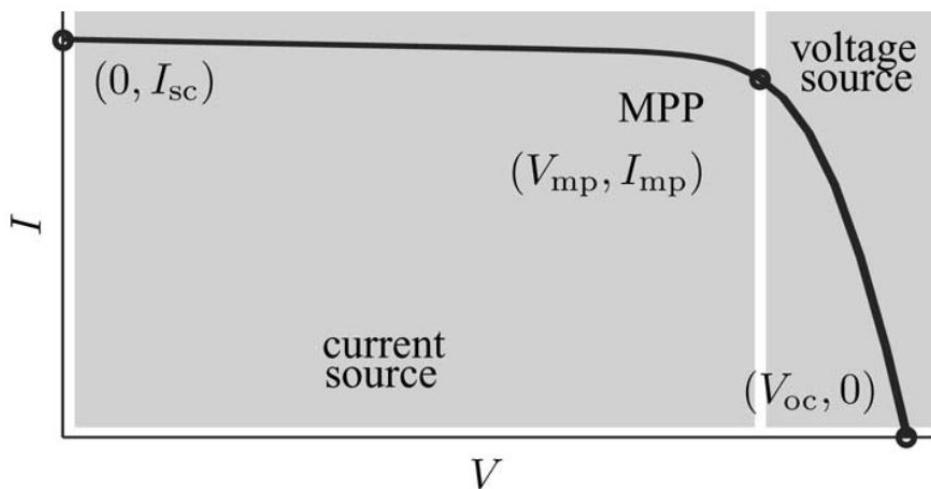


Figura 3.1.: Curva I-V [5]

- Condición de circuito abierto: los terminales de salida de la célula no están conectados y el voltaje a través de ellos es el máximo que se puede obtener e igual al voltaje de circuito abierto (V_{OC}). En este caso no existe corriente a través de la salida, $I = 0$.
- Condición de Cortocircuito: Los terminales de salida están conectados entre sí formando un cortocircuito, por lo que el voltaje a través de la célula es cero. En este caso el valor de corriente que circula es máximo e igual a la corriente de cortocircuito I_{SC} .
- Punto de máxima potencia: Cuando la célula trabaja a máxima potencia, el producto de I por V es el máximo y la corriente que circula por la salida es igual a la corriente del punto de máxima potencia I_{mp} y el voltaje igual al voltaje del punto

3.1 Curva Característica I-V

de máxima potencia V_{mp} . El punto de máxima potencia es un dato esencial para el correcto funcionamiento de los sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), éste será el punto de trabajo deseado en los sistemas industriales de generación de energía eléctrica.

Las características también dependen de la radiación solar y la Temperatura. fundamentalmente, la radiación hace que aumente la corriente de cortocircuito (I_{SC}) proporcionada por la placa, de forma que a mayor radiación mayor corriente. Un aumento de la temperatura provoca una disminución en la zona de máxima potencia MPP. Los fabricantes suelen proporcionar estos valores para unas condiciones estándar² de funcionamiento.

Con estas tres condiciones de operación se obtienen los valores característicos de la curva I-V de una célula PV: I_{SC} , V_{OC} , P_m , I_{mp} y V_{mp} . Para hallar los valores de la curva de un módulo fotovoltaico, basta con multiplicar estos valores por el número de células en serie y en paralelo [6]:

$$I_{SC,Módulo} = I_{SC,Célula} N_{Células \ en \ Paralelo} \quad (3.1)$$

$$V_{OC,Módulo} = V_{OC,Célula} N_{Células \ en \ Serie} \quad (3.2)$$

$$P_{MAX,Módulo} = P_{MAX,Célula} N_{Células \ en \ Paralelo} N_{Células \ en \ Serie} \quad (3.3)$$

Además de los valores anteriores, los fabricantes suelen proporcionar otros datos, tales como el factor de forma y la eficiencia [3, 6]. El Factor de forma es el cociente entre la máxima potencia y el producto de la intensidad de cortocircuito por el voltaje de circuito abierto (Ecuación 3.4), expresado en tanto por 1 o en tanto por ciento. Este factor está relacionado con la calidad del módulo fotovoltaico, siendo mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

$$FF = \frac{P_m}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (3.4)$$

La eficiencia de una célula fotovoltaica está dada por el cociente entre la máxima potencia suministrada por la placa solar y la irradiancia recibida (ya sea natural o artificial) en la superficie de la célula (Ecuación 3.5), donde G es la irradiancia Solar en W/m^2 y A es el área de la célula en m^2 . La eficiencia de una célula solar suele oscilar entre el 10 y el 30 %.

Tanto el factor de forma como la eficiencia dependen del material por el que esté formado la célula, la temperatura, la degradación y otros factores externos.

$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{G A} = \frac{FF I_{SC}V_{OC}}{G A} \quad (3.5)$$

²CEM o STC, en inglés, Standard Test Conditions. Se refieren a una irradiancia de 1000 W/m^2 , distribución espectral de 1.5 y 25°C de temperatura)

3.1.1. Características del panel Solar Utilizado

El prototipo que se desarrolla en este proyecto, se ha llevado a cabo mediante un panel de la serie PV Logic, de Solar Thecnology International (disponible en su página oficial). Formado por 36 células en serie, de silicio monocristalino. Presenta las siguientes características:

- Alta eficiencia.
- Construcción robusta que la hace apta para aplicaciones de exterior y resistente al agua.
- Incluye un diodo que trabaja en inversa, para evitar la retroalimentación.
- La degradación de las células PV no será mayor del 20 % en 20 años.

Sus valores característicos en condiciones estándar de medida aparecen la Tabla 3.1.

Potencia Máxima	5 W
Voltaje de Máxima Potencia V_{mp}	17.5 V
Intensidad de Máxima Potencia I_{mp}	0.29 A
Voltaje de Circuito Abierto V_{OC}	22 V
Intensidad de Cortocircuito I_{SC}	0.32 A
Temperatura de Operación	-40 a 85 °C
Dimensiones	306x218x25 mm

Cuadro 3.1.: Especificaciones de la Placa Solar Utilizada

3.2. Modelado de Células Fotovoltaicas

En general, el modelado de células fotovoltaicas implica el cálculo de la característica I-V partiendo de los datos obtenidos de forma experimental o de las hojas características proporcionadas por el fabricante, de una forma teórica mediante algoritmos matemáticos [4]. Para analizar el comportamiento de las células fotovoltaicas, existen diferentes aproximaciones. La más común es modelar la célula como un circuito electrónico.

El circuito modelo apropiado es el que emula de la forma más exacta posible el comportamiento eléctrico de las células solares. Un modelado teórico es esencial para la simulación, diseño, evaluación, control y optimización de los sistemas fotovoltaicos [9]; siendo crucial para los sistemas de seguimiento del punto máxima potencia y para los cálculos relacionados con la eficiencia. Además, este hecho es importante también para el campo de la investigación, pues, la identificación y comprensión del impacto de los valores teóricos obtenidos para la eficiencia del modelo, tiene una influencia directa en el proceso de optimización de su fabricación [4]. El problema de encontrar los parámetros adecuados para el modelado teórico de células solares se denomina como *Problema de Estimación de Parámetros del Modelo de una Célula Fotovoltaica* [5]. La búsqueda de estos parámetros es uno de los grandes retos que presenta el campo de las energías renovables.

Para que un modelo sea aceptable, debe incluir un circuito equivalente adecuado, siendo sus parámetros correspondientes suficientemente exactos. Un método de estimación de parámetros para las células fotovoltaicas debe tener los siguientes requisitos [5]:

- Debe proporcionar parámetros lo más exactos posibles. La curva teórica obtenida debe ajustarse de forma correcta a los datos experimentales.
- Debe ser válido, proporcionando resultados prácticamente iguales cuando es aplicado varias veces para el modelado de una misma curva experimental.
- Debe proporcionar resultados de igual calidad para cualquier curva a modelar.
- Debe tener un tiempo de cálculo aceptable.

3.2.1. Modelos

Existen diferentes modelos de Circuitos para la simulación del comportamiento de los paneles PV, a continuación se nombran los más utilizados en la obtención de parámetros.

3.2.1.1. Modelo Ideal

Sin la presencia de la irradiancia solar, una célula solar se comporta como un diodo de unión PN simple [5], y la curva I-V está dada por la ecuación de Shockley (Ecuación 3.6), donde I_D y V_D son la corriente y el voltaje del diodo respectivamente.

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$V_t = \frac{A K T}{q} \quad (3.7)$$

I_S , también nombrada como I_{Sat} , es la corriente de saturación del diodo. A es el factor de idealidad del diodo; q es el valor absoluto de la carga eléctrica del electrón; T es la temperatura en Kelvin y K es la constante de Boltzman.

Si existe radiación solar, la unión P-N absorbe los fotones de la luz incidente, dando lugar al efecto fotovoltaico y produciendo una corriente eléctrica llamada fotocorriente o corriente generada (I_{PV} , I_{ph} o I_g) [5]. Al incluir la fotocorriente dentro de la Ecuación 3.6, se obtiene una ecuación que proporciona una descripción básica de una célula fotovoltaica iluminada. El circuito eléctrico resultante, consta de una fuente de corriente en paralelo con un diodo de unión PN Figura 3.3. En la Figura 3.2 se aprecia como uniendo estos dos componentes, se obtiene una aproximación de la curva I-V.

El modelo ideal está formado por tres parámetros desconocidos I_g , A e I_{Sat} tal como muestra su ecuación Ecuación 3.8.

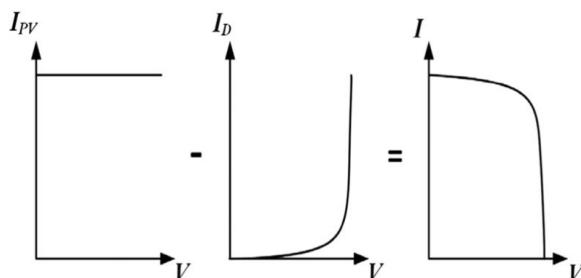


Figura 3.2.: Superposición de una Fuente de corriente con un diodo de unión PN [5]

$$I = I_g - I_{Sat} \left(e^{\frac{V}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

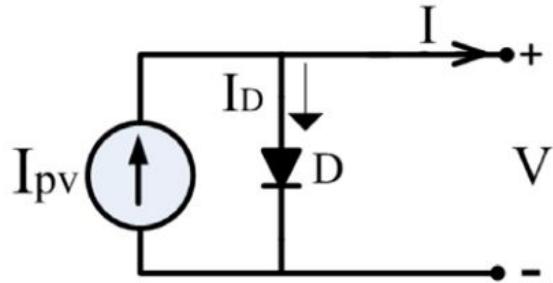


Figura 3.3.: Circuito Modelo Ideal de una célula PV [5]

3.2.1.2. Modelo de un único Diodo

El modelo ideal no es utilizado en procesos de simulación, es más un modo de explicar los conceptos teóricos del funcionamiento de las células fotovoltaicas. Para tener un modelo más real, es necesario considerar resistencias de pérdidas [5]. Aparte, los parámetros a calcular dependen de las condiciones medioambientales, sobre todo de la temperatura y de la irradiancia, lo que hace que el modelo ideal no sea viable para fines experimentales.

Con Efecto de una Resistencia Serie. En cualquier panel PV existen resistencias óhmicas de las conexiones y contactos, las cuales dependen de la temperatura, y resistencias internas de la unión P-N de las células que forman el módulo PV, las cuales aumentan cuando la irradiancia disminuye [4]. Estas pérdidas resitivas se modelan como una resistencia en serie R_S . El circuito resultante se muestra en la Figura 3.4. Este modelo tiene cuatro parámetros I_g , A , I_{Sat} y R_S . Su ecuación matemática es Ecuación 3.9, donde V_t está dado por Ecuación 3.7.

$$I = I_g - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{V_t} \right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

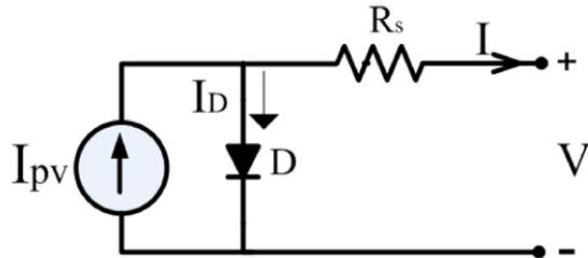


Figura 3.4.: Modelo de un único diodo con efecto de R_S [5]

A pesar de que el modelo de un diodo con una resistencia serie imita el comportamiento físico de una célula solar mejor que el modelo ideal, sigue sin ser demasiado exacto.

Con Efecto de una Resistencia en Paralelo. En este caso, para obtener mayor exactitud, se tiene en cuenta una corriente de pérdidas en la unión P-N, representada como una resistencia en paralelo R_P , que se añade al circuito, además de la R_S [5]. El modelo resultante es el más utilizado en el modelado de células solares debido a que ofrece una gran exactitud y su cálculo es relativamente simple. Sin embargo, la exactitud para valores muy bajos de irradiancia no llega a ser aceptable.

El modelo de un solo diodo con una resistencia en paralelo consta de cinco parámetros: I_g , A , I_{Sat} , R_S y R_P . Su ecuación es la Ecuación 3.10.

$$I = I_{ph} - I_S \left[\left(e^{\left(\frac{V+IR_S}{V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P} \right] \quad (3.10)$$

El circuito eléctrico se muestra en la Figura 3.5.

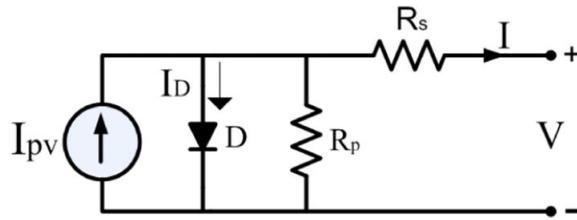


Figura 3.5.: Modelo de un único diodo con efecto de R_S y R_P [5]

3.2.1.3. Modelo de dos Diodos

Este modelo añade el efecto de la pérdida de corriente en el proceso de recombinación, como un segundo diodo D_2 . La ventaja es que a diferencia de los modelos de un solo diodo, proporciona exactitud cuando hay valores bajos de irradiancia [5].

El modelo de dos diodos tiene siete parámetros: I_g , R_S , R_P , A_1 , I_{Sat1} , A_2 , I_{Sat2} . Su ecuación matemática es la Ecuación 3.11 y el circuito eléctrico se muestra en Figura 3.6.

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{Vt_1} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{Vt_2} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (3.11)$$

$$Vt_1 = \frac{A_1 KT}{q} \quad (3.12)$$

$$Vt_2 = \frac{A_2 KT}{q} \quad (3.13)$$

3.2.2. Comparación de Modelos

La ecuación que describe de forma matemática el comportamiento de las células solares depende del modelo elegido para la célula solar y hay que tener en cuenta las siguientes cuestiones [1]:

- Los modelos de cinco parámetros son los que más se utilizan, debido a su relación entre exactitud y complejidad.

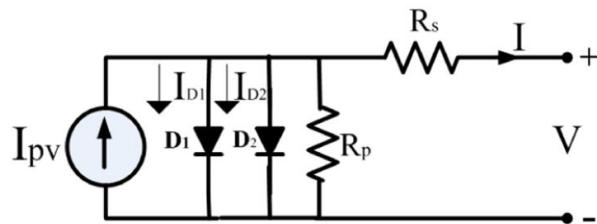


Figura 3.6.: Circuito del Modelo de dos Diodos [5]

- El modelo de extracción de parámetros más simple es el de tres parámetros (Modelo Ideal), pero sólo se aplican en explicaciones básicas de funcionamiento o para fines teóricos.
- El modelo de dos diodos es mucho más exacto que el de un solo diodo, sin embargo la complejidad de sus algoritmos no suele salir rentable para ciertas condiciones de iluminación.

4. Circuito Trazador de Curvas

La degradación es la razón por la que la mayoría de módulos fotovoltaicos pierden capacidad de generar energía eléctrica. Este hecho se debe a diferentes causas, las más importantes son las debidas a los procesos perjudiciales que se generan dentro de las células PV, debido a las condiciones medioambientales [10].

Por esta razón, es muy importante la monitorización del funcionamiento de los paneles PV, puesto que, permite tener una visión realista de su ciclo de vida y encontrar soluciones a algunos de los problemas lo que ayuda a mejorar los procesos de fabricación. Los sistemas fotovoltaicos normalmente se testean con costosas cargas DC, que van variando su valor de forma progresiva para cubrir el mayor rango posible de funcionamiento del dispositivo PV, en un tiempo determinado. Sin embargo, utilizando circuitos más simples es posible obtener una carga variable que permita obtener la curva I-V de un panel fotovoltaico.

Un circuito trazador de curvas obtiene la característica I-V de los módulos fotovoltaicos. Su funcionamiento se basa en presentar una carga variable, obligando al módulo a trabajar en todo su rango de funcionamiento.

4.1. Diseño Circuito Trazador de Curvas I-V

Una fuente de corriente ideal sería capaz de proporcionar una corriente constante entre sus terminales independientemente de la carga conectada, es decir, suministraría una energía infinita si se conecta como carga una resistencia infinita en sus terminales.

En una fuente de corriente real, la intensidad proporcionada permanece constante, hasta que, la tensión que aparece entre sus terminales alcanza un determinado valor. Puesto que, una placa solar se puede considerar como una fuente de corriente real, ésta suministra intensidad hasta que la tensión que aparece entre sus terminales es igual a la tensión de circuito abierto.

Un circuito trazador de curvas I-V utiliza un condensador para presentar una carga variable, y así variar la tensión que aparece entre los terminales de la placa solar. Cuando el condensador está descargado actúa como un cortocircuito, permitiendo medir la intensidad de cortocircuito. Conforme el condensador se va cargando con la corriente proporcionada por la placa, recorre el rango de tensiones hasta alcanzar la tensión de circuito abierto y en este momento el panel ya no es capaz de suministrar más corriente.

El Circuito resultante es el que se muestra en la Figura 4.1. Está formado esencialmente por un circuito de carga y descarga de un condensador. El dimensionamiento de los elementos se ha realizado considerando los valores nominales de la placa en condiciones estándar (STC). El valor de condensador elegido es de $4700 \mu F$, pues proporciona un tiempo de respuesta adecuado en STC, aunque permite trabajar en más condiciones.

La corriente que le llega al condensador es la corriente suministrada por la placa (Ecuación 4.1),

$$I_g = i_C(t) = C \frac{dV}{dt} \quad (4.1)$$

Considerando que la intensidad proporcionada por la placa es constante e igual a la corriente de cortocircuito en STC, se puede obtener una expresión para calcular el valor del Condensador, tal y como se muestra en Ecuación 4.2, Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4.

$$I_{SC}dt = CdV \quad (4.2)$$

$$\int_0^t I_{SC}dt = \int_0^{V_{OC}} CdV \implies I_{SC}t = CV_{OC} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{I_{SC}}{V_{OC}}t \quad (4.4)$$

Con un tiempo de carga propuesto en $0,5\text{ s}$, el valor de C resultante es de $4700\mu\text{F}$. Puesto que la corriente no es en realidad constante, decrecerá conforme vaya creciendo la tensión, lo que hará que este tiempo sea ligeramente mayor.

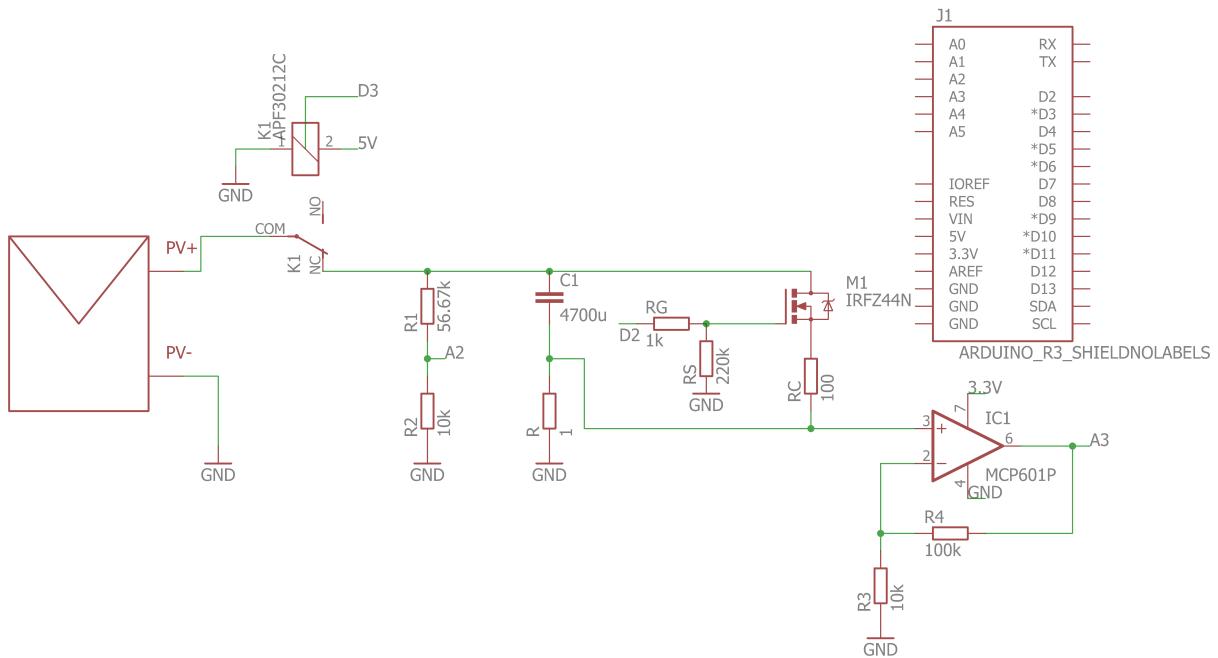


Figura 4.1.: Circuito Trazador de Curvas Completo

El divisor de tensión formado por R_1 y R_2 permite medir la tensión entre los terminales de la placa, adaptando sus valores a los rangos de entrada del microcontrolador. Puesto que, el valor máximo de voltaje que se espera medir es V_{OC} (en STC, 22 V) y el valor máximo esperado en la entrada de microcontrolador, en este caso, es de 3,3 V, los valores teóricos obtenidos para estas resistencias son $R_1 = 56,66\text{ k}\Omega$; $R_2 = 10\text{ k}\Omega$.

Existe una pequeña porción de corriente, del orden de microamperios, que se pierde a través de esta red de resistencias. Incluso en casos en los que la intensidad proporcionada por la placa es pequeña, este error no afecta de forma considerable.

Para la medida de corriente, se conecta una resistencia shunt de bajo valor (R) en serie con el condensador. La máxima intensidad proporcionada por la placa será I_{SC} (0,32 A en

STC), al pasar por esta resistencia de 1Ω , se obtiene un voltaje resultante de $0,32\text{ V}$ en condiciones estándar. Se coloca un amplificador operacional en configuración no inversora con el fin de obtener una tensión entre 0 y $3,3\text{V}$. La red de resistencias R_3 y R_4 proporciona una ganancia 10, para entregar a la entrada del microcontrolador un voltaje entre 0 y $3,3\text{V}$. Los valores obtenidos son los que aparecen en la Figura 4.1.

El transistor MOSFET y la Resistencia R_C forman el circuito de descarga, que se activará al final de cada ciclo de medida. El Relé tiene la finalidad de aislar el circuito de medida de la placa solar durante la descarga del condensador. El funcionamiento completo del Circuito de la Figura 4.1 consta de los siguientes pasos:

- Se parte de una situación inicial, dónde el condensador está descargado, el Relé conectado al circuito y transistor MOSFET en abierto.
- La corriente proporcionada por la placa, comienza a cargar el condensador y el microncontrolador toma todos los valores de tensión y de corriente mediante los circuitos medidores.
- Una vez la corriente es cero, el relé desconecta la placa del resto del circuito y el transistor MOSFET se cierra, conectando el condensador con la resistencia R_C , provocando su descarga por ésta, y dejando al circuito listo para otra toma de datos.

Para llegar al circuito final de la Figura 4.1, han sido necesarias algunas modificaciones del circuito inicial planteado. En el circuito inicial, la resistencia R_C y el Relé no formaban parte del circuito:

- Al no estar R_C el condensador se descargaba directamente a tierra. Este planteamiento producía unos picos de voltaje en la descarga, debido a que se descargaba muy rápido, y aparte de que era perjudicial para los demás componentes no se obtenían buenos datos.
- Sin el Relé, la placa solar estaba continuamente conectada al circuito y proporcionando corriente a éste. Durante la descarga del condensador, se producían dos corrientes contrarias, la que entraba de la placa y la que salía del condensador. Esto provocaba picos de corriente durante la descarga que no permitían en buen funcionamiento del circuito.

Además, la red de descarga del condensador (transistor MOSFET y R_C) estaba conectada a tierra, lo que provocaba que durante las descargas la polaridad del circuito cambiara. La solución fue conectar esta red a la resistencia R , evitando así los problemas que ésto ocasionaba. Todos estos inconvenientes, se solucionaron durante la fase de prototipo, dónde el circuito estaba implementado en una *protoboard*.

4.2. Implementación del Circuito de medida

Después de encontrar el diseño definitivo del circuito trazador, se realizó una implementación en PCB. Para ello se ha utilizado EAGLE 7.6.0 y una placa de baquelita con posibilidad de soldadura en las dos caras. Por comodidad de diseño, el circuito realizado en PCB no incluye el relé, éste se conecta de forma externa y no está planteada como una Shield para Arduino. El diseño a implementar aparece en la Figura 4.2.

El circuito soldado en placa de baquelita, aparece en la Figura 4.3 junto con el microcontrolador. Los componentes utilizados se detallan en Tabla 4.1

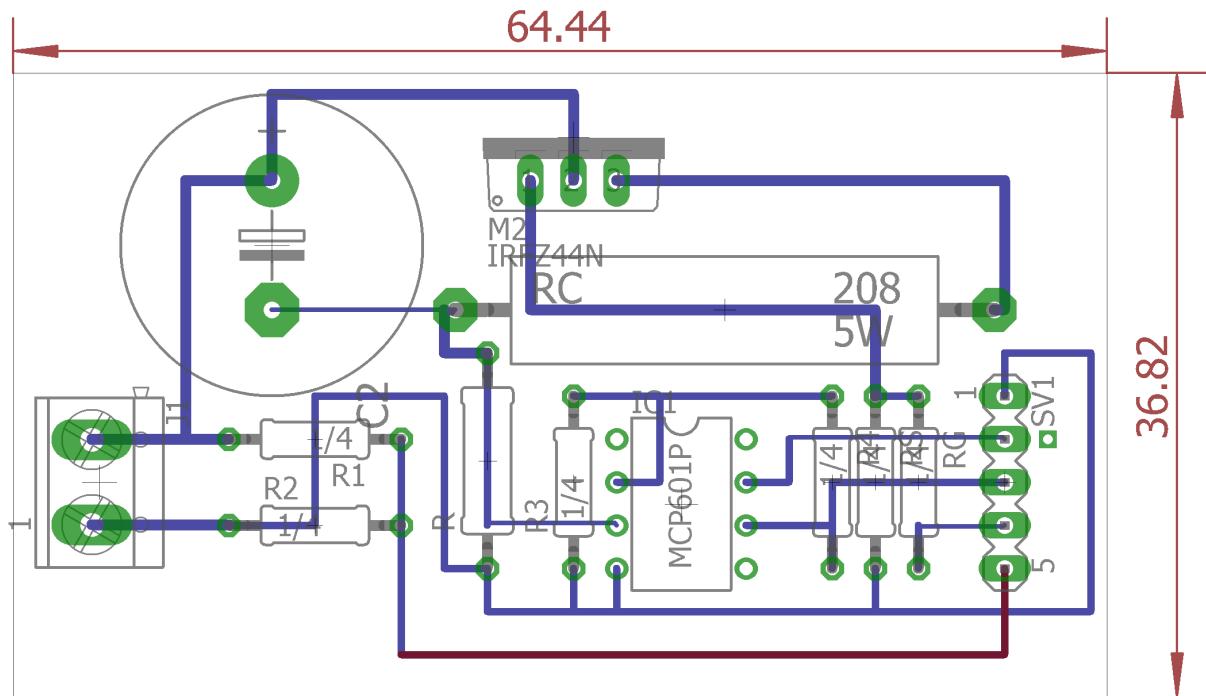


Figura 4.2.: PCB Circuito Trazador de Curvas I-V.

4.3. Microcontrolador y conexión Ethernet

El control del proceso de medida se realiza mediante la placa de desarrollo, *Arduino Uno*. Éste presenta las siguientes características [2]:

- Microcontroller ATmega328P.
- Operating Voltage 5V
- Input Voltage (recommended) 7-12V.
- Input Voltage (limit) 6-20V
- Digital I/O Pins 14 (of which 6 provide PWM output).
- PWM Digital I/O Pins 6
- Analog Input Pins 6
- DC Current per I/O Pin 20 mA
- DC Current for 3.3V Pin 50 mA
- Flash Memory 32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
- SRAM 2 KB (ATmega328P)
- EEPROM 1 KB (ATmega328P)
- Clock Speed 16 MHz

4.3 Microcontrolador y conexión Ethernet

Uds	Componente	Especificaciones
1	Amplificador Operacional Rail-to-Rail	MCP601
1	Transistor Mosfet	IRFZ44N
1	Condensador Electrolítico	4700 μ F, 35 V
6	Conectores	CON_TERMINAL_BLOCK_02-5MM
1	Relé	SRD-0 5V DC-SL-C, 10 A, 30 V DC
1	Resistencia 5 W	100 Ω
1	Resistencia 1/2 W	1 Ω
6	Resistencias 1/4 W	2x10K Ω , 56.6K Ω , 100K Ω , 1K Ω y 220K Ω
1	Placa Baquelita doble cara	45x65mm ²
1	Caja	Caja Universal de superficie para mecanismos eléctricos
1	Microcontrolador	Arduino Uno
1	Interfaz Ethernet	Arduino Ethernet Shield

Cuadro 4.1.: Tabla de componentes Circuito Trazador.

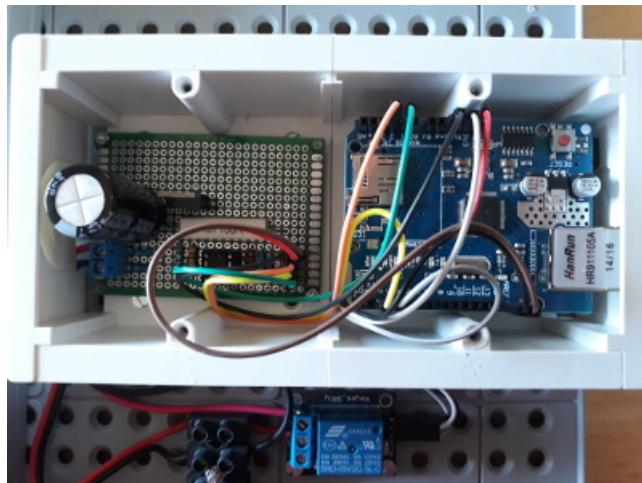


Figura 4.3.: Circuito Final.

- Advanced RISC Architecture: 131 Powerful Instructions, most Single Clock Cycle Execution , 32 x 8 General Purpose Working Registers, Fully Static Operation, Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz, On-chip 2-cycle Multiplier.
- 6 channel 10-bit ADC in PDIP Package.

Para conectar *Arduino* a una red Ethernet, se utiliza *Arduino Ethernet Shield*. Sus características más importantes son [7]:

- Chip Ethernet Wiznet W5100
- Support Harwired TCP/IP Protocols: TCP, UDP, ICMP, IPv4 ARP, IGMP, PPPoE, Ethernet.
- Support Auto Negotiation (Full-duplex, half-duplex)
- Support 4 independent sockets simultaneosly.
- Ethernet Connector standard RJ45.

- Support Serial Peripheral Interface (SPI MODE 0,3).

El sistema físico total está formado por el panel solar y el circuito trazador de curvas, distribuido tal y como aparece en Figura 4.4

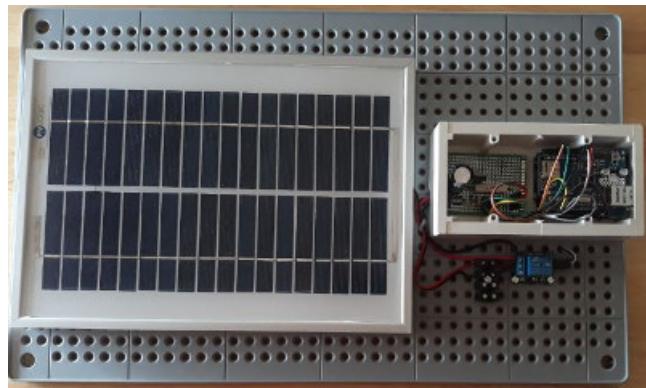


Figura 4.4.: Panel solar y Circuito trazador.

Este montaje permite que se pueda transportar de una pieza, evitando tener que realizar conexiones cada vez que se vaya a utilizar. El peso de la 'bandeja completa' es prácticamente igual al peso del panel. Las únicas acciones necesarias para realizar las medidas, es conectar el cable de Ethernet y proporcionarle al microcontrolador una alimentación adecuada.

4.4. Software de Medida y control

El diagrama de flujo que describe el funcionamiento del circuito trazador de curvas, aparece en la Figura 4.5 y el programa completo en el Anexo II. En este diagrama también aparece las operaciones necesarias a realizar para la posterior conexión con MatLab, la cual se detalla en la siguiente sección. El programa se implementa en lenguaje C y realiza las siguientes funciones:

- Activar y desactivar la carga y la descarga del condensador. Antes del inicio de la toma de muestras se envía la orden de carga del condensador a través del MOSFET del circuito. Cuando finaliza la toma de muestras se envía la orden de descarga del condensador y queda preparado para una posterior toma de muestras.
- Tomar las muestras necesarias para trazar la curva I-V. En cada paso se toma una muestra de corriente y otra de tensión por sendas entradas analógicas del microcontrolador. En principio se dispone de 256 muestras para corriente y otras 256 para tensión. Si la corriente llega a cero antes de tomar 256 muestras, el resto de valores permanece a cero. En el caso de que no se llegue a la corriente cero en estas 256 muestras, se vuelven a recorrer los arrays sustituyendo los valores anteriores por los nuevos en posiciones alternas, primero de dos en dos, después de tres en tres y así sucesivamente hasta quince (Figura 4.6). Esto evita un posible timeout en el equipo receptor de datos, lo que puede suceder en entornos de baja iluminación o iluminación nula.
- Realizar las comunicaciones necesarias. Una vez se tienen todas las muestras, éstas se convierten a valores reales de tensión y corriente teniendo en cuenta la resolución

del conversor A/D y los circuitos adaptadores de señal del trazador. Las muestras se envían en formato html, de tal forma que el entorno MatLab los interpretará como una matriz de dos filas y 256 columnas, automatizando el proceso de captura y representación.

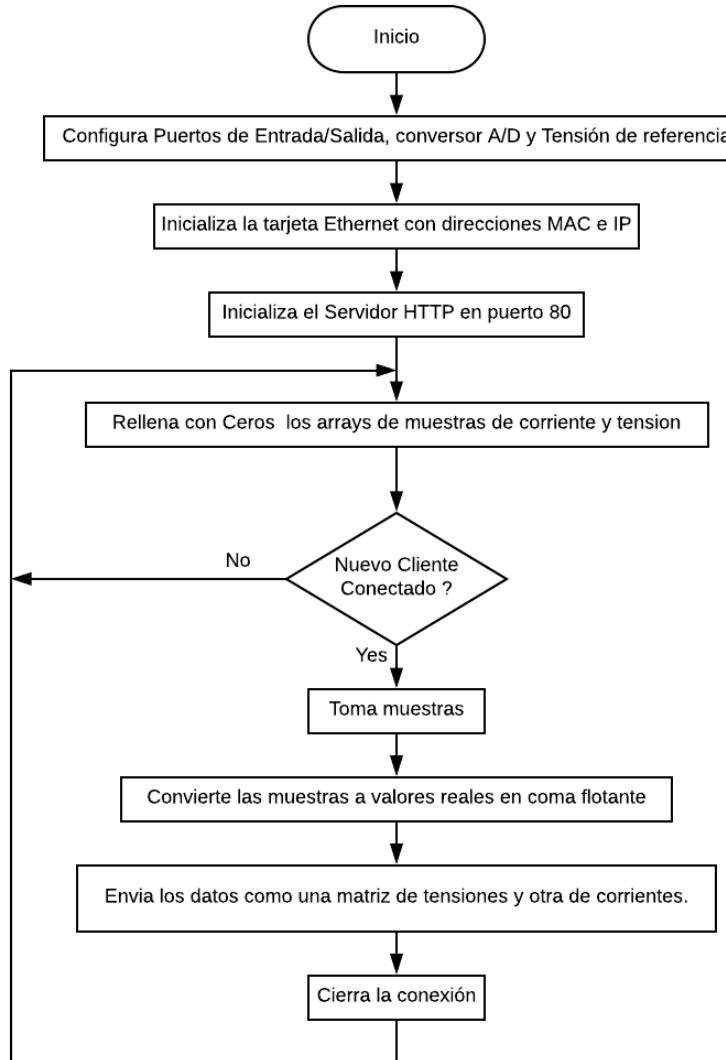


Figura 4.5.: Diagrama de Flujo funcionamiento del Circuito.

4.4.1. Algoritmo de toma de Muestras

Para que las curvas I-V obtenidas tengan una resolución adecuada para diferentes condiciones de iluminación, se diseña el algoritmo de toma de muestras, referenciado en la Figura 4.5 como 'toma muestras'. Este algoritmo se desarrolla en la Figura 4.6 y está basado esencialmente en que se continúe tomando muestras hasta que la corriente medida sea cero.

En el caso de poca iluminación, la carga del condensador es muy lenta y tarda bastante tiempo en alcanzar el valor de corriente cero. Por esta razón, se realizan varios bucles de lectura, sobreescribiendo datos alternos anteriores, con la finalidad de generar la curva completa.

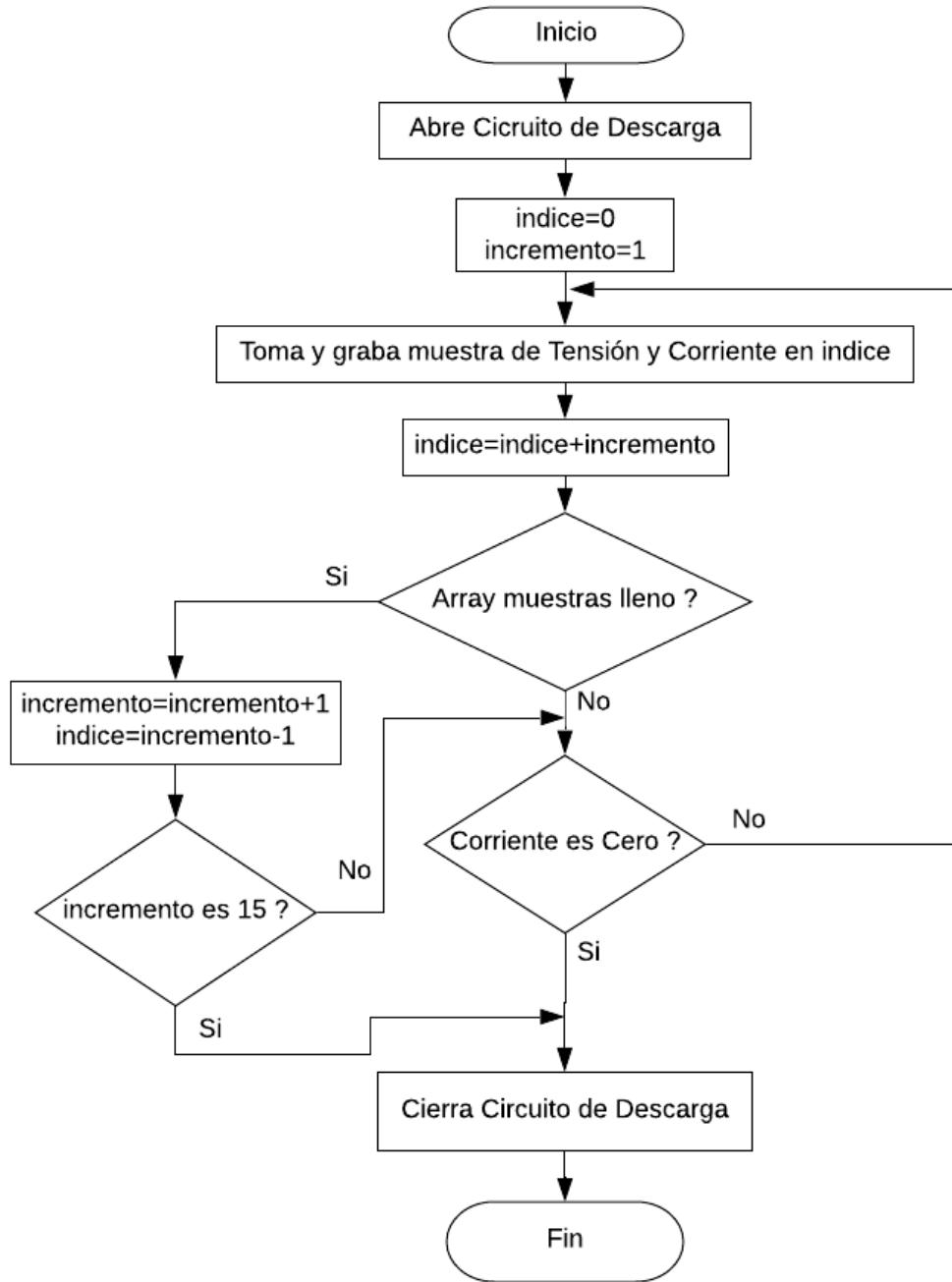


Figura 4.6.: Diagrama de Flujo del Sistema de toma de Muestras.

4.4.2. Sistema de Comunicación con MatLab

El microcontrolador toma los datos y genera un array con todos los valores de corriente y de tensión en coma flotante, tal y como aparece en Figura 4.5. Este array es enviado en formato html a través del protocolo http. En este protocolo, el circuito trazador de curvas actúa como servidor, de forma tal que cada vez que un cliente lo solicita, traza una curva completa y la envía al cliente en formato html.

El array de los datos obtenidos, se puede leer con un navegador en forma numérica. Además, es posible cargar estos datos mediante el entorno MatLab (comando `urlread`),

para su visualización gráfica y posterior tratamiento. Los datos enviados están en un formato, que permite su transformación a matrices numéricas (función *str2num*). En los diferentes niveles de comunicación se utilizan los protocolos que aparecen en la Tabla 4.2, conforme a los objetivos presentados.

Capa	Protocolo de Comunicación
Físico y Enlace	Ethernet
Transporte y Red	tcp/ip
Aplicación	HTTP

Cuadro 4.2.: Niveles de comunicación y protocolos utilizados.

El esquema de la Figura 4.7 muestra de forma visual la comunicación realizada. Existe la posibilidad de configurar el Router dónde se encuentra el circuito trazador (direcciones IP y puerto 80). De esta forma, se podría acceder de forma remota, a los datos desde cualquier punto de Internet, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 4.8. Sin embargo, esta posibilidad no se ha llevado a cabo debido a que el sistema está enfocado a que se utilice dentro del entorno universitario y, en principio, no es posible la configuración del Router.

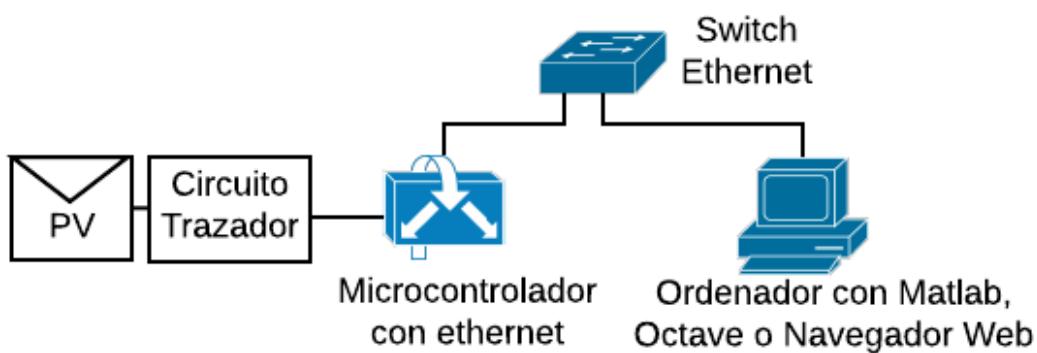


Figura 4.7.: Esquema de Comunicación del Sistema.

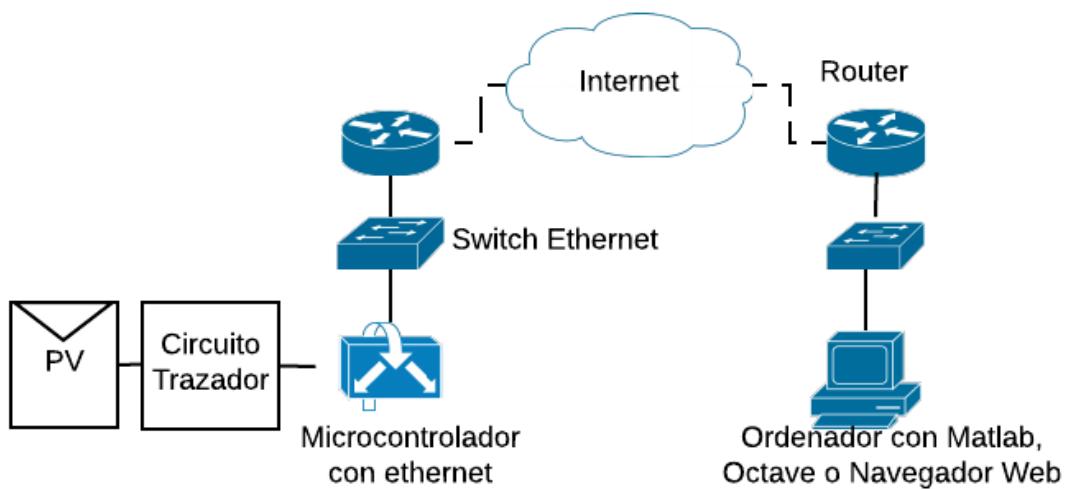


Figura 4.8.: Esquema de Comunicación del sistema si existe posibilidad de Configuración de Router.

4.4.3. Curvas Obtenidas

Algunas de las curvas obtenidas a partir de los datos adquiridos por el circuito trazador, mediante el sistema de toma de muestras de la figura Figura 4.6, aparecen en las Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11. En éstas se observa que la calidad de los datos que se han tomado son adecuados para todos los casos.

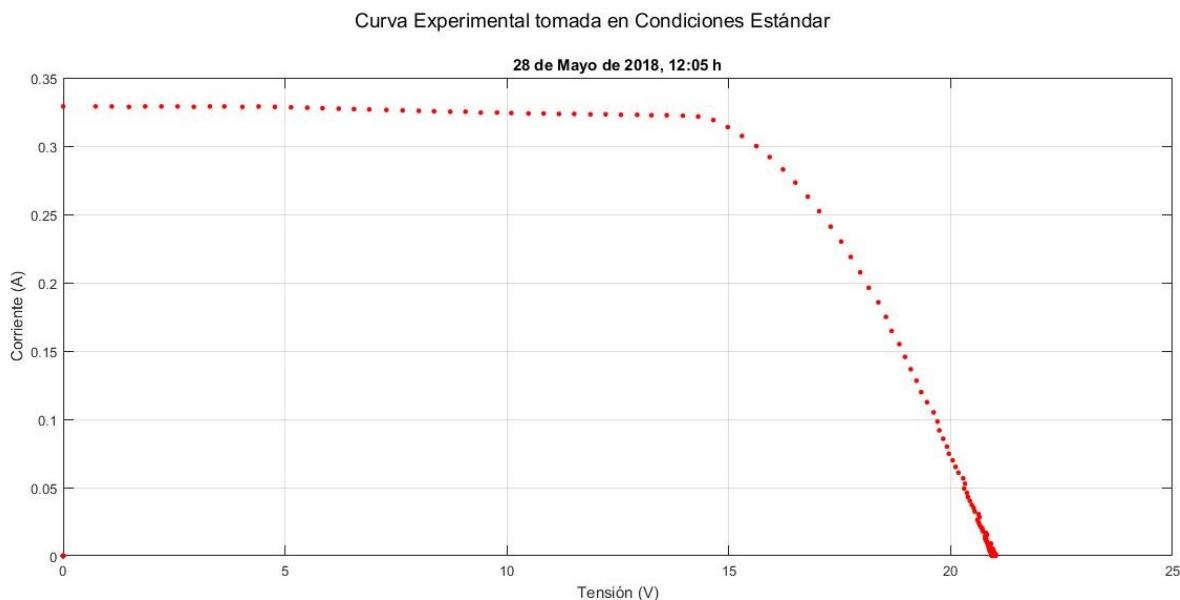


Figura 4.9.: Curva Experimental tomada en Condiciones Practicamente Estándar (Totalmente Soleado).

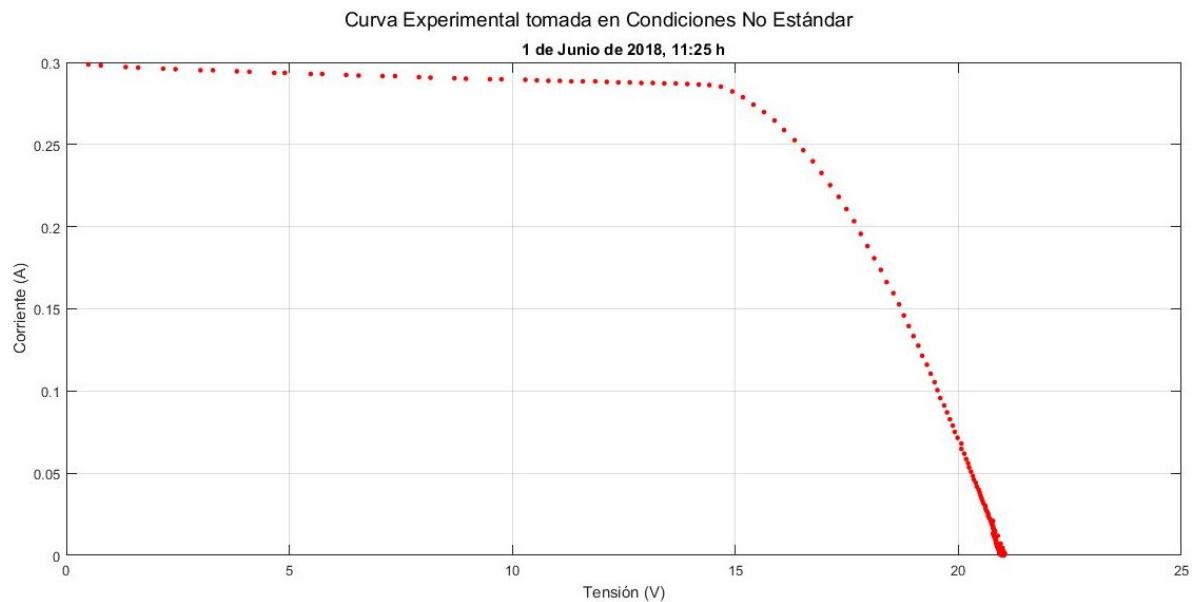


Figura 4.10.: Curva Experimental tomada en condiciones Soleadas.

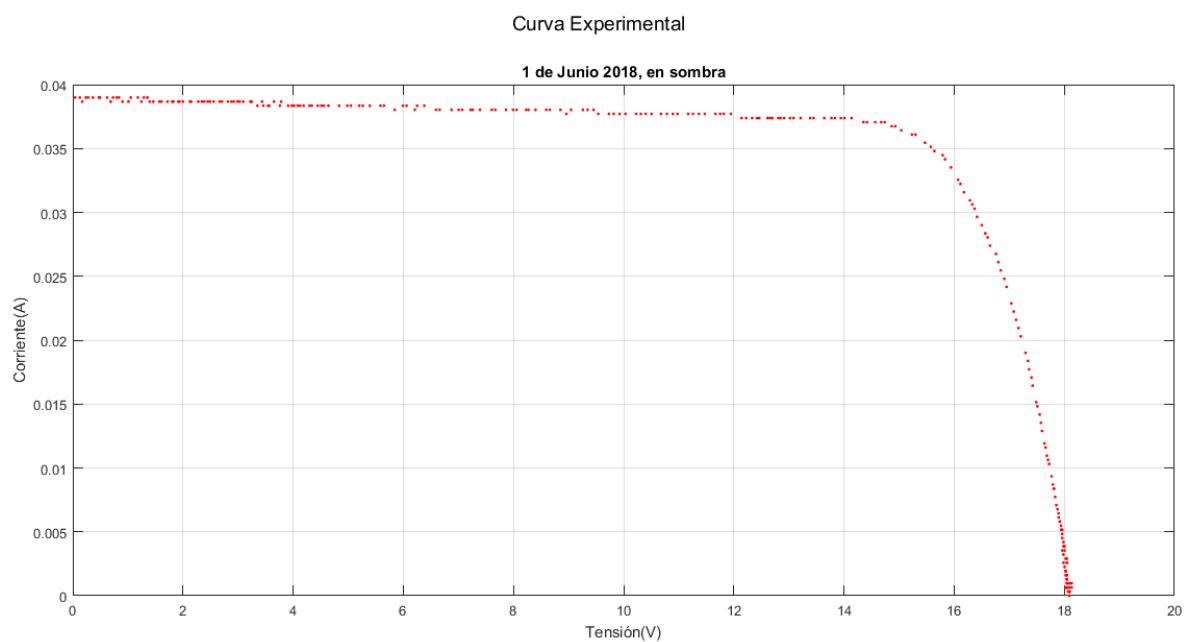


Figura 4.11.: Curva Experimental tomada en condiciones de Sombra.

5. Métodos Utilizados en la Estimación de Parámetros

Normalmente los parámetros de una célula solar se obtienen a partir de su característica I-V y P-V, obtenidas a partir de las hojas características o de datos tomados experimentalmente. Al extraer los datos experimentales del panel solar, mediante el circuito trazador diseñado, ya es posible realizar su modelado matemático. El sistema, tomará muestras de tensión y corriente en todo el rango de funcionamiento de la placa solar en las condiciones de radiación y temperatura en que se encuentra la placa en ese momento.

Estas muestras son enviadas a la herramienta de software matemático MatLab, dónde se realizan la siguientes tareas:

- Presentar visualmente las muestras recibidas.
- Extraer los parámetros característicos de la placa solar en las condiciones ambientales que se han tomado.
- Calcular, a partir de los parámetros característicos anteriores, los parámetros que caracterizan el funcionamiento de una placa solar de acuerdo a diferentes métodos. Éstos se pueden clasificar en diferentes categorías [1]. La primera categoría incluye métodos analíticos basados en la información de las curvas I-V y P-V. La segunda categoría convierte el problema de encontrar los parámetros en un problema de optimización, realizando comparaciones para encontrar el punto de máxima potencia. La tercera categoría mezcla las dos anteriores, empezando por una aproximación realizada de forma analítica y mejorando los errores mediante algoritmos de optimización.
- Analizar el grado de aproximación entre los diferentes modelos teóricos y los resultados experimentales.

En este apartado se explican de forma detallada los métodos que se han utilizado para la extracción de parámetros en el sistema de extracción y modelado de paneles fotovoltaicos.

5.1. Método Propuesto Randy Williams [10]

Método que utiliza el modelo de cuatro parámetros, sin considerar el efecto de una resistencia en paralelo. Utiliza los tres puntos característicos de una curva I-V ($(0, I_{SC})$, $(V_{OC}, 0)$ y (V_{mp}, I_{mp})) para realizar la aproximación de éstos parámetros, resolviendo de forma analítica la ecuación Ecuación 3.10 para cada uno de ellos. Así se obtiene el sistema de ecuaciones formado por Ecuación 5.1, Ecuación 5.2 y Ecuación 5.3.

$$V = 0; I = I_{SC} \implies I_{SC} = I_g - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{R_S I_{SC}}{V_t} \right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

$$V = V_{OC}; I = 0 \implies 0 = I_g - I_{Sat} \left[\exp\left(\frac{V_{OC}}{Vt}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

$$V = V_{mp}; I = I_{mp} \implies I_{mp} = I_g - I_{Sat} \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{Vt}\right) - 1 \right] \quad (5.3)$$

Este sistema de ecuaciones presenta cuatro incógnitas y por lo que se realiza la aproximación $I_{PV} \approx I_{SC}$. Considerando este hecho, se resuelve de forma analítica el sistema de tres ecuaciones, obteniendo una solución para cada parámetro:

$$Vt = \frac{(2V_{mp} - V_{OC})(I_{SC} - I_{mp})}{I_{SC} + (I_{SC} - I_{mp})\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}}\right)} \quad (5.4)$$

$$I_{Sat} = I_{SC} \exp\left(-\frac{V_{OC}}{Vt}\right) \quad (5.5)$$

$$R_S = \frac{V_t \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}}\right) + V_{OC} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (5.6)$$

De la Ecuación 5.4, se obtiene el parámetro A despejando en la Ecuación 3.7.

5.2. Método Xiao [4]

Este método también se basa en la obtención de cuatro parámetros, despreciando el efecto de la resistencia en paralelo. Se basa en que en un módulo PV la derivada de la potencia con respecto al voltaje en el punto de máxima potencia es cero, definiendo a partir de este hecho, los cuatro parámetros mediante ecuaciones analíticas.

Utilizando la ecuación Ecuación 3.10, es posible encontrar una expresión para la corriente de saturación del diodo y la corriente de máxima potencia:

$$I_{Sat} = \frac{I_g - \frac{V_{OC}}{R_P}}{\exp\left(\frac{V_{OC}}{Vt}\right) - 1} \quad (5.7)$$

$$Imp = I_g - I_{Sat} \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + Imp R_S}{Vt}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + Imp R_S}{R_P} \quad (5.8)$$

Despreciando el efecto de la resistencia en paralelo, las ecuaciones Ecuación 5.7 y Ecuación 5.8 se pueden simplificar a:

$$I_{Sat} = \frac{I_g}{\exp\left(\frac{V_{OC}}{Vt}\right) - 1} \quad (5.9)$$

$$Imp = I_g - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + ImpR_S}{V_t} \right) - 1 \right] \quad (5.10)$$

Sustituyendo Ecuación 5.9 en Ecuación 5.10 se obtiene una expresión para la resistencia serie:

$$R_S = \frac{V_t \ln \left[\left(1 - \frac{Imp}{I_g} \right) \exp \left(\frac{V_{OC}}{V_t} \right) + \frac{Imp}{I_g} \right]}{Imp} \quad (5.11)$$

Tomando la derivada de la Potencia con respecto al voltaje en el punto de máxima potencia, se obtiene la Ecuación 5.12.

$$-\frac{\frac{I_{Sat}}{V_t} \exp \left(\frac{V_{mp} + ImpR_S}{V_t} \right)}{1 + \frac{I_{Sat}R_S}{V_t} \exp \left(\frac{V_{mp} + ImpR_S}{V_t} \right)} + \frac{V_{mp}}{Imp} = 0 \quad (5.12)$$

En el algoritmo de cálculo, el parámetro A (factor de idealidad) se varía desde 1 hasta 2. Para cada valor de éste se calculan mediante las ecuaciones Ecuación 3.7, Ecuación 5.9 y Ecuación 5.11, V_t , I_{Sat} y R_S . La corriente generada I_g , se calcula realizando la aproximación:

$$I_g \approx I_{SC} \quad (5.13)$$

Obteniéndose por tanto, una curva teórica para cada valor del parámetro A . De esta curva teórica se adquieren los valores teóricos de la intensidad y el voltaje de máxima potencia y con estos dos valores se calcula el término izquierdo de la ecuación Ecuación 5.12. El conjunto de parámetros que minimiza este término, serán los parámetros estimados para el módulo PV.

5.3. Método Silva [4]

En este método de cinco parámetros se realiza un barrido completo de los posibles valores de A (desde 1 hasta 2 en pasos de 0,01) y de R_S (desde 0 a 2Ω en pasos de $1m\Omega$, aunque este rango depende del área de la célula). Los otros tres parámetros (I_g , I_{Sat} , y R_P) se calculan de forma analítica mediante las Ecuación 5.13, Ecuación 5.7 y despejando de la Ecuación 5.8, se obtiene una expresión para la resistencia en paralelo. Este método, obtiene los cinco parámetros de la Ecuación 3.10.

$$R_P = \frac{V_{OC} \left[\frac{\exp \left(\frac{V_{mp} + ImpR_S}{V_t} \right) - 1}{\exp \left(\frac{V_{OC}}{V_t} \right) - 1} \right] - V_{mp} - ImpR_S}{Imp + I_g \left\{ \left[\frac{\exp \left(\frac{V_{mp} + ImpR_S}{V_t} \right) - 1}{\exp \left(\frac{V_{OC}}{V_t} \right) - 1} \right] - 1 \right\}} \quad (5.14)$$

I_g , I_{Sat} , y R_P , se calculan para cada valor de A y de R_S . Los parámetros escogidos son aquellos que presenten el menor valor de MAEP Ecuación 5.15, calculado entre la curva experimental y la curva generada teóricamente.

$$MAEP = \frac{\sum error_a}{N_{curve}} = \frac{\sum abs(P_{curve} - P_{model})}{N_{curve}} \quad (5.15)$$

El $error_a$ se calcula para todos los puntos de la curva PV y N_{curve} es el número de puntos de voltaje extraídos de la curva experimental del módulo.

Este método elige los parámetros que generan mayor exactitud en la curva P-V, intentando minimizar lo máximo posible el valor MAEP. Sin embargo, se supone que los parámetros no dependen de las condiciones externas (temperatura e irradiancia), por lo que propone añadir una serie de términos a los resultados obtenidos que representen la variación con la temperatura y la variación con la irradiancia.

5.4. Método Villalva [4]

En este caso, se intenta ajustar los valores de R_S y de R_P , para que el punto de máxima potencia de la curva modelada ($P_{mp,modelo}$) sea igual al punto de máxima potencia de la curva experimental ($P_{mp,curva}$) Ecuación 5.16. Este método al igual que anterior, obtiene cinco parámetros.

$$P_{mp,modelo} = P_{mp,curva} = V_{mp,modelo}I_{mp,modelo} = V_{mp,curva}I_{mp,curva} \quad (5.16)$$

Para realizar este cálculo, se elige un valor arbitrario del parámetro A , asumiéndolo constante. Este valor irá cambiando, si es necesario, para ajustarse mejor a la curva I-V. La relación entre R_S y R_P , en la Ecuación 3.10 se puede encontrar imponiendo la igualdad buscada $P_{mp,modelo} = P_{mp,curva}$, dando como resultado la Ecuación 5.17.

$$R_P = \frac{V_{mp}(V_{mp} + R_S I_{mp})}{V_{mp} \left[I_g - I_{Sat} \left(\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_S}{V_t} \right) - 1 \right) \right] - P_{mp,curva}} \quad (5.17)$$

La Ecuación 5.17 indica que, para cada valor de R_S , hay un único valor de R_P , que cumple la condición de la Ecuación 5.16. Se utiliza por tanto, una solución iterativa con R_S y R_P , la cual va aumentando el valor de I_g , desde que se asume que $I_g \neq I_{SC}$ e I_g se calcula mediante la Ecuación 5.18.

$$I_g = \frac{R_P + R_S}{R_P} I_{SC} \quad (5.18)$$

Establecer unos valores iniciales de R_S y R_P es necesario para empezar el proceso iterativo. El valor inicial de R_S es cero y el valor de R_P se define como mínimo mediante la Ecuación 5.19.

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{I_{SC} - I_{mp}} - \frac{V_{OC} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (5.19)$$

5.5. Procedimiento General de Cálculo

Una vez implementados esta serie de métodos para la estimación de parámetros, el programa final realizado en MatLab, que muestra las gráficas comparativas y los parámetros calculados, sigue el diagrama de flujo de la Figura 5.1 y el programa completo realizado en MatLab aparece en el Anexo I.

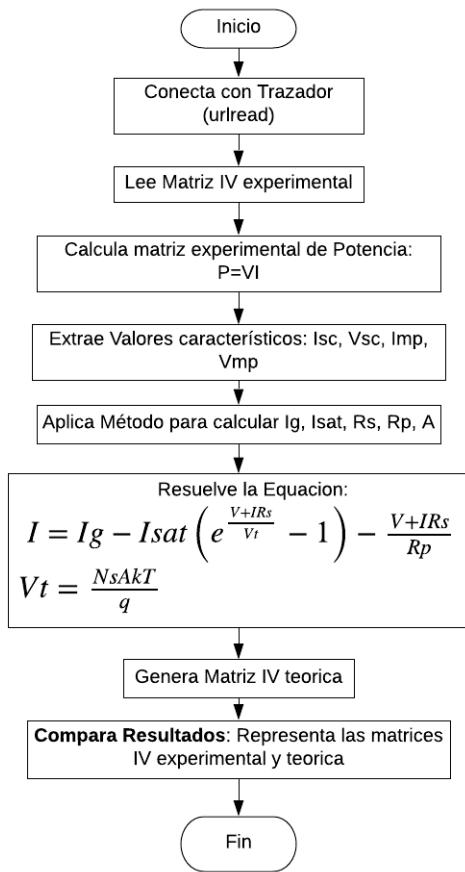


Figura 5.1.: Diagrama de Flujo del programa realizado en MatLab para mostrar las gráficas y las tablas de parámetros obtenidos mediante los métodos mencionados en Capítulo 5.

5.6. Resultados Obtenidos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con los diferentes métodos utilizados para la Estimación de Parámetros de la Placa Solar. Para realizar un análisis completo de las curvas teóricas obtenidas, se considera que la curva I-V de un panel fotovoltaico está formada por tres zonas diferenciadas: zona de corriente constante, zona de máxima potencia y zona de caída exponencial (Figura 5.2).

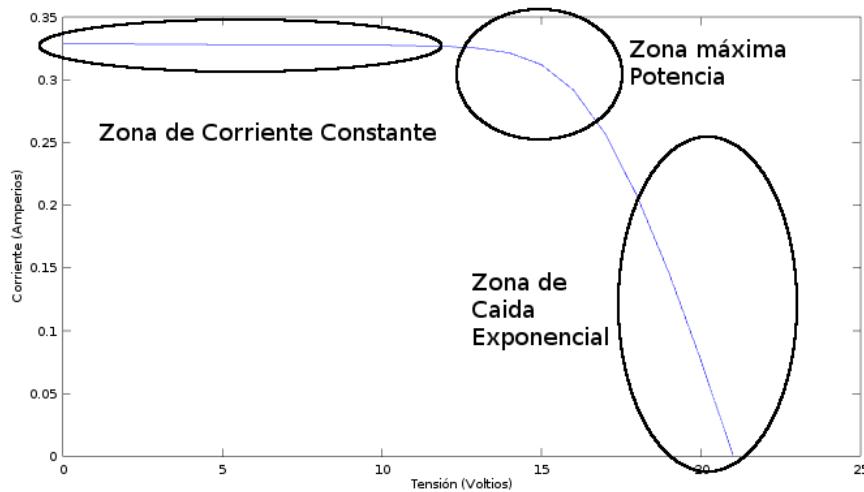


Figura 5.2.: Delimitación de Zonas de una curva I-V.

5.6.1. Método Randy Williams

La curva modelada obtenida a partir de este modelo para unas condiciones prácticamente estándar aparece en Figura 5.3.

En la zona de corriente constante, se ajusta notablemente bien, sin embargo esto es debido a que la curva experimental apenas presenta la pendiente debida a una resistencia en paralelo, en esta zona. Al ser un método de cuatro parámetros no considera esta caída y una curva tomada en condiciones no estándar Figura 5.4, se aprecia dicho desajuste.

En la zona del punto de máxima potencia el ajuste refleja mucha exactitud, tal y como aparece en sus valores característicos Tabla 5.1. En la zona de caída exponencial existe alguna desigualdad, pero no llega a ser relevante.

(a) Parámetros Obtenidos Método RW.

	Condiciones Estándar	Condiciones No Estándar
$I_g(A)$	0.32903	0.29874
A	0.81721	0.81082
$I_{Sat}(A)$	3.9613e-13	2.8154e-13
$R_S (\Omega)$	11.806	13.671
$R_P (\Omega)$	Inf	Inf

(b) Valores Obtenidos Método RW.

	Condiciones Estándar		Condiciones No Estándar	
	Experimentales	Método RW	Experimentales	Método RW
$I_{SC}(A)$	0.32903	0.32903	0.29874	0.29874
$V_{OC}(V)$	21.013	21	21.034	21
$P_m(W)$	4.7031	4.6955	4.2284	4.1904
$I_{mpp}(A)$	0.30744	0.31303	0.27876	0.27936
$V_{mpp}(V)$	15.298	15	15.169	15

Cuadro 5.1.: Datos Obtenidos mediante el método Randy Williams.

5.6 Resultados Obtenidos

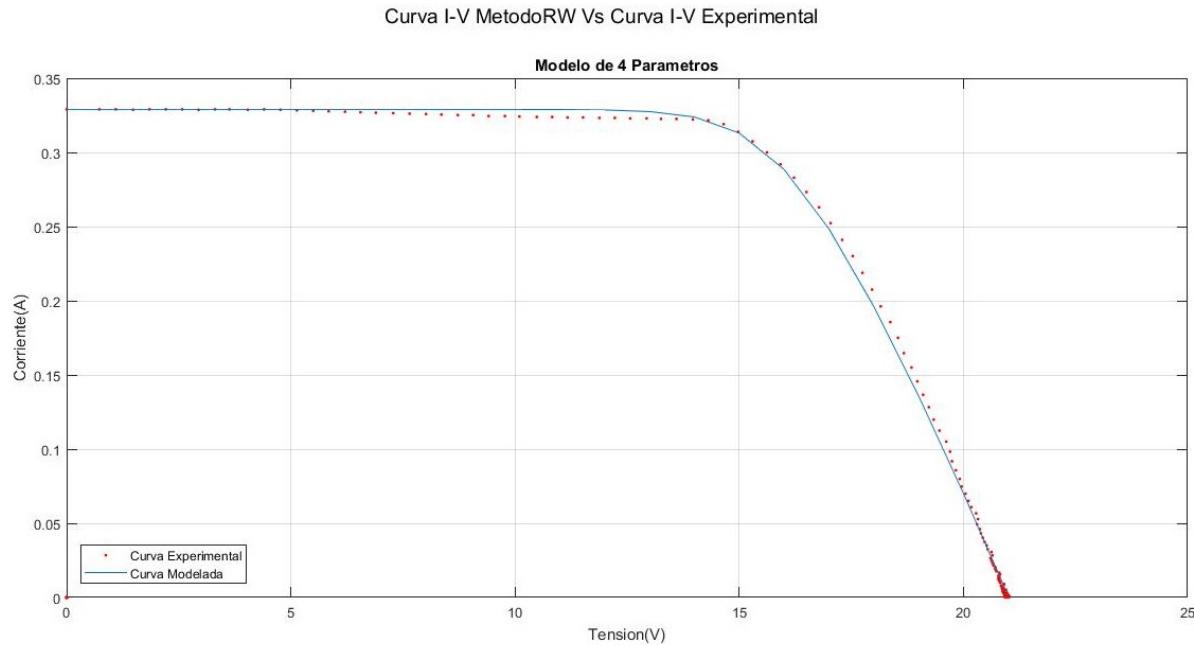


Figura 5.3.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Randy Williams.

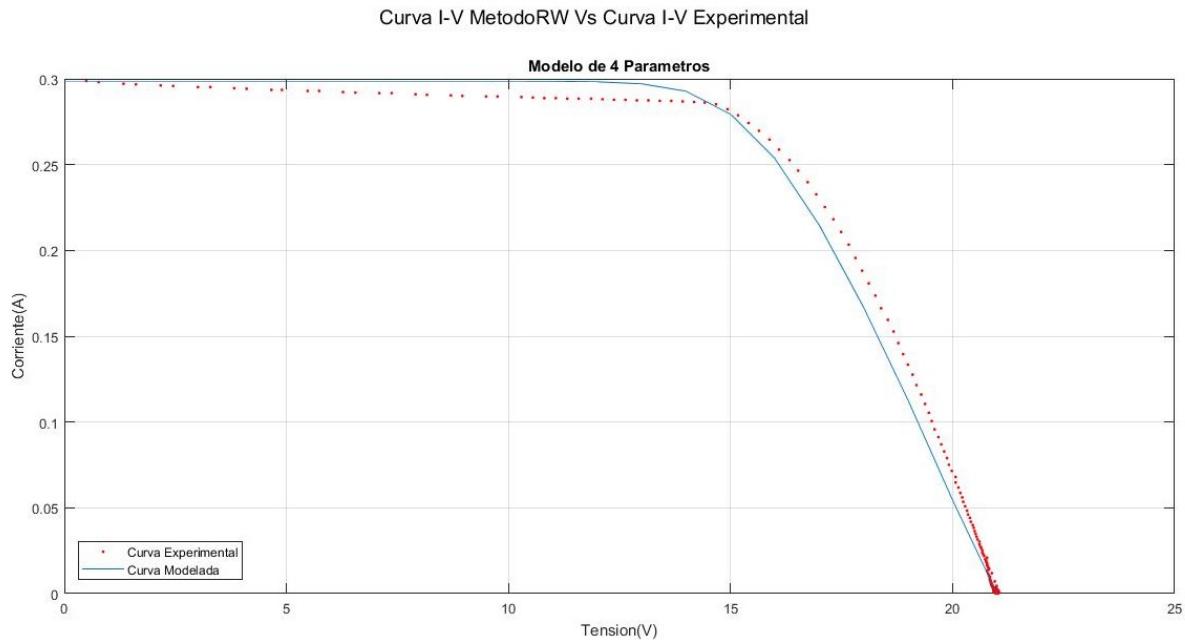


Figura 5.4.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Randy Williams. En condiciones no Estándar.

5.6.2. Método Xiao

La curva teórica obtenida aparece junto con la experimental en la Figura 5.5. A diferencia de la anterior, en la zona de caída exponencial se ajusta de manera prácticamente exacta.

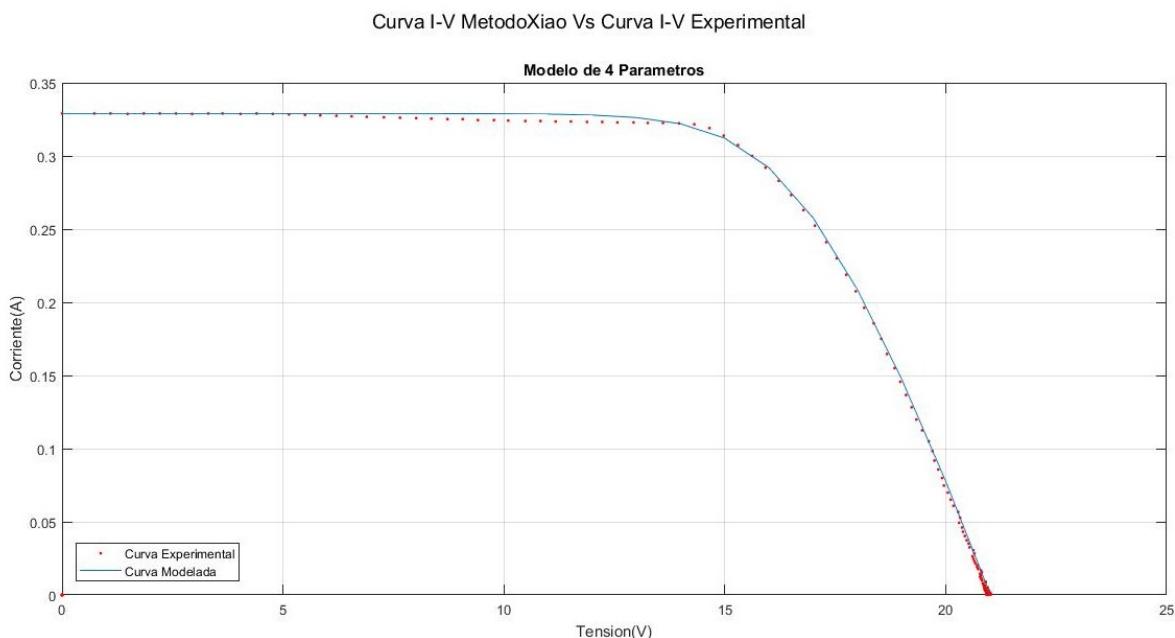
En la zona de corriente constante ocurre lo mismo que el método de Randy Williams. Al ser un método que solo calcula cuatro parámetros, en cuanto existe una pequeña pendiente en esta zona debido a las pérdidas, no se ajusta bien (Figura 5.6). En el punto de máxima potencia existe alguna variación en ambos casos, una diferencia de aproximadamente 0.1 W (Tabla 5.2). Este método a pesar de complicar algo más el cálculo de los cuatro parámetros que el método Randy Williams, no obtiene una mayor exactitud.

(a) Parámetros Obtenidos Método Xiao.

	Condiciones Estándar	Condiciones No Estándar
$I_g(A)$	0.32903	0.29874
A	1.1	1.05
$I_{Sat}(A)$	4.5925e-10	1.5451e-10
$R_S(\Omega)$	9.4585	11.496
$R_P(\Omega)$	Inf	Inf

(b) Valores Obtenidos Método Xiao.

	Condiciones Estándar		Condiciones No Estándar	
	Experimentales	Método Xiao	Experimentales	Método Xiao
$I_{SC}(A)$	0.32903	0.32903	0.29874	0.29874
$V_{OC}(V)$	21.013	21	21.034	21
$P_m(W)$	4.7031	4.6817	4.2284	4.1942
$I_{mpp}(A)$	0.30744	0.31211	0.27876	0.27962
$V_{mpp}(V)$	15.298	15	15.169	15

Cuadro 5.2.: Datos Obtenidos mediante el método Xiao.**Figura 5.5.:** Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Xiao.

5.6 Resultados Obtenidos

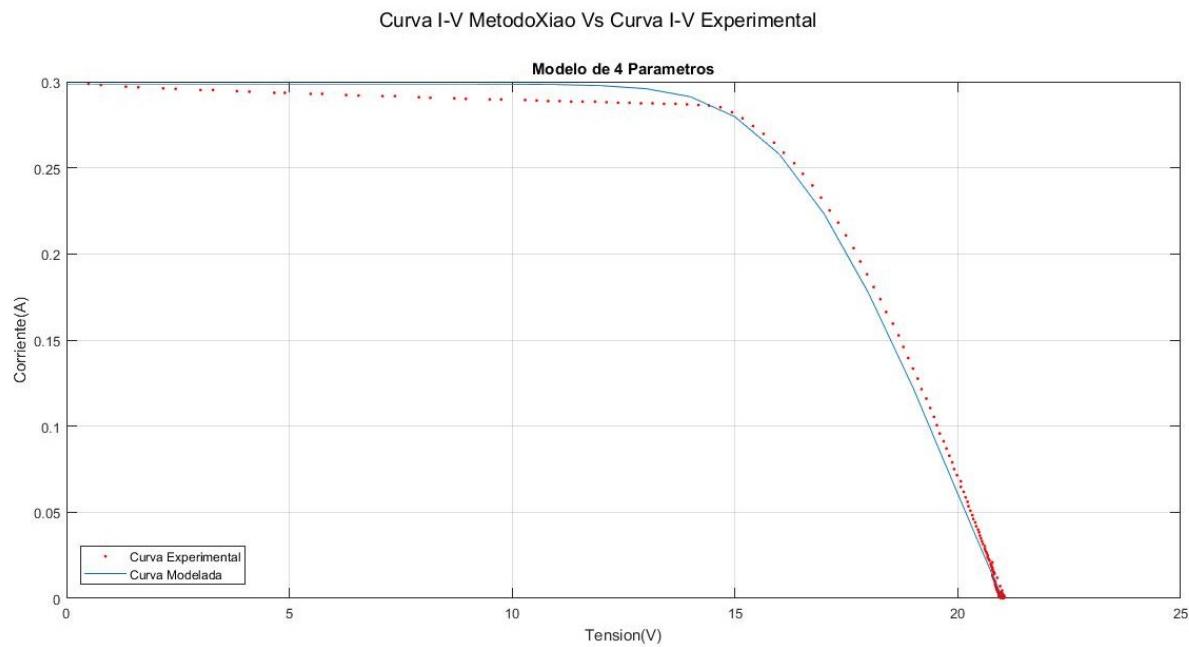


Figura 5.6.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Xiao. En condiciones no Estándar.

5.6.3. Método Silva

Tal y como se muestra en la Figura 5.7, la curva teórica calculada mediante este método es prácticamente perfecta y sus valores característicos se ajustan muy bien a los experimentales Tabla 5.3. Salvo algún desajuste en la zona de máxima potencia y en el final de la zona de corriente constante.

Puesto que, calcula cinco parámetros, en condiciones de iluminación dónde la pendiente en la zona de corriente constante es apreciable, éste método se ajusta igual de bien (Figura 5.8).

(a) Parámetros Obtenidos Método Silva.

	Condiciones Estándar	Condiciones No Estándar
I_g (A)	0.32903	0.29874
A	1	1
I_{Sat} (A)	5.9641e-11	5.1972e-11
R_S (Ω)	10	11
R_P (Ω)	8769.5	3488.1

(b) Valores Obtenidos Método Silva.

	Condiciones Estándar		Condiciones No Estándar	
	Experimentales	Método Silva	Experimentales	Método Silva
I_{SC} (A)	0.32903	0.32903	0.29874	0.29874
V_{OC} (V)	21.013	21	21.034	21
P_m (W)	4.7031	4.6807	4.2284	4.1949
I_{mpp} (A)	0.30744	0.31204	0.27876	0.27966
V_{mpp} (V)	15.298	15	15.169	15

Cuadro 5.3.: Datos Obtenidos mediante el método Silva.

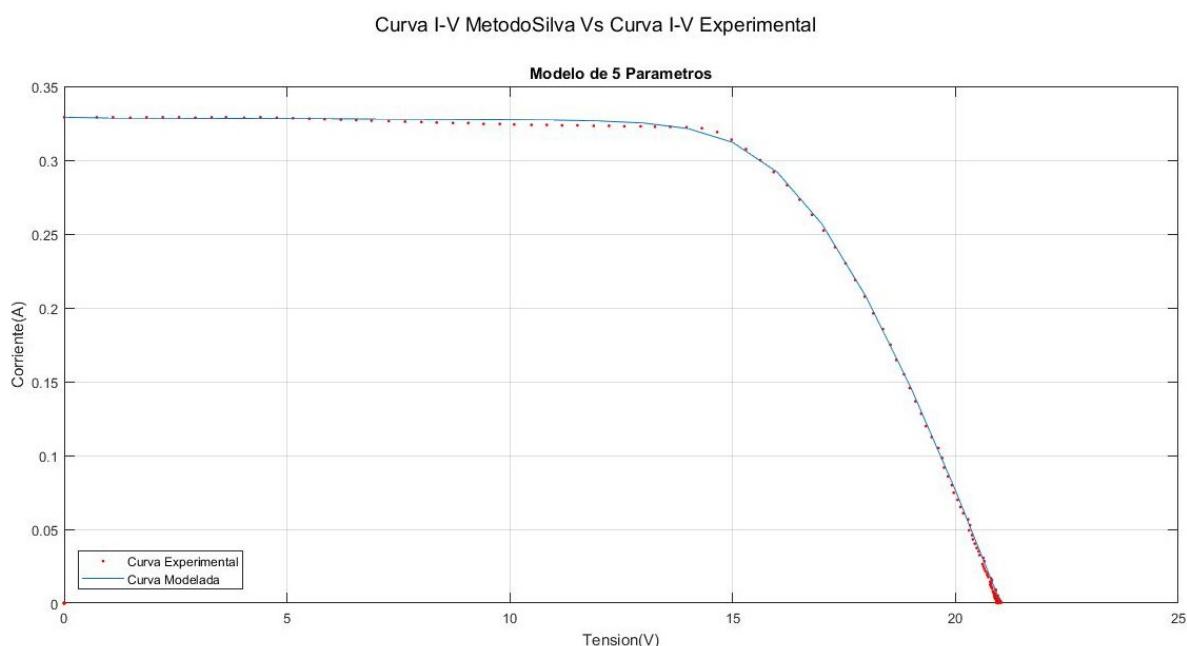


Figura 5.7.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Silva

5.6 Resultados Obtenidos

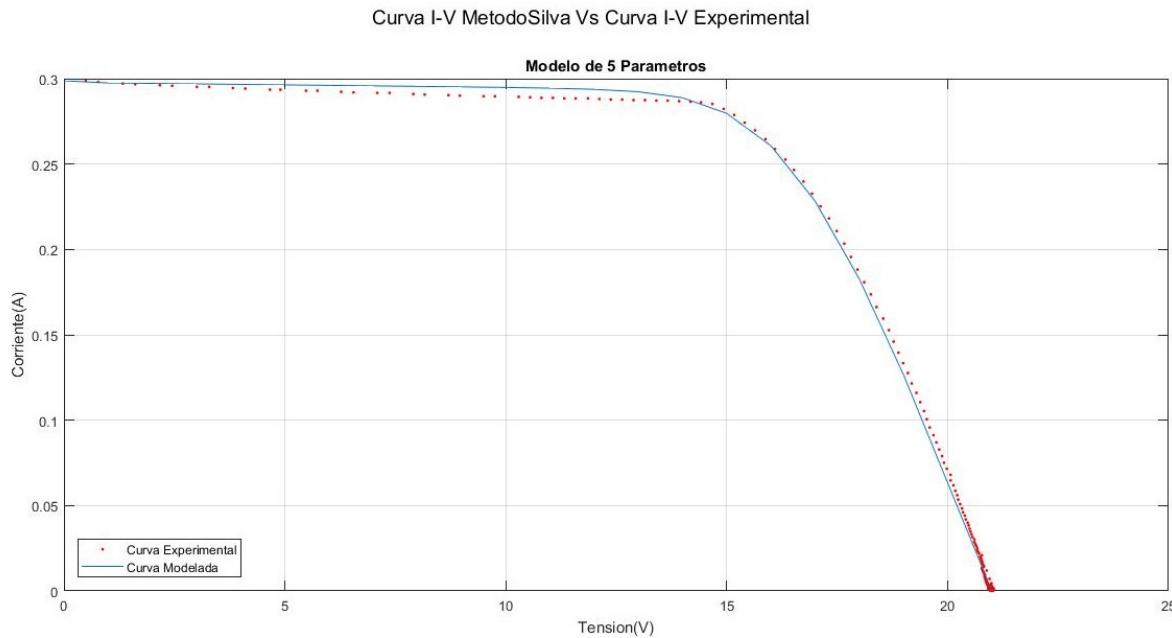


Figura 5.8.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Silva.
Condiciones no Estándar

5.6.4. Método Villalva

Al igual que el método Silva, el ajuste obtenido es muy bueno. Sin embargo presenta errores de exactitud mayores en la zona del punto de máxima potencia y en la caída exponencial. Las curvas obtenidas se muestran en las Figura 5.9 y Figura 5.10.

A pesar de éstos pequeños desajustes, este método es capaz de adaptarse a la pendiente ocasionada por la resistencia en paralelo (Figura 5.10). Los datos obtenidos, parámetros y valores característicos de la curva teórica aparecen en Tabla 5.4.

(a) Parámetros Obtenidos Método Villalva.

	Condiciones Estándar	Condiciones No Estándar
I_g (A)	0.32911	0.29933
A	1.3	1.3
I_{Sat} (A)	1.0578e-8	9.4359e-9
R_S (Ω)	7.8	8.3
R_P (Ω)	33287	4182

(b) Valores Obtenidos Método Villalva.

	Condiciones Estándar		Condiciones No Estándar	
	Experimentales	Método Villalva	Experimentales	Método Villalva
I_{SC} (A)	0.32903	0.32911	0.29874	0.29933
V_{OC} (V)	21.013	21	21.034	21
P_m (W)	4.7031	4.7053	4.2284	4.2329
I_{mpp} (A)	0.30744	0.29408	0.27876	0.26456
V_{mpp} (V)	15.298	16	15.169	16

Cuadro 5.4.: Datos Obtenidos mediante el método Villalva.

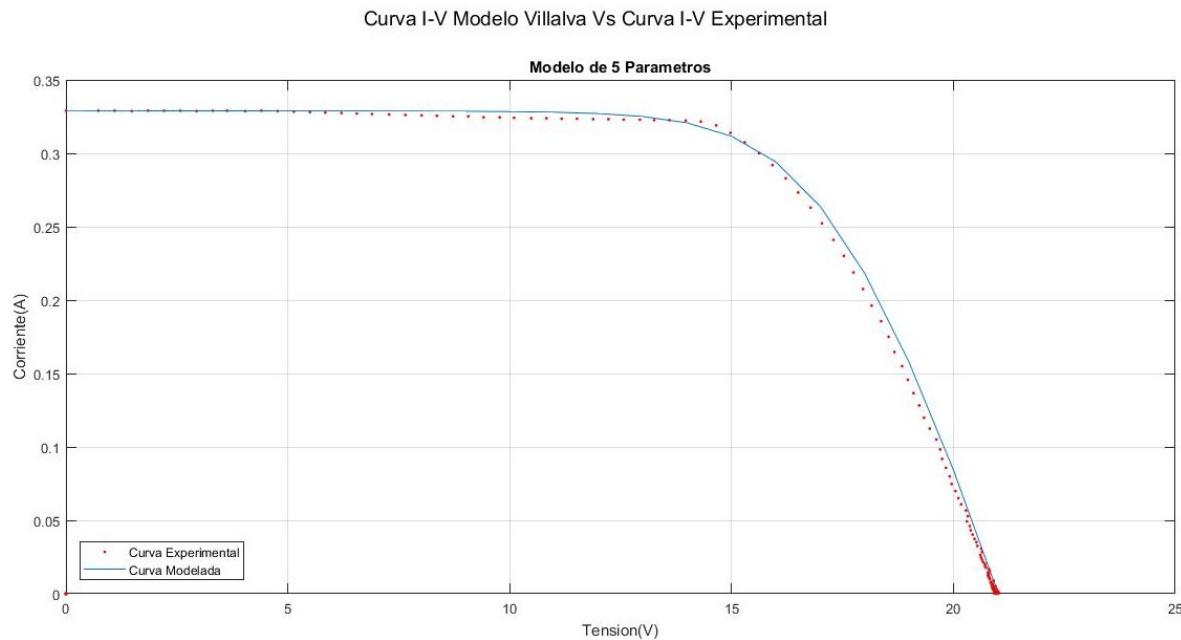


Figura 5.9.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Villalva.

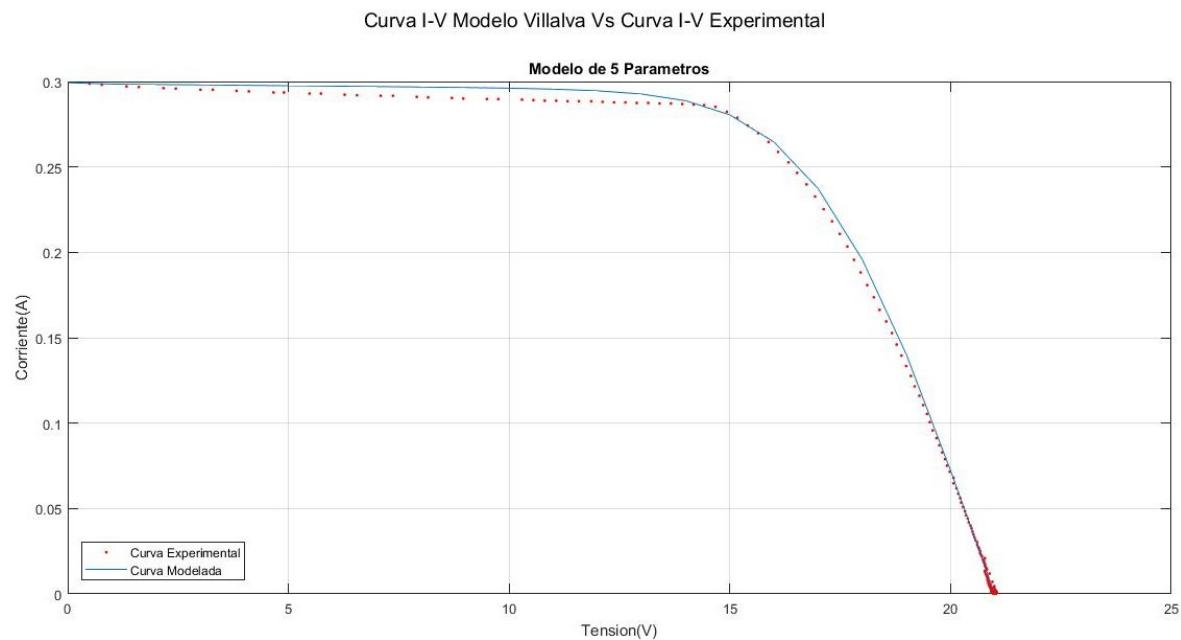


Figura 5.10.: Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Villalva. Condiciones no estándar.

5.7. Comparación Resultados de los Métodos utilizados

La comparación de las curvas teóricas I-V y P-V obtenidas, y sus parámetros aparecen en las Figura 5.11 y Figura 5.12, para condiciones prácticamente estándar. Los parámetros

obtenidos para cada método se muestran en la Figura 5.13 y los valores característicos de las curvas teóricas en Figura 5.14.

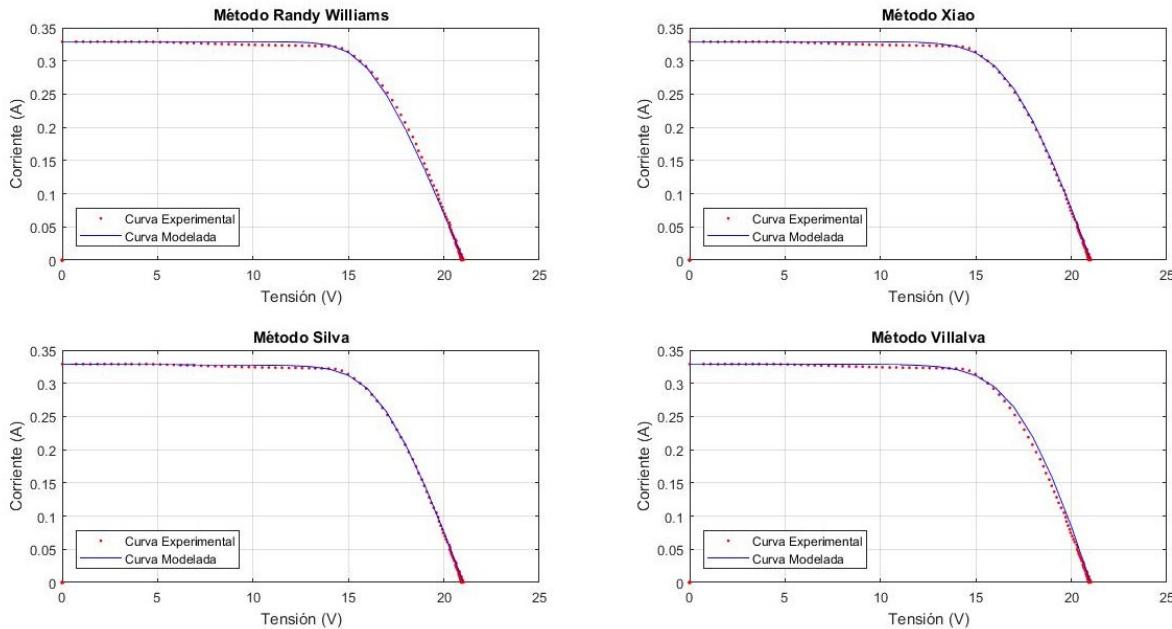


Figura 5.11.: Comparación Resultados Curvas I-V en condiciones Estándar.

Como se puede observar la diferencia de exactitud entre los métodos utilizados es mínima en este caso. Resaltando el método Silva, que logra ajustarse mejor que los demás en la zona de corriente constante, dónde en la curva Experimental aparece cierta pendiente.

Sin embargo esto no ocurre cuando las condiciones ya no son estándar y por tanto, existen modificaciones debido a las pérdidas. La comparación de los métodos para condiciones no estándar aparecen en las Figura 5.15 y Figura 5.16. Las Figura 5.17 y Figura 5.18 muestran los parámetros y valores característicos obtenidos.

Se aprecia que en la curva experimental la pendiente que aparece en la zona de corriente constante es mucho más acentuada. Puesto que, esta pendiente se debe a las pérdidas relacionadas con la resistencia en paralelo, los métodos de cinco parámetros se ajustan notablemente mejor que los de cuatro parámetros, sobre todo en torno al punto de máxima potencia.

A pesar de obtener mayor exactitud con los modelos de cinco parámetros, el ajuste obtenido con los de cuatro parámetros no es un ajuste demasiado malo y la curva se modela adecuadamente.

Entre los métodos Silva y Villalva, el método Silva al igual que en el caso anterior consigue realizar el mejor el ajuste para las zonas de corrientes constante y de caída exponencial. Para el punto de máxima potencia la exactitud de ambos métodos es equiparable.

Los métodos de cuatro parámetros obtienen un ajuste menos exacto, pero en términos de la máxima potencia, todos los modelos utilizados consiguen aproximarse a este valor de forma bastante exacta. Esto los hace aptos para la simulación de sistemas de búsqueda del punto de máxima potencia.

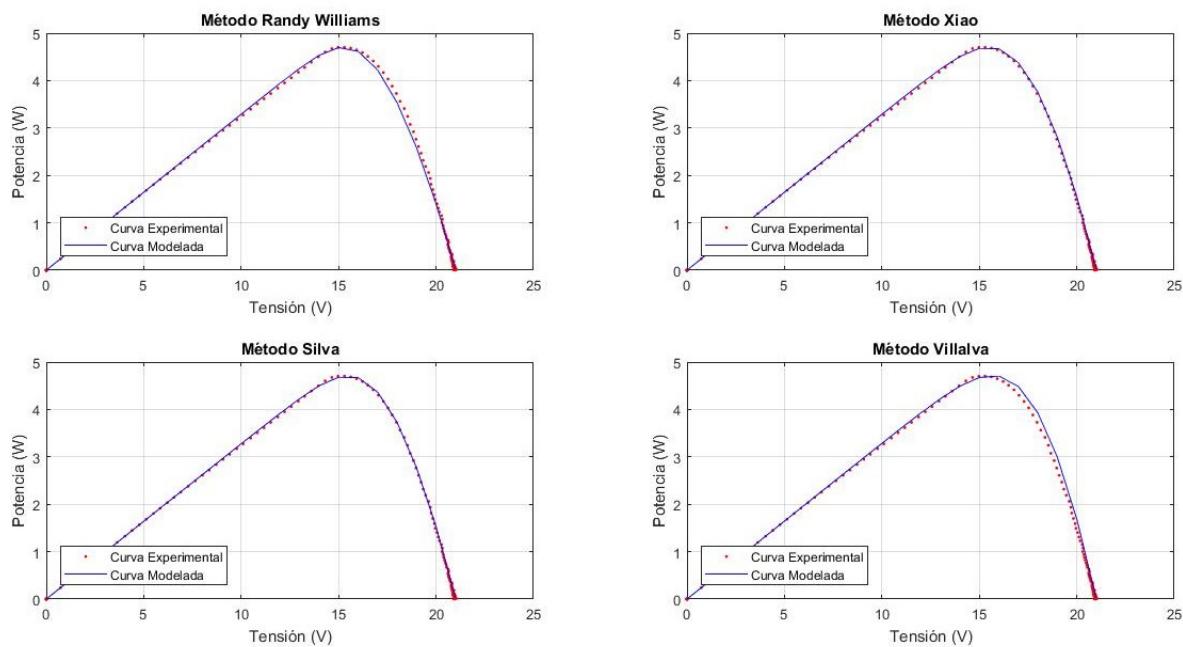


Figura 5.12.: Comparación Resultados Curvas I-V en Condiciones Estándar.

	ParametrosRW	ParametrosXiao	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.32903	0.32903	0.32903	0.32911
A	0.81721	1.1	1	1.3
Isat	3.9613e-13	4.5925e-10	5.9341e-11	1.0578e-08
Rs	11.806	9.4587	10	7.8
Rp	Inf	Inf	8769.5	33287

Figura 5.13.: Parámetros obtenidos en Condiciones Estándar. I_g e I_{Sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoRW	MetodoXiao	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.32903	0.32903	0.32903	0.32903	0.32911
Voc	21.013	21	21	21	21
Pm	4.7031	4.6955	4.6817	4.6807	4.7053
Impp	0.30744	0.31303	0.31211	0.31204	0.29408
Vmpp	15.298	15	15	15	16

Figura 5.14.: Valores Característicos Curvas Teóricas en Condiciones Estándar. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

5.7 Comparación Resultados de los Métodos utilizados

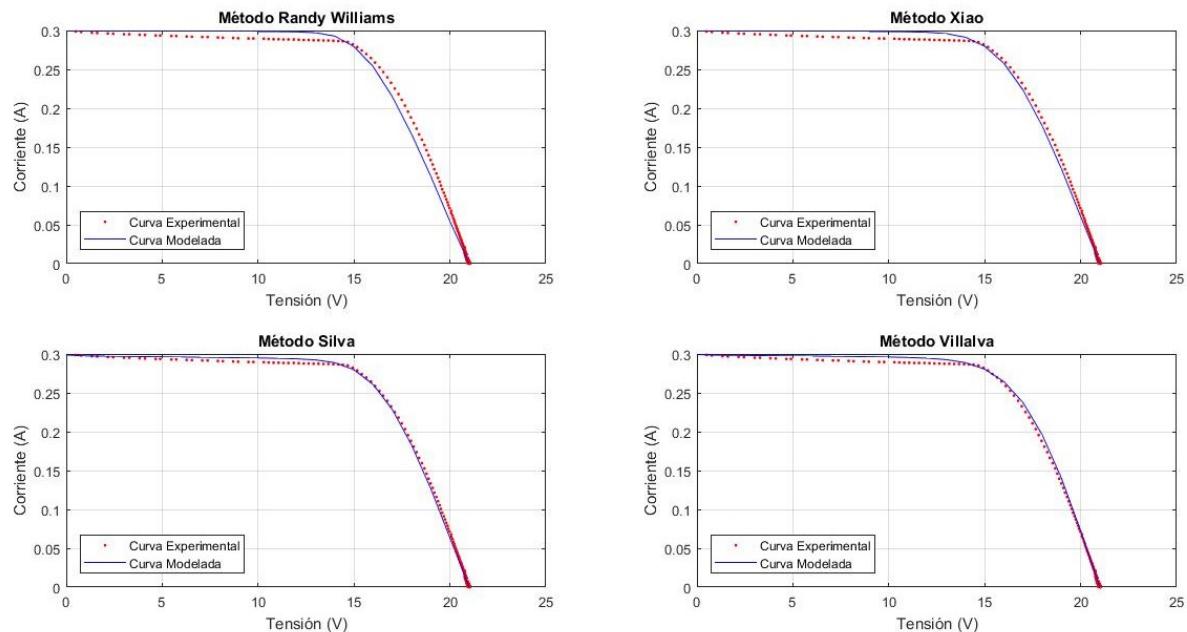


Figura 5.15.: Comparación de Resultados Curvas I-V en Condiciones no Estándar.

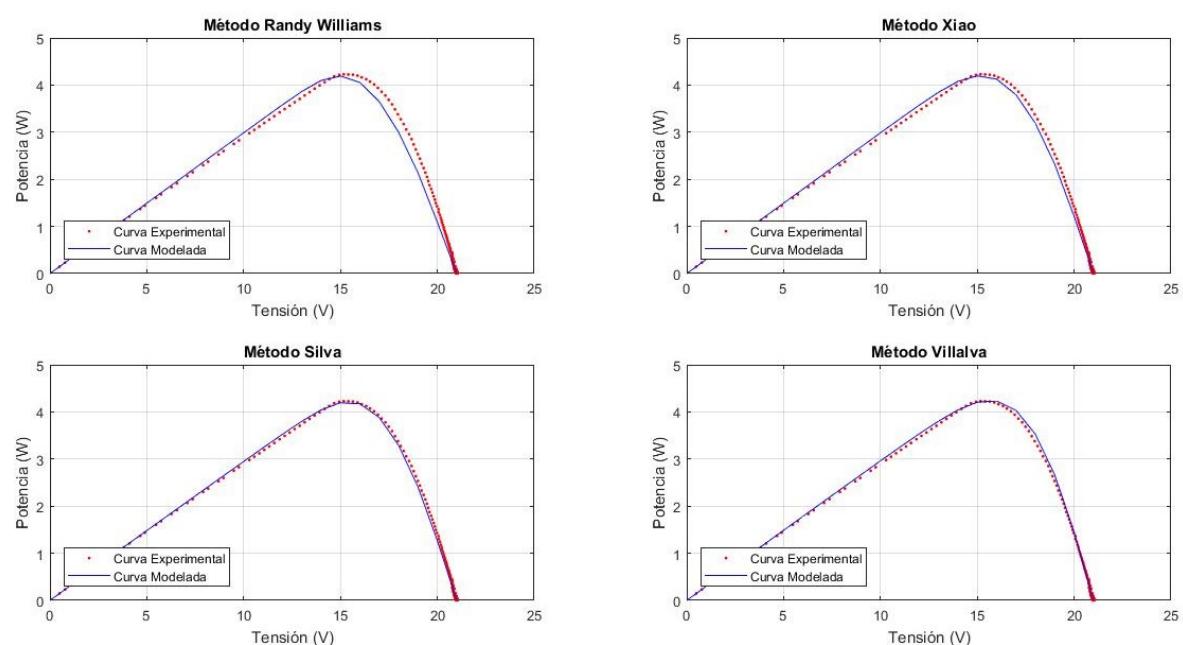


Figura 5.16.: Comparación Curvas P-V en Condiciones no Estándar.

	ParametrosRW	ParametrosXiao	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.29874	0.29874	0.29874	0.29933
A	0.81082	1.05	1	1.3
Isat	2.8154e-13	1.5451e-10	5.1972e-11	9.4359e-09
Rs	13.671	11.496	11	8.3
Rp	Inf	Inf	3488.1	4182

Figura 5.17.: Parámetros Obtenidos para Condiciones no Estándar. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_P en Ω .

	Experimentales	MetodoRW	MetodoXiao	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.29874	0.29874	0.29874	0.29874	0.29933
Voc	21.034	21	21	21	21
Pm	4.2284	4.1904	4.1942	4.1949	4.2329
Imp	0.27876	0.27936	0.27962	0.27966	0.26456
Vmpp	15.169	15	15	15	16

Figura 5.18.: Valores Característicos de las curvas Teóricas Obtenidas. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

6. Fuente de Iluminación

Con el fin de controlar la iluminación incidente en el panel, para tomar diferentes muestras a diferentes niveles de iluminación, se ha diseñado una fuente de iluminación que consiste, de forma elemental, en una Matriz de LEDs. Éstos se colocan en una formación que permita que la luz incidente sea lo más uniforme posible. El hecho de que esta iluminación sea uniforme, evita que se formen zonas de sombras y se limite la intensidad generada.

6.1. Diseño

Los LEDs utilizados en el diseño son los LEDs Golden Dragon Plus de OSRAM (Figura 6.1) [8].

El porcentaje (en tanto por uno) de iluminación que proporciona un LED en un determinado punto, depende del ángulo de incidencia de la luz. Esta relación está definida en las hojas de características de los LEDs, mediante la gráfica de la Figura 6.2.



Figura 6.1.: LED Golden Dragon Plus.

Con esta información, se realiza una función (Anexo I) que calcula el porcentaje de iluminación que existe en un punto concreto de la superficie del panel, debido a un determinado LED, a partir de la distancia vertical y horizontal entre ellos (ángulo de incidencia).

Puesto que, la fuente de iluminación será un conjunto de LEDs, para saber la iluminación total de un punto de la placa, es necesario sumar el porcentaje de iluminación que le llega desde cada uno de los LEDs. Si se realiza esta sumatoria para todos los puntos de la superficie del panel (se ha escogido un punto por cada mm), da como resultado, la iluminación total que recibe cada punto.

En la Figura 6.3 se muestra la distribución de iluminación que genera un LED, en la superficie de la placa, colocado en el centro de ésta a 20 cm de altura.

La fuente de iluminación, estará formada por 24 LEDs, distribuidos en dos filas de doce LEDs, equidistantes entre ellos, separados 36 mm de los bordes del panel. Situada a 20 cm de altura con respecto al panel. Esta formación genera una distribución de iluminación en la superficie del panel, la cual se muestra en la Figura 6.4 y la programación necesaria en el Anexo I.

El mínimo valor de iluminación obtenido asciende a un porcentaje (en tanto por uno) de 20.3941 y el máximo a 22.0442. La diferencia de iluminación entre el punto más iluminado y menos iluminado es de 1.6501. Comparado con los niveles obtenidos, los puntos menos iluminados reciben un 7.4854 % menos de luz que los que reciben la máxima iluminación.

Radiation Characteristics 5) page 25**Abstrahlcharakteristik** 5) Seite 25

$$I_{\text{rel}} = f(\varphi); T_S = 25^\circ \text{C}$$

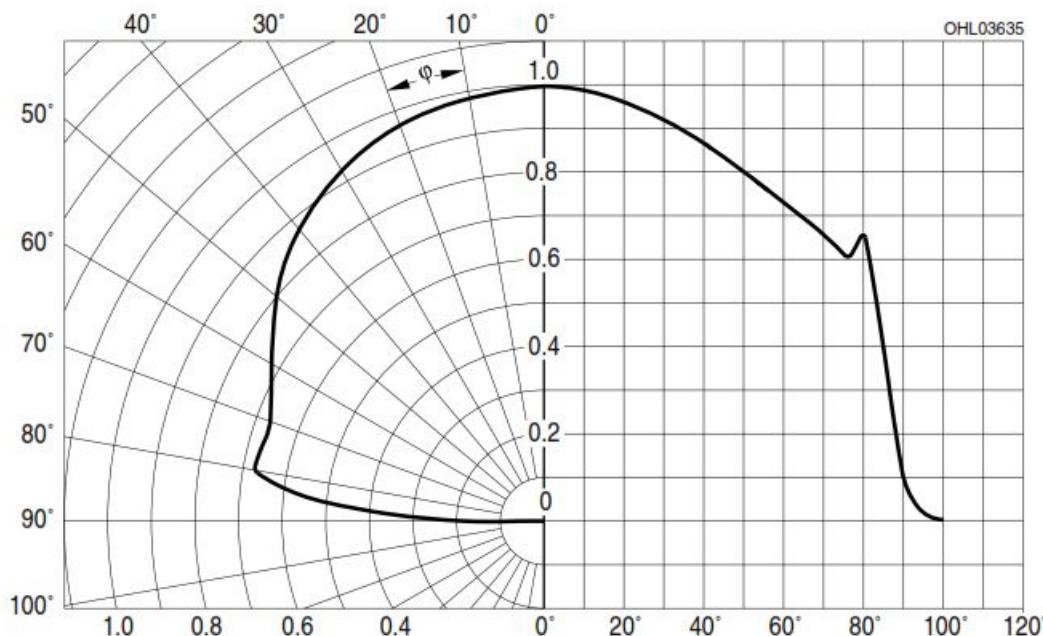


Figura 6.2.: Porcentaje de Iluminación dependiendo del ángulo de incidencia.

Este porcentaje no supone un error a tener en cuenta, para este diseño. La distribución se considera, por tanto, uniforme.

Las dimensiones de la Fuente de Iluminación, son aproximadamente las de un folio Din A4. Para su diseño, se va a separar en dos placas de dimensiones de un folio Din A5, es decir $210 \times 148 \text{ mm}^2$. El programa utilizado para el diseño es EAGLE 7.6.0. La finalidad del diseño de esta fuente es tener la posibilidad de cambiar el nivel de iluminación proporcionado por los LEDs.

Se utiliza una salida PWM (entre 0 y 5 V) del microcontrolador, conectada a la entrada de un filtro paso baja RC. Este filtro está conectado a su vez a un divisor de tensión. Por tanto, al cambiar el ciclo de trabajo de la señal PWM, se obtiene una señal prácticamente continua en la salida del filtro que toma valores entre 0 y 1 V debido al divisor de tensión.

A la salida del filtro, se coloca un amplificador operacional, cuya salida está conectada a un transistor BJT NPN en configuración emisor común. En el colector están conectados 6 LEDs en serie y en el emisor se realiza la realimentación del operacional y la derivación a tierra, a través de una resistencia de potencia de 2 ohmios. El circuito resultante aparece en la Figura 6.5.

Este circuito de control, se realiza para cada 6 LEDs en serie. Cada media placa consta de 6 conectores separados de dos en dos. Un par de ellos son los de conexión a la fuente de Alimentación (VCC y GND), el segundo par se encarga de las conexiones con el microcontrolador (la entrada de PWM y la alimentación de los amplificadores operacionales a 5 V). Por último, el tercer par son dos conectores de GND.

Los conectores están dobles para que las placas se puedan unir sin necesidad de cables excesivamente largos. Cada placa A5 tendrá conectores a ambos lados para poder conectarse la siguiente placa A5 y así formar la placa completa de A4.

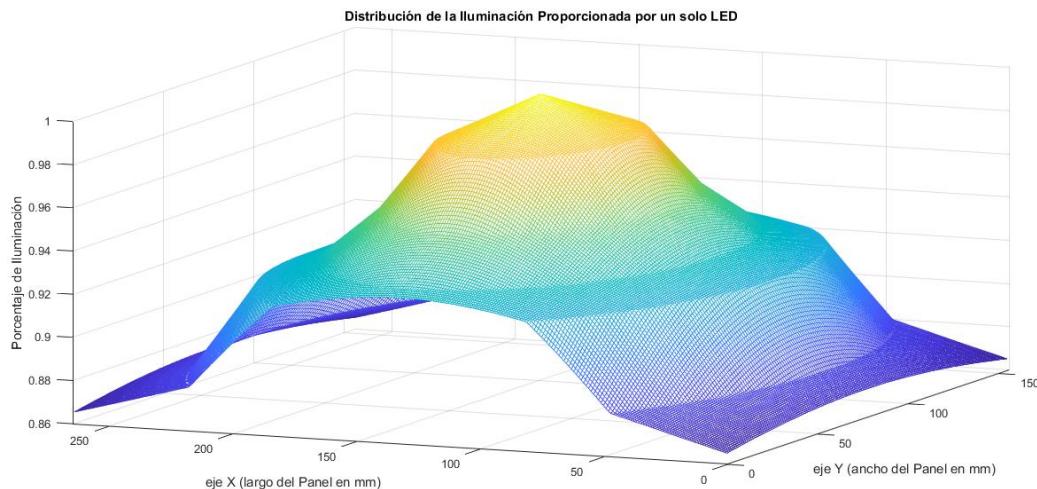


Figura 6.3.: Distribución de la iluminación proporcionada por un LED central, a 20 cm de altura de la superficie de la Placa Solar.

El diseño final de la placa de circuito impreso es el la Figura 6.6.

6.2. Implementación

Debido a problemas en el envío de las placas de circuito impreso diseñadas de la fuente de iluminación, se ha realizado un sistema de iluminación provisional que reúne aproximadamente las mismas características que la fuente de iluminación diseñada.

Los LEDs utilizados han sido LEDs LUW WSPM Golden Dragon de OSRAM. El espectro de estos LEDs utilizados y los que se han utilizado para el diseño, aparecen en las Figura 6.8 y Figura 6.7 respectivamente.

Como se puede observar, los dos espectros son muy similares, aunque el del LED inicial cubre un mayor rango de longitudes de onda.

Puesto que, es un montaje provisional se prescinde del circuito de control, utilizando en su lugar una fuente de alimentación que permita la variación de la intensidad suministrada.

El sistema de soporte, es cerrado, con en el fin de mejorar el nivel de iluminación existente en los bordes del panel. El sistema completo, con la fuente provisional de iluminación aparece en la Figura 6.9.

6.3. Curvas Obtenidas con Fuente de Iluminación. Eficiencia.

Ponderando el espectro del LED (Figura 6.8) de forma teórica con una curva típica de eficiencia cuántica externa de una célula de silicio, se ha estimado que, por cada wattio de irradiancia total de la luz procedente de los LEDs, en la superficie del panel, se genera una corriente en cortocircuito de 5.73 mA.

Por lo tanto, de la corriente en cortocircuito experimental se puede usar para estimar la potencia de la radiación emitida por los LEDs en W.

Para una intensidad suministrada a los LEDs de 0.8 A a una tensión de 12.08 V, la potencia eléctrica consumida por los LEDs es $P_{LED} = V_{LED}I_{LED} = 9.66 W$. La intensidad

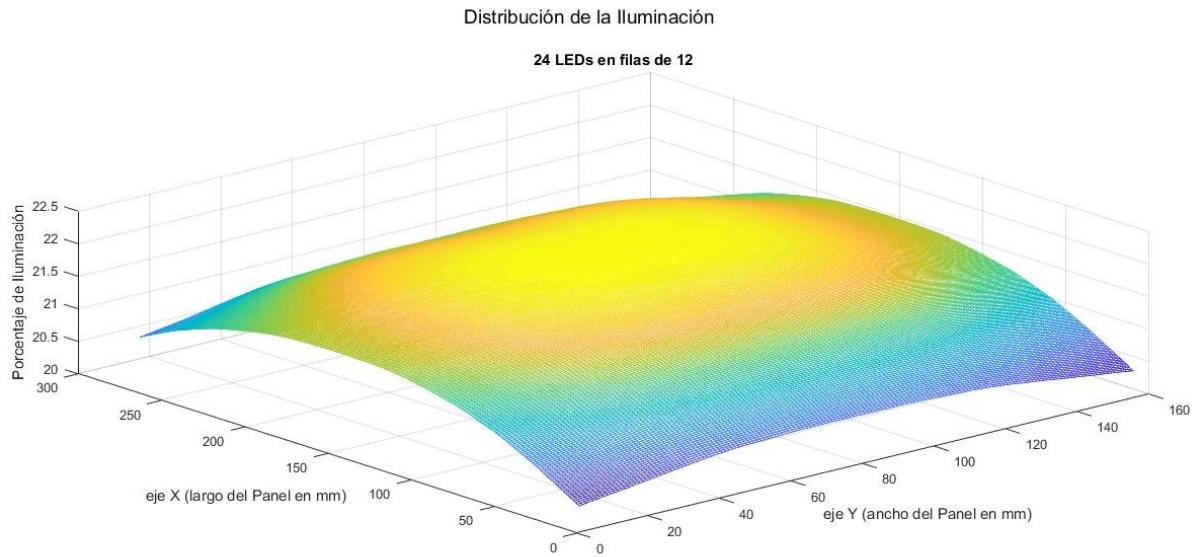


Figura 6.4.: Distribución de la iluminación en la superficie del panel para una formación de 2x12 LEDs.

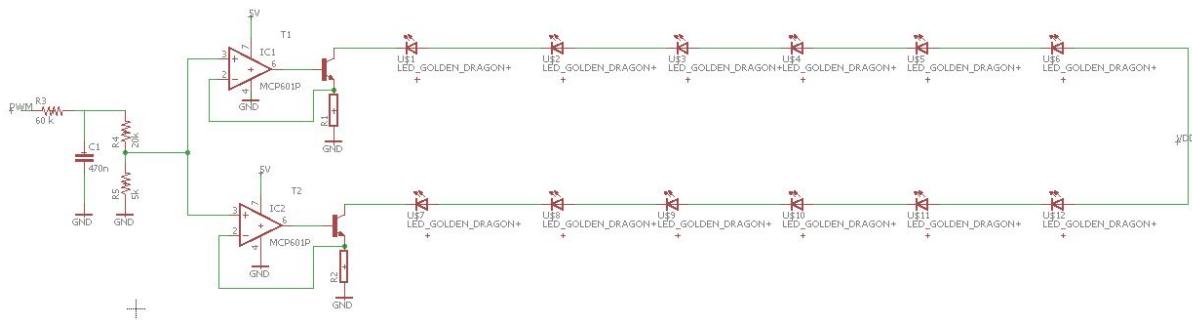


Figura 6.5.: Circuito Correspondiente a media Fuente de Iluminación.

de cortocircuito obtenida para una $I_L = 0,8 A$ es de 16.44 mA. Con estos datos se puede calcular la potencia radiada por los LEDs y por lo tanto su eficiencia, Ecuación 6.1 y Ecuación 6.2.

$$P_{RAD} = \frac{I_{SC}}{I_{SC} \text{ generada por cada } W} = \frac{16,44 \text{ mA}}{5,73 \text{ mA}} = 2,869 \text{ W} \quad (6.1)$$

$$\eta_{LED} = \frac{P_{RAD}}{p_{LED}} = \frac{2,869 \text{ W}}{9,66 \text{ W}} = 0,2969 \longrightarrow 29,69 \% \quad (6.2)$$

De la potencia máxima de la curva obtenida para esta I_L , que es de 0.21 W y la potencia irradiada por los LEDs, se puede calcular la eficiencia eléctrica del panel Ecuación 6.3.

$$\eta_{Panel} = \frac{P_{obtenida}}{P_{RAD}} = \frac{0,21 \text{ W}}{2,869 \text{ W}} = 0,07318 \longrightarrow 7,318 \% \quad (6.3)$$

Por último la potencia máxima de la curva I-V frente a la potencia consumida por los

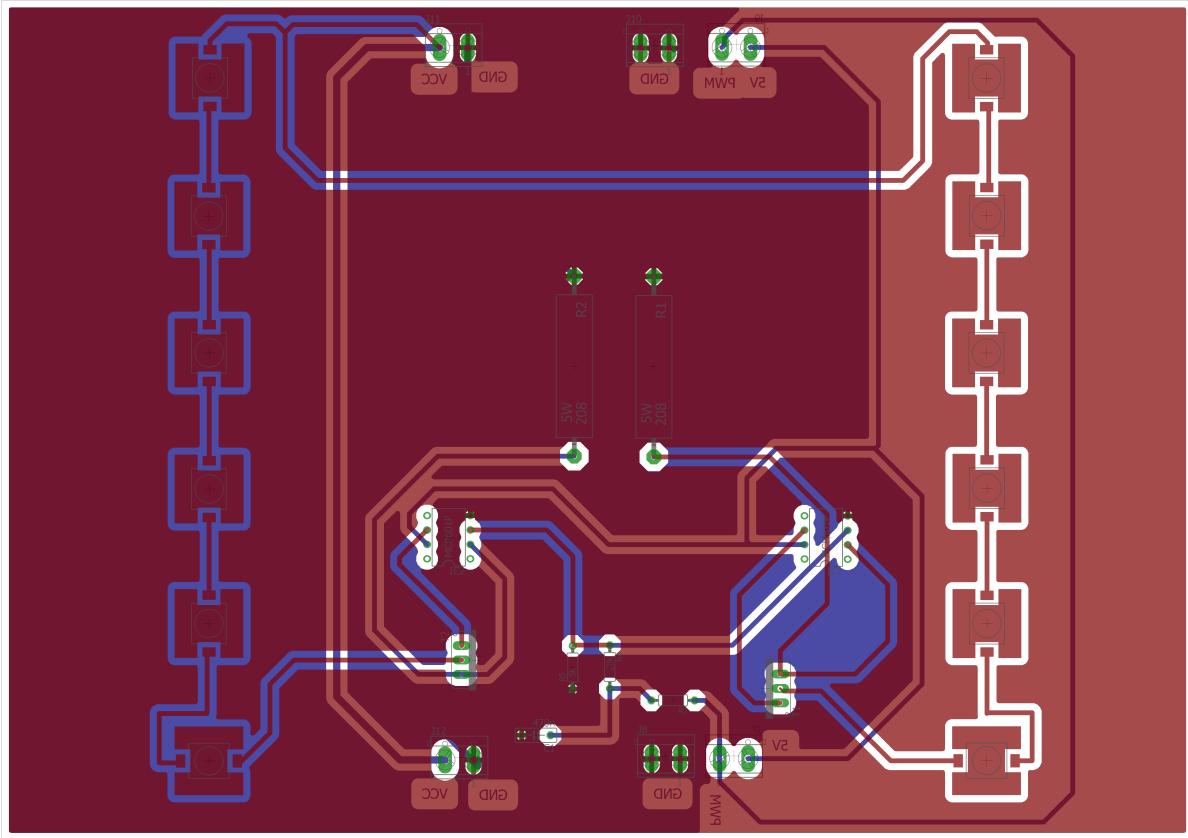


Figura 6.6.: PCB (media) Fuente de Iluminación.

LEDs, se obtiene la eficiencia del sistema total.

$$\eta_{Sistema} = \frac{P_{obtenida}}{P_{LED}} = \frac{0,21\text{ W}}{9,66\text{ W}} = 0,02173 \rightarrow 2,173\% \quad (6.4)$$

Realizando este calculo para todos los valores obtenidos de intensidad suministrada e intensidad de cortocircuito alcanzada, se obtiene la tabla de eficiencias (Tabla 6.1).

La eficiencia del panel oscila entre 7.31 y 8.34 % y a eficiencia eléctrica total desde la fuente de tensión hasta la salida del panel varía entre 1.86 % y 2.17 %. Estos valores son muy bajos. Este hecho puede deberse a que la energía media del espectro del LED es de unos 2.5 eV, mientras que la tensión de pico es de unos 0.4 V por célula, cabría estimar una eficiencia menor a $0.4/2.5 = 16\%$. Además, P_{RAD} se recibe sobre toda el área del panel, y el área realmente cubierta por las células es bastante menor. También, la iluminación no es totalmente uniforme y parte de la radiación sale fuera del área del panel y no se refleja totalmente en las paredes del cajón.

La dispersión que se obtiene al representar las corrientes de cortocircuito de las curvas obtenidas y la intensidad suministrada a los LEDs aparece en la Figura 6.10. En esta imagen se observa que el coeficiente de correlación es bastante alto y por lo tanto, existe una relación prácticamente lineal entre estas dos intensidades, a pesar de todos los factores de pérdidas.

Para representar la familia de curvas, no se tienen en cuenta las curvas correspondientes a una intensidad suministrada a la fuente de 2.1 A, 2 A y 2.8 A, debido a que son los

Relative Spectral Emission - $V(\lambda)$ = Standard eye response curve 5) page 25
Relative spektrale Emission - $V(\lambda)$ = spektrale Augenempfindlichkeit 5) Seite 25
 $\Phi_{rel} = f(\lambda)$; $T_S = 25^\circ\text{C}$; $I_F = 350 \text{ mA}$

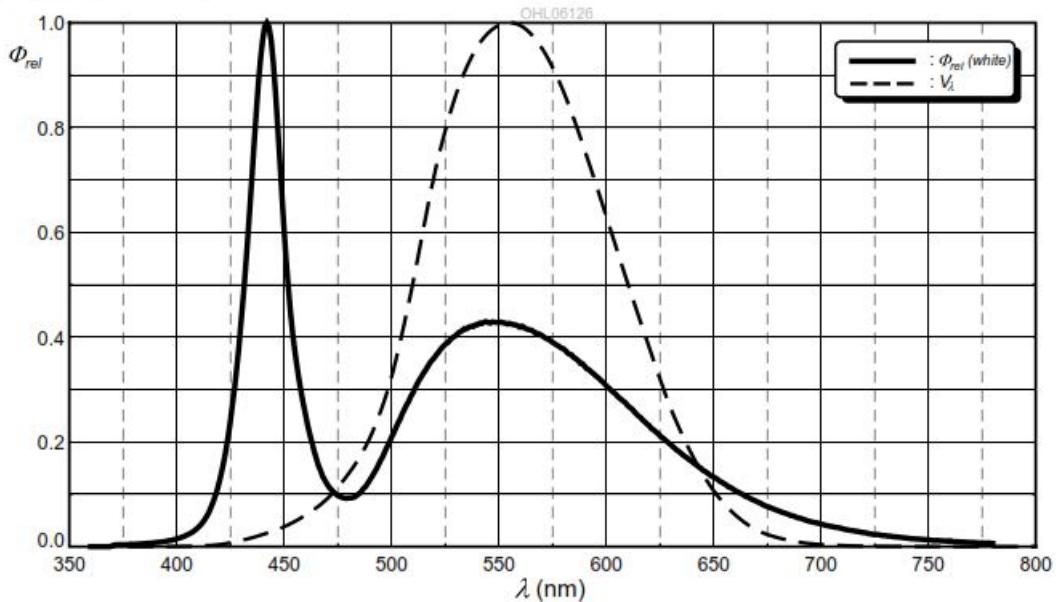


Figura 6.7.: Espectro de emisión LEDs Golden Gragon Plus.

datos que peor se ajustan en la línea de tendencia de la Figura 6.10. La familia de curvas obtenida aparece en la Figura 6.11.

6.3 Curvas Obtenidas con Fuente de Iluminación. Eficiencia.

Relative Spectral Emission^{2) page 18}

$V(\lambda)$ = spektrale Augenempfindlichkeit / Standard eye response curve

$\Phi_{\text{rel}} = f(\lambda); T_S = 25^\circ \text{C}; I_F = 350 \text{ mA}$

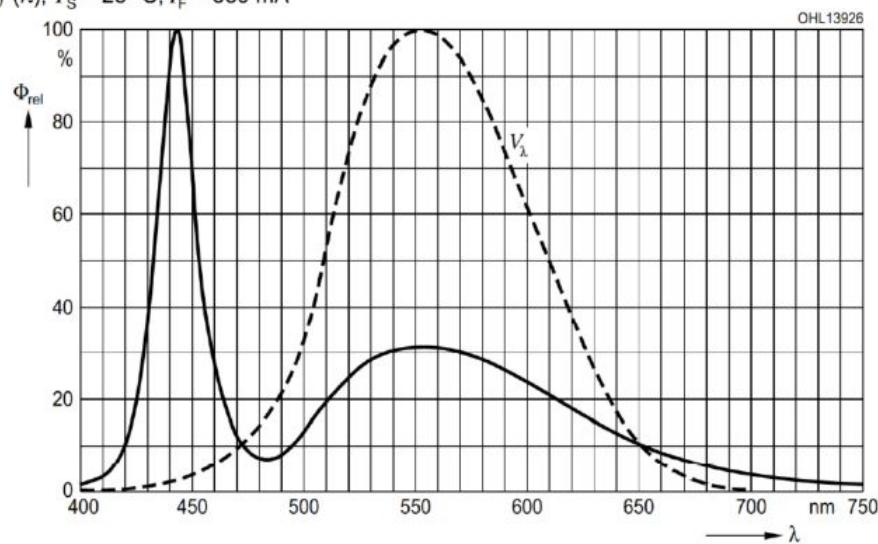


Figura 6.8.: Espectro de emisión de los LEDs utilizados para la toma de medidas.

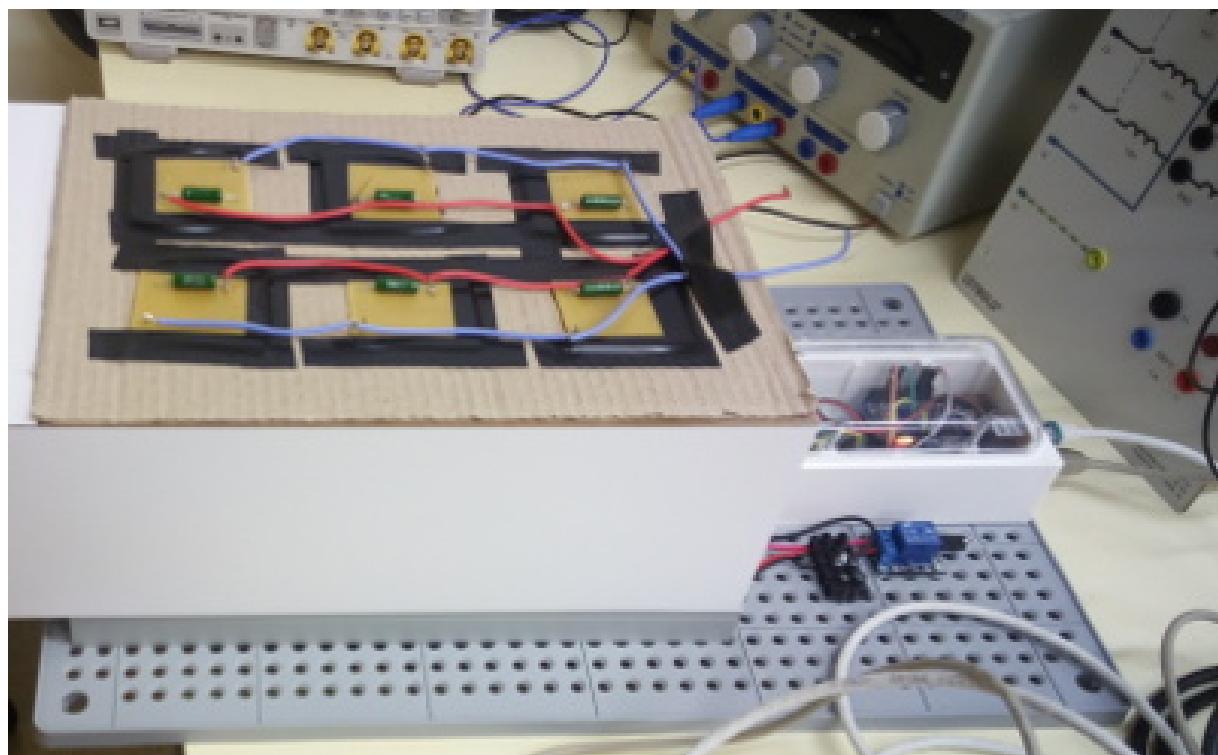
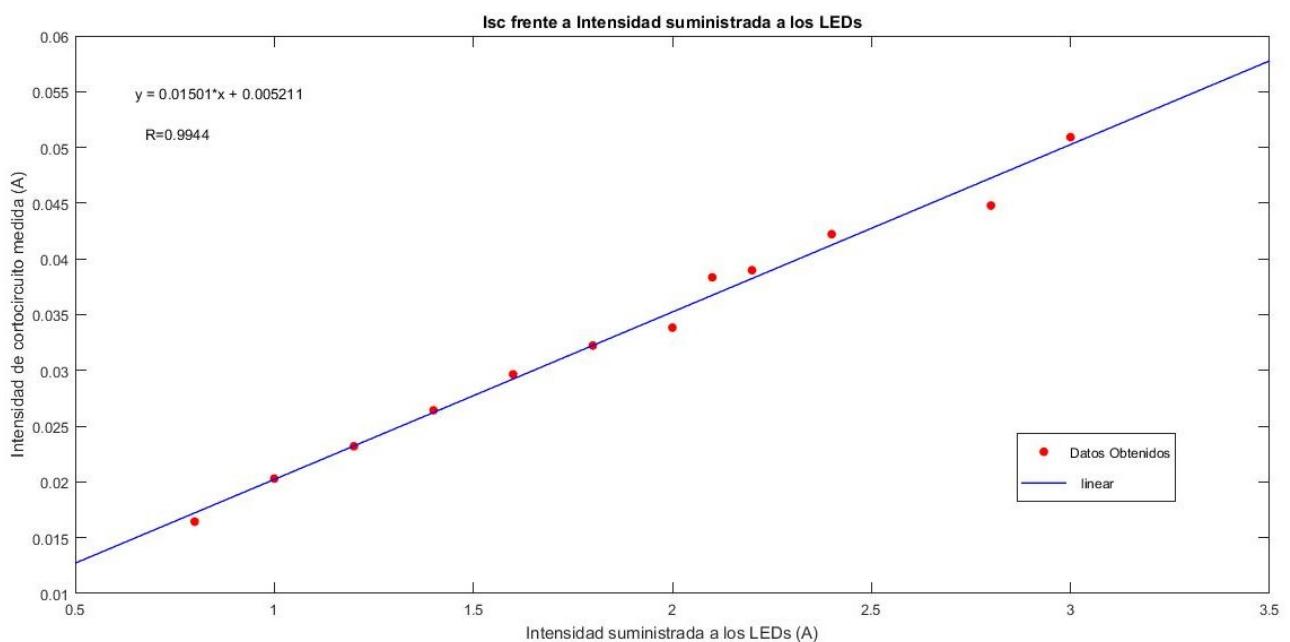


Figura 6.9.: Sistema completo, con fuente de iluminación provisional.

I_L (A)	I_{SC} (mA)	P_{LED} (W)	P_{RAD} (W)	η_{LED} (%)	$P_{Obtenida}$ (W)	η_{Panel} (%)	$\eta_{Sistema}$ (%)
0.8	16.44	9.66	2.869	29.69	0.21	7.31	2.17
1	20.3	12.2	3.542	29.03	0.27	7.62	2.21
1.2	23.2	14.78	4.048	27.38	0.31	7.66	2.09
1.4	26.43	17.42	4.61	26.47	0.37	8.03	2.12
1.6	29.65	20.01	5.17	25.83	0.41	7.93	2.05
1.8	32.23	22.82	5.62	24.63	0.46	8.18	2.02
2	33.84	25.68	5.91	23.01	0.48	8.12	1.87
2.1	38.35	27.05	6.69	24.73	0.55	8.22	2.03
2.2	38.99	28.42	6.80	23.92	0.56	8.23	1.97
2.4	42.22	31.2	7.37	23.62	0.61	8.27	1.96
2.8	44.79	36.96	7.82	21.16	0.65	8.31	1.76
3	50.92	39.84	8.89	22.31	0.74	8.34	1.86

Cuadro 6.1.: Tabla de Eficiencias Calculadas.**Figura 6.10.:** Intensidad de cortocircuito Frente a Intensidad suministrada a los LEDs.

6.3 Curvas Obtenidas con Fuente de Iluminación. Eficiencia.

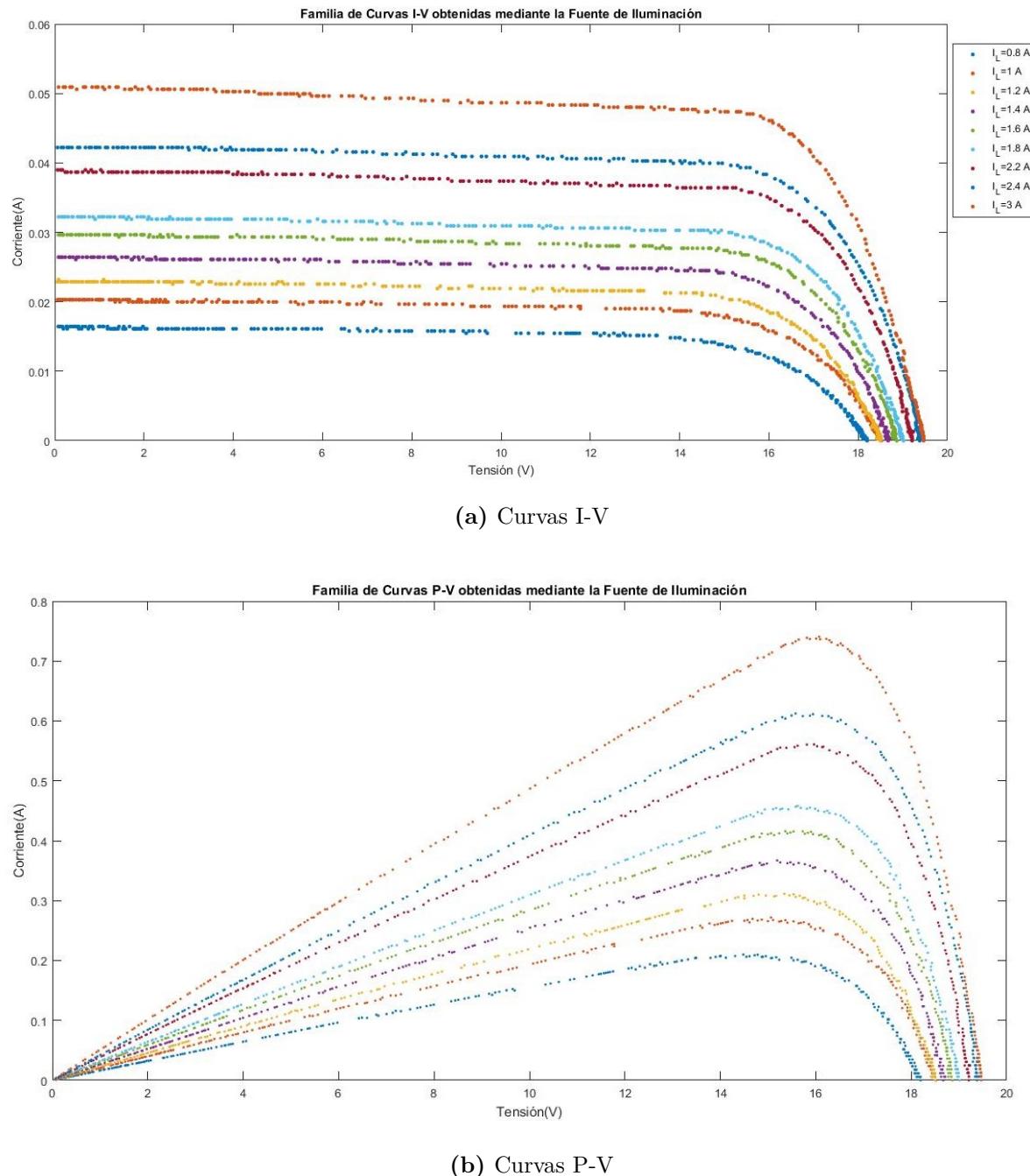


Figura 6.11.: Familia de Curvas obtenida mediante Fuente de Iluminación.

7. Caracterización con diferentes niveles de Iluminación

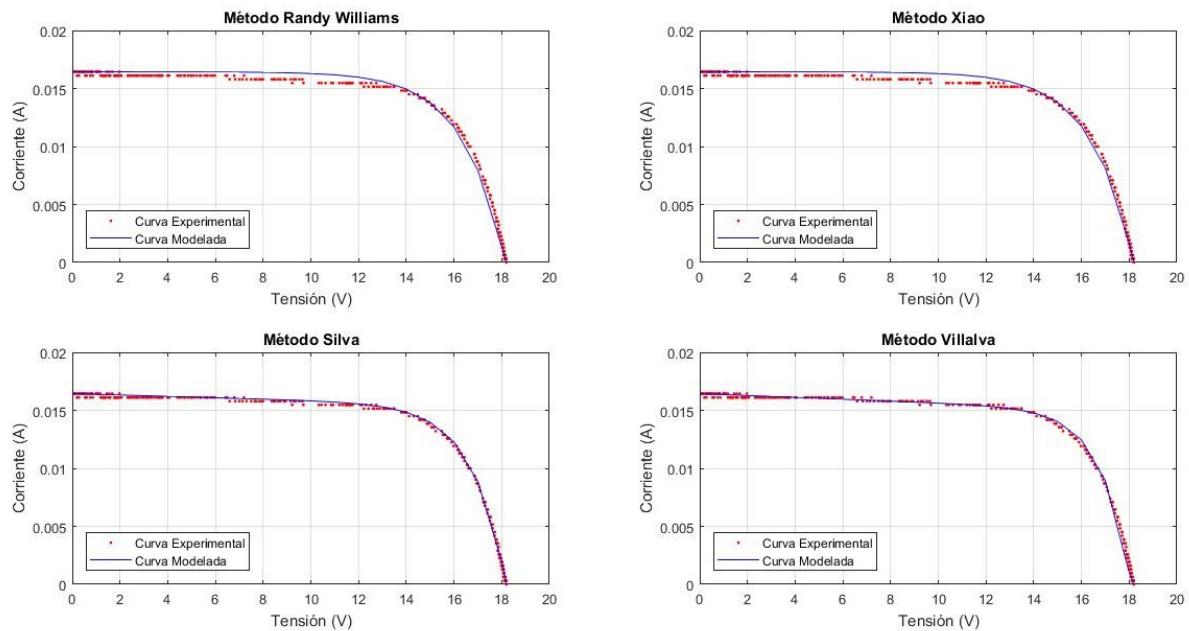
En este capítulo se muestran los parámetros obtenidos (Tabla 7.1), para diferentes condiciones de iluminación, tanto natural como por medio de la placa de LEDs diseñada, usando los mejores métodos en todos los casos. En ésta se observa que el método que más logra ajustarse es el método Silva, seguido del Villalva. La elección de qué método es más adecuado en algunas ocasiones es muy difícil debido al grado de exactitud que alcanzan estos dos. En la Figura 7.14, el método Villalva calcula una resistencia en paralelo negativa, esto puede deberse a que se desborda en el cálculo al no encontrar el ajuste. Sin embargo la representación gráfica resulta bastante exacta. En la Figura 7.13, los cuatro métodos utilizados logran ajustarse e incluso las curvas calculadas con cuatro parámetros se ajustan algo mejor que las otras dos en las zonas de caída exponencial.

Estos improvistos solo ocurren en las curvas tomadas mediante iluminación natural, debido a que a pesar de que la luz incidente se considere prácticamente constante, existen variaciones. Mediante la fuente de iluminación, la luz incidente es totalmente constante, lo que hace que los métodos se ajusten de una forma más clara.

Las curvas obtenidas bajo diferentes condiciones de iluminación, sus parámetros y sus valores característicos correspondientes, aparecen las Figura 7.1, Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6, Figura 7.7, Figura 7.8, Figura 7.9, Figura 7.10, Figura 7.11, Figura 7.12, Figura 7.13, Figura 7.14. En la tabla de los parámetros mostrados para bajas corrientes, son los proporcionadas por los métodos Silva y Villalva, ya que, producen el ajuste más exacto

Iluminación	Método	I_g (A)	A	I_{Sat} (A)	R_S (Ω)	R_P (Ω)
Natural: Totalmente Soleado	Silva	0.32903	1	5.9341e-11	10	8769.5
Natural: Soleado	Silva	0.29874	1	5.1972e-11	11	3488.1
Natural: Parcialmente Nublado	Silva	0.28102	1	4.24e-11	10.5	3025.3
Natural: Sombra	Silva	0.03738	1	1.1645e-10	6	1.1013e+5
Artificial: $I_L = 3$	Silva	0.05092	1	4.5877e-11	15	7846.3
Artificial: $I_L = 2,8$	Villalva	0.04497	1.3	5.128e-09	0.1	10237
Artificial: $I_L = 2,4$	Silva	0.04222	1	3.8952e-11	15	9598.1
Artificial: $I_L = 2,2$	Silva	0.03899	1	4.4849e-11	15	8761.1
Artificial: $I_L = 2,1$	Villalva	0.03835	1.3	4.6294e-09	0.1	10885
Artificial: $I_L = 2,0$	Villalva	0.03384	1.3	0.048e-09	0.1	13474
Artificial: $I_L = 1,8$	Silva	0.03223	1	4.6496e-11	15	10004
Artificial: $I_L = 1,6$	Silva	0.02965	1	4.9671e-11	10	9178
Artificial: $I_L = 1,4$	Villalva	0.02643	1.3	5.6107e-09	0.1	19090
Artificial: $I_L = 1,2$	Silva	0.0232	1	5.55567e-11	13.5	80571
Artificial: $I_L = 1$	Villalva	0.0203	1.3	5.0509e-09	0.1	14153
Artificial: $I_L = 0,8$	Silva	0.01644	1.5	3.6563e-08	0.5	17204

Cuadro 7.1.: Comparación Parámetros Obtenidos.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos.

ParametrosSilva **ParametrosVillalva**

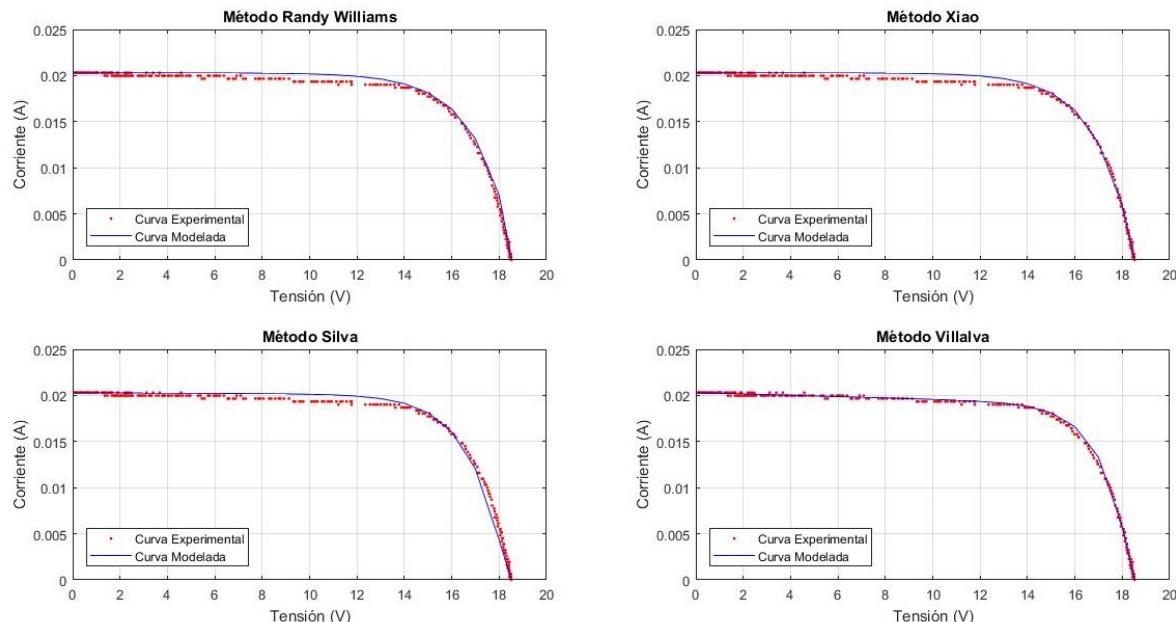
	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.01644	0.01644
A	1.5	1.3
I_{sat}	$3.6563e-08$	$5.3296e-09$
R_s	0.5	0.1
R_p	17204	12453

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.01644	0.01644	0.01644
V_{oc}	18.198	18	18
P_m	0.20998	0.20969	0.21068
I_{mpp}	0.0145	0.013979	0.014046
V_{mpp}	14.481	15	15

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.1.: Intensidad suministrada a los LEDs de 0.8 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

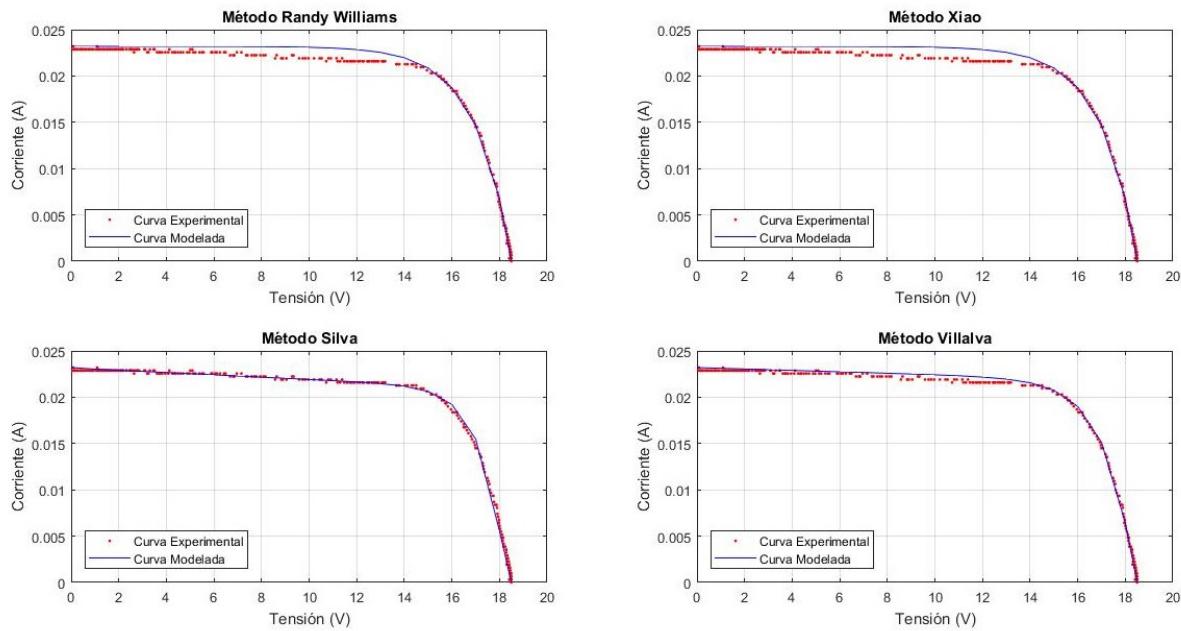
ParametrosSilva **ParametrosVillalva**

Ig	0.0203	0.0203
A	1.5	1.3
Isat	3.7971e-08	5.0509e-09
Rs	15	0.1
Rp	89218	14153

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_s y R_p en Ω .**Experimentales** **MetodoSilva** **MetodoVillalva**

Isc	0.0203	0.0203	0.0203
Voc	18.52	18	18
Pm	0.27186	0.27174	0.27169
Imp	0.01805	0.018116	0.018113
Vmpp	15.061	15	15

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mp} en A. V_{OC} y V_{mp} en V y P_m en W.**Figura 7.2.:** Intensidad suministrada a los LEDs de 1.0 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva ParametrosVillalva

	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.0232	0.0232
A	1	1.3
Isat	5.5567e-11	5.8752e-09
Rs	13.5	0.1
Rp	8057.1	13166

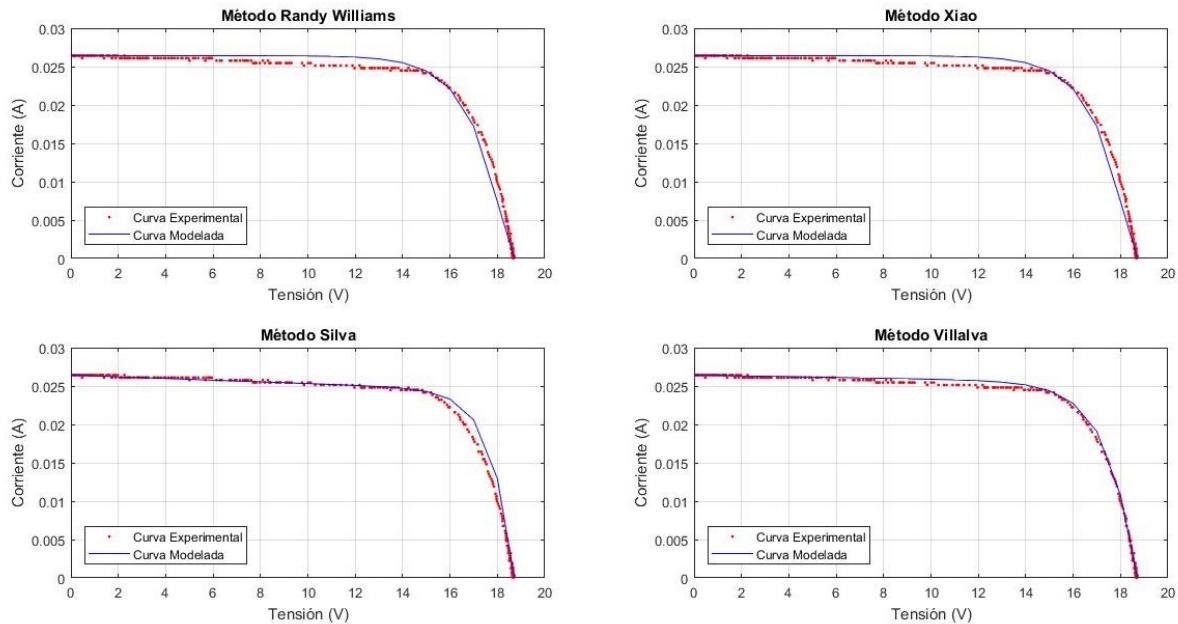
(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_{Pen} Ω .

Experimentales MetodoSilva MetodoVillalva

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.0232	0.0232	0.0232
Voc	18.499	18	18
Pm	0.31141	0.30938	0.31124
Imp	0.0203	0.020625	0.020749
Vmpp	15.341	15	15

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mp} en A. V_{OC} y V_{mp} en V y P_m en W.

Figura 7.3.: Intensidad suministrada a los LEDs de 1.2 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

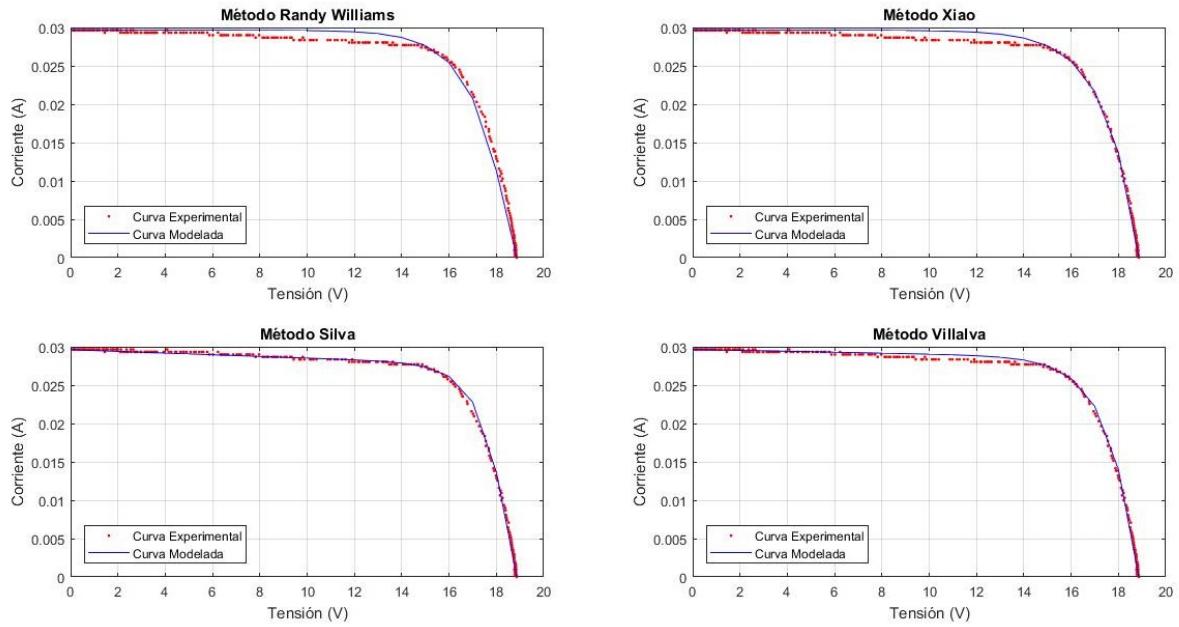
ParametrosSilva ParametrosVillalva

	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.02643	0.02643
A	1	1.3
I_{sat}	5.1472e-11	5.6107e-09
R_s	0.5	0.1
R_p	9015.7	19090

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.02643	0.02643	0.02643
V_{oc}	18.714	18	18
P_m	0.36715	0.37267	0.36587
I_{mpp}	0.02417	0.023292	0.024392
V_{mpp}	15.19	16	15

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.**Figura 7.4.:** Intensidad suministrada a los LEDs de 1.4 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParámetrosSilva ParámetrosVillalva

Ig	0.02965	0.02965
A	1	1.3
Isat	4.9671e-11	5.5631e-09
Rs	10	0.1
Rp	9178	16917

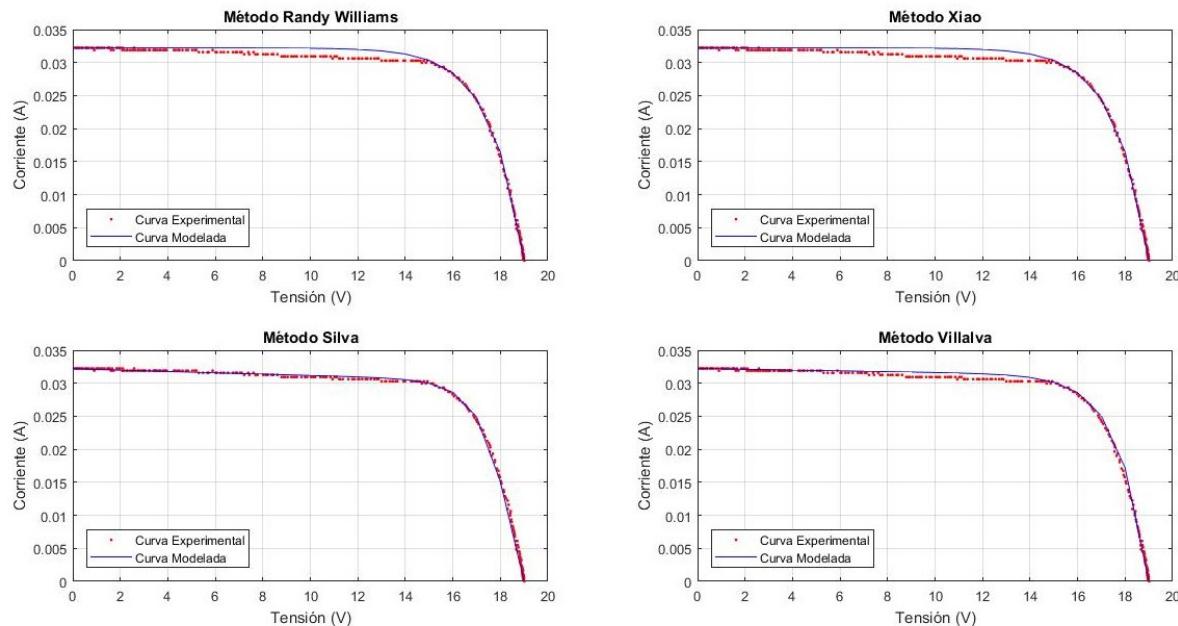
 (b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_{Pen} Ω .

Experimentales MetodoSilva MetodoVillalva

Isc	0.02965	0.02965	0.02965
Voc	18.864	18	18
Pm	0.41585	0.41822	0.4141
Imp	0.02707	0.026139	0.025881
Vmpp	15.362	16	16

 (c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.5.: Intensidad suministrada a los LEDs de 1.6 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

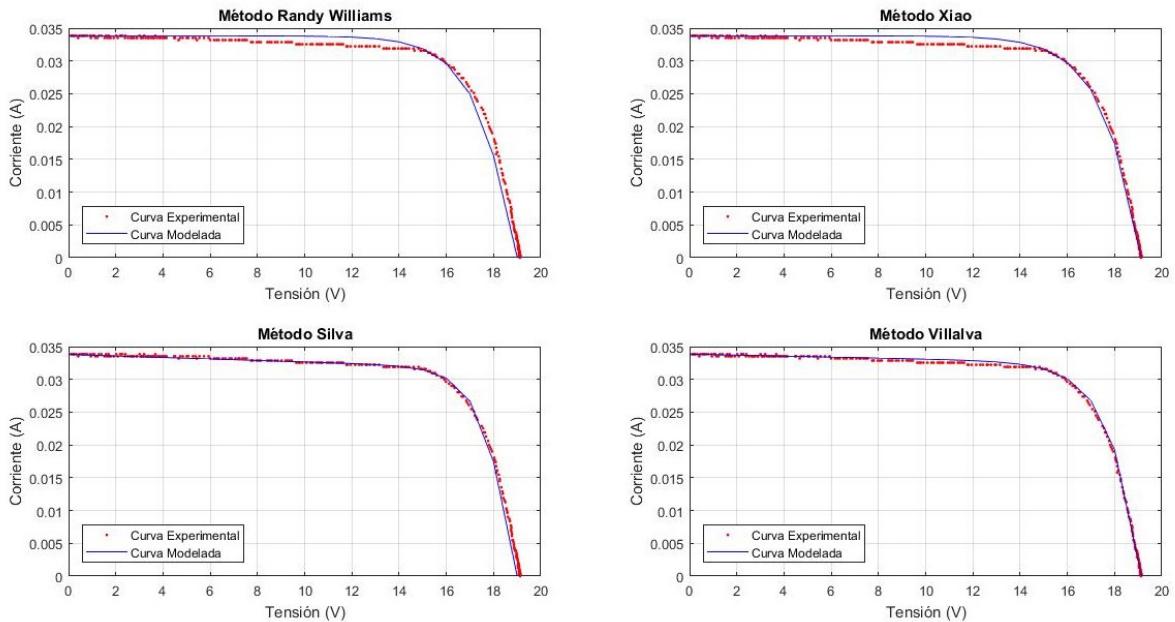
ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.03223
A	1
I_{sat}	4.6496e-11
R_s	15
R_p	10004

ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.03223
A	1
I_{sat}	4.6496e-11
R_s	15
R_p	10004

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.03223	0.03223	0.03223
V_{oc}	19.015	19	19
P_m	0.45813	0.45795	0.45729
I_{mpp}	0.02933	0.028622	0.028581
V_{mpp}	15.62	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.**Figura 7.6.:** Intensidad suministrada a los LEDs de 1.8 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva ParametrosVillalva

	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.03384	0.03384
A	1	1.3
Isat	4.2338e-11	5.048e-09
Rs	15	0.1
Rp	8905.7	13474

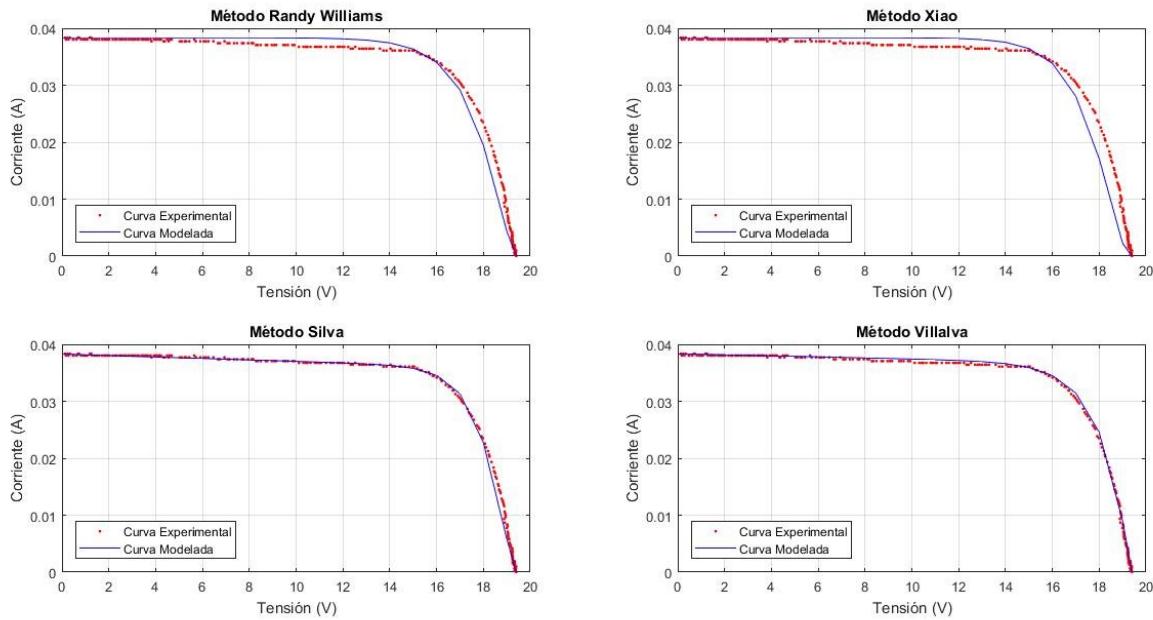
(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_P en Ω .

Experimentales MetodoSilva MetodoVillalva

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.03384	0.03384	0.03384
Voc	19.144	19	19
Pm	0.48062	0.48256	0.48146
Impp	0.03094	0.03016	0.030091
Vmpp	15.534	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.7.: Intensidad suministrada a los LEDs de 2.0 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva ParametrosVillalva

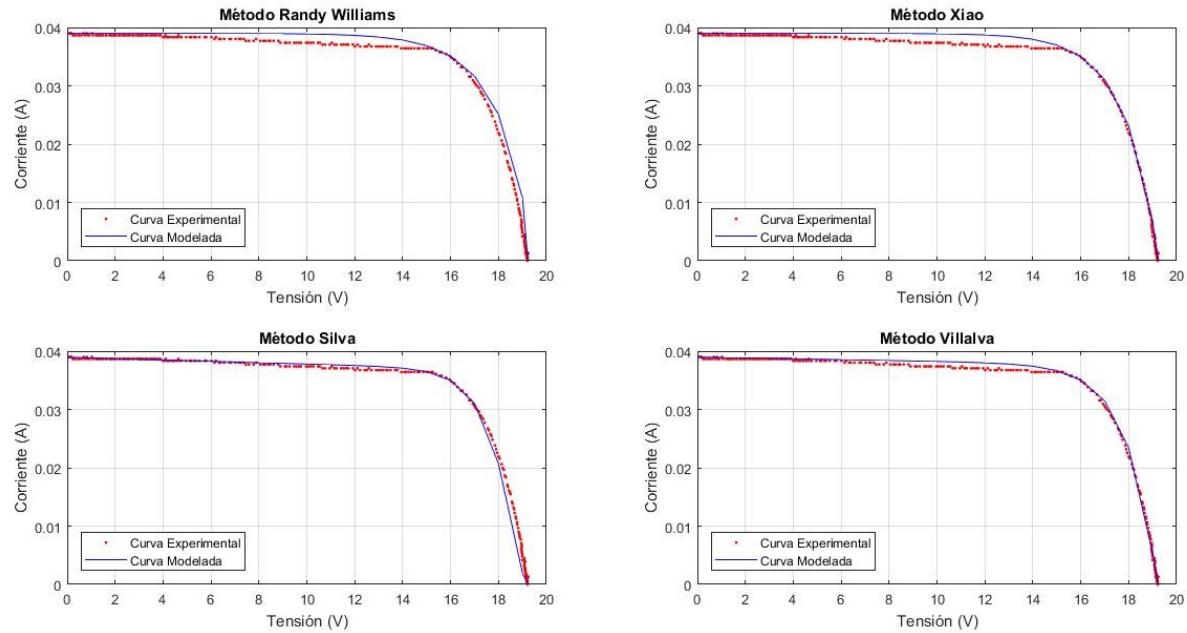
Ig	0.03835	0.03835
A	1	1.3
Isat	3.641e-11	4.6294e-09
Rs	15	0.1
Rp	7877	10885

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_s y R_p en Ω .

Experimentales MetodoSilva MetodoVillalva

Isc	0.03835	0.03835	0.03835
Voc	19.401	19	19
Pm	0.55024	0.55302	0.5525
Imp	0.03513	0.034564	0.034531
Vmpp	15.663	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mp} en A. V_{OC} y V_{mp} en V y P_m en W.**Figura 7.8.:** Intensidad suministrada a los LEDs de 2.1 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva **ParametrosVillalva**

	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.03899	0.03899
A	1	1.3
Isat	4.4849e-11	5.42e-09
Rs	15	0.1
Rp	8761.1	13409

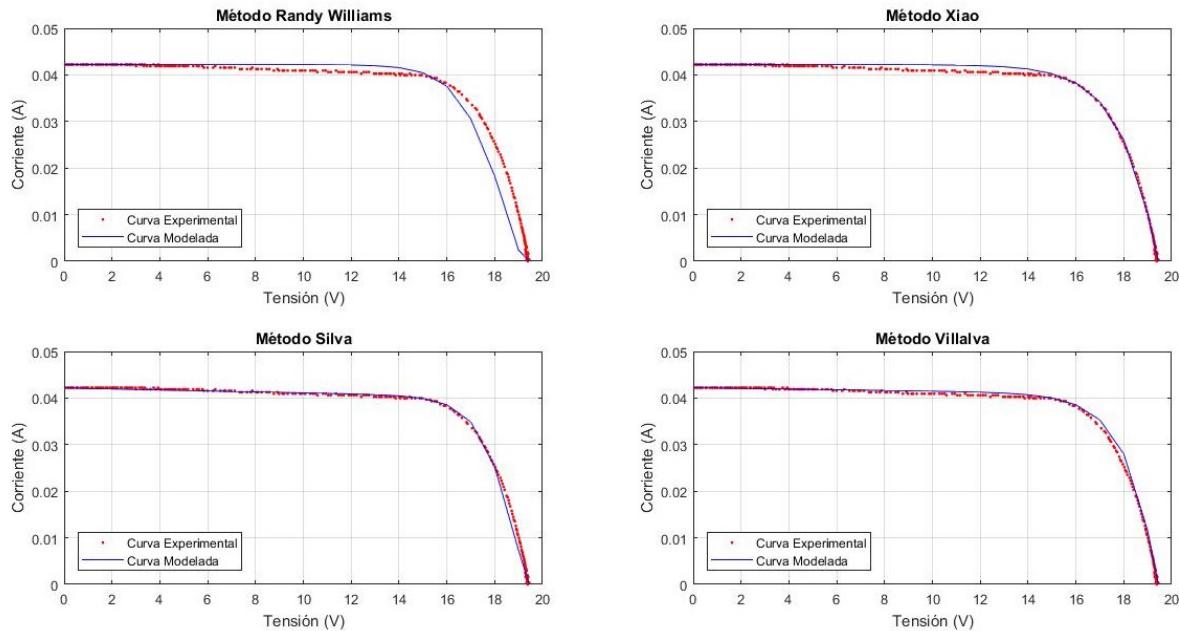
(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_S y R_P en Ω .

Experimentales **MetodoSilva** **MetodoVillalva**

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.03899	0.03899	0.03899
Voc	19.229	19	19
Pm	0.5608	0.56	0.56074
Imp	0.03513	0.035	0.035046
Vmpp	15.964	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.9.: Intensidad suministrada a los LEDs de 2.2 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva		ParametrosVillalva	
I_g	0.04222	I_g	0.04222
A	1	A	1.3
I_{sat}	3.8952e-11	I_{sat}	4.9198e-09
R_s	15	R_s	0.1
R_p	9598.1	R_p	13710

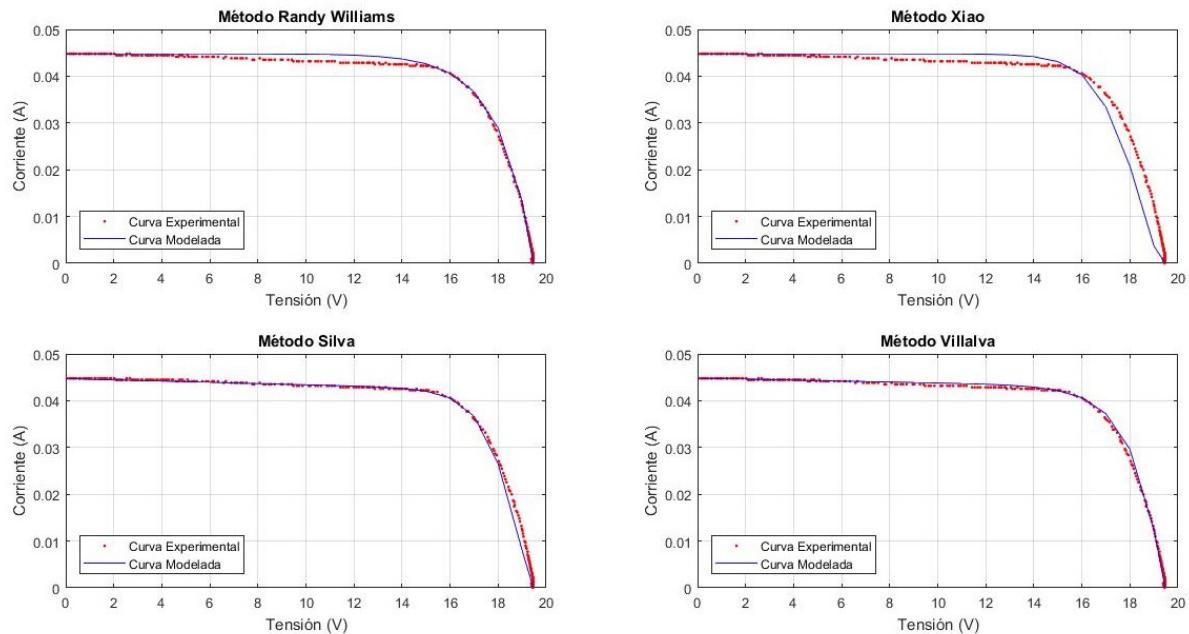
	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.04222	0.04222
A	1	1.3
I_{sat}	3.8952e-11	4.9198e-09
R_s	15	0.1
R_p	9598.1	13710

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.04222	0.04222	0.04222
V_{oc}	19.444	19	19
P_m	0.61248	0.617	0.6169
I_{mpp}	0.03932	0.038562	0.038557
V_{mpp}	15.577	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.10.: Intensidad suministrada a los LEDs de 2.4 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva ParametrosVillalva

	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
Ig	0.04479	0.04479
A	1	1.3
Isat	4.0021e-11	5.128e-09
Rs	15	0.1
Rp	7682.3	10237

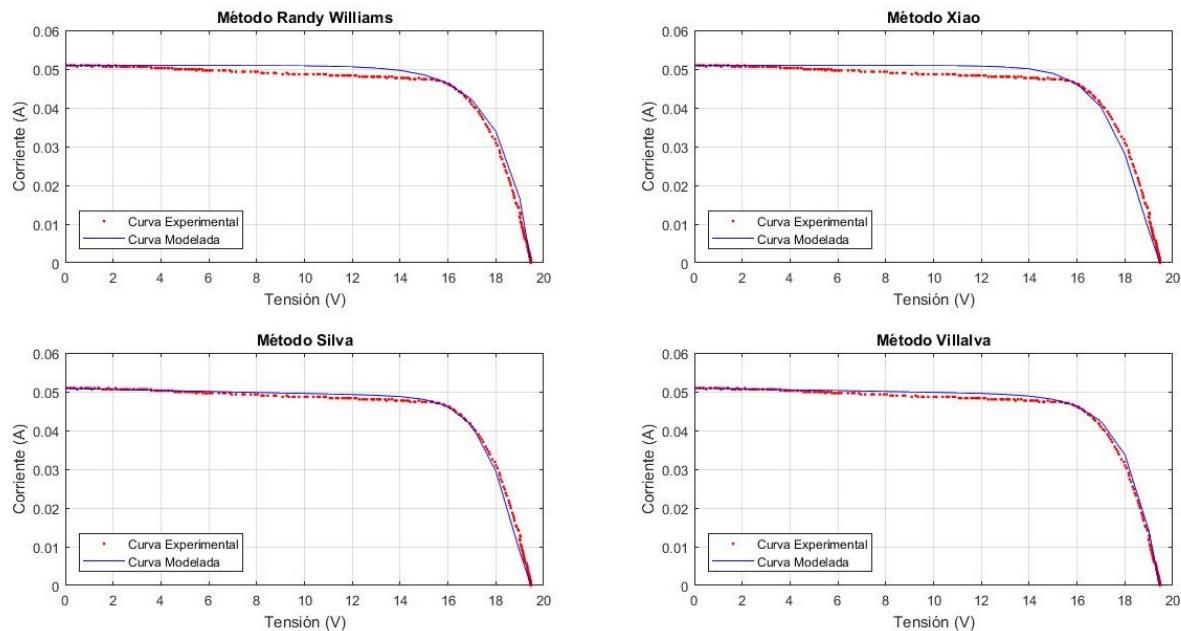
(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_P en Ω .

Experimentales MetodoSilva MetodoVillalva

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
Isc	0.04479	0.04479	0.04479
Voc	19.466	19	19
Pm	0.65003	0.64921	0.65
Imp	0.04061	0.040576	0.040625
Vmpp	16.007	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.11.: Intensidad suministrada a los LEDs de 2.8 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.05092
A	1
I_{sat}	$4.5877e-11$
R_s	15
R_p	7846.3

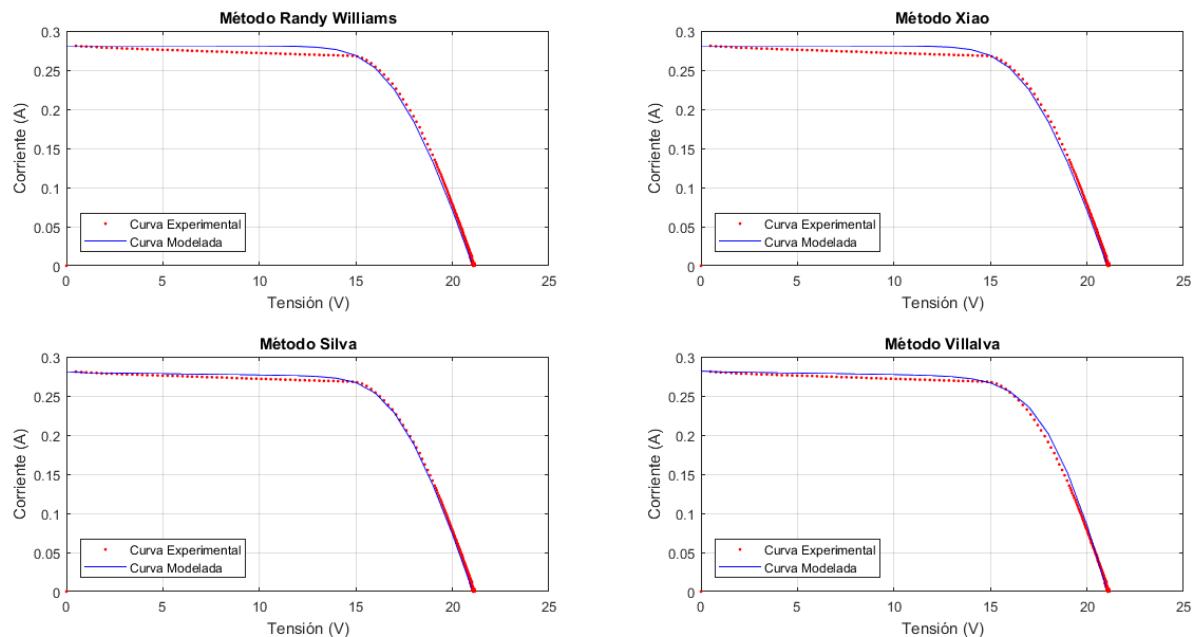
ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.05092
A	1
I_{sat}	$5.8299e-09$
R_s	0.1
R_p	9431.7

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.05092	0.05092	0.05092
V_{oc}	19.466	19	19
P_m	0.74056	0.73926	0.74025
I_{mpp}	0.04608	0.046204	0.046265
V_{mpp}	16.071	16	16

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.12.: Intensidad suministrada a los LEDs de 3.0 A.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

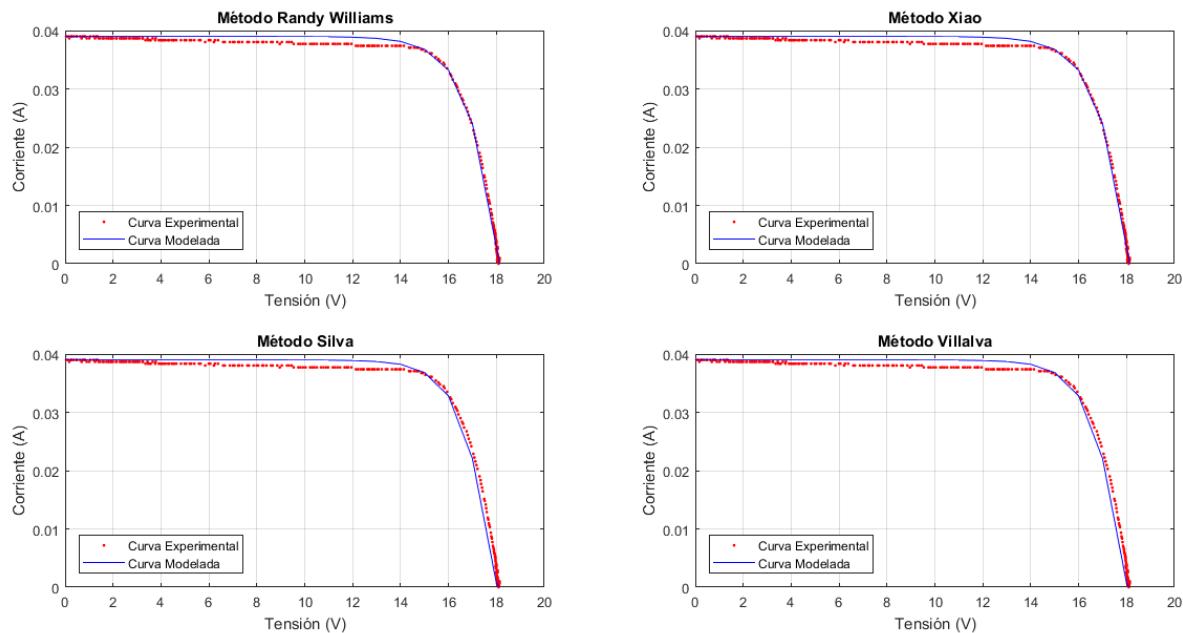
	ParametrosRW	ParametrosXiao	ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.28102	0.28102	0.28102	0.28176
A	1.1013	1.1	1	1.3
I_{sat}	3.4751e-10	3.3897e-10	4.24e-11	7.9846e-09
R_s	10.643	10.655	10.5	7.3
R_p	Inf	Inf	3025.3	2728

 (b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

	Experimentales	MetodoRW	MetodoXiao	MetodoSilva	MetodoVillalva
I_{sc}	0.28102	0.28102	0.28102	0.28102	0.28176
V_{oc}	21.163	21	21	21	21
P_m	4.0866	4.0428	4.0427	4.0572	4.0913
I_{mpp}	0.25878	0.25267	0.25267	0.25357	0.25571
V_{mpp}	15.792	16	16	16	16

 (c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.

Figura 7.13.: Condiciones de Nublado Parcial.



(a) Curva Experimental y Modelos Obtenidos

ParametrosSilva	ParametrosVillalva
I_g	0.03738
A	1
I_{sat}	1.1615e-10
R_s	6
R_p	1.1013e+05

I_g	0.03738	0.03738
A	1	1.3
I_{sat}	1.1615e-10	1.071e-08
R_s	6	50
R_p	1.1013e+05	-1396.3

(b) Tabla de Parámetros. I_g e I_{sat} en A. R_s y R_p en Ω .

Experimentales	MetodoSilva	MetodoVillalva
----------------	-------------	----------------

I_{sc}	0.03738	0.03738
V_{oc}	18.349	18
P_m	0.54269	0.53882
I_{mpp}	0.03513	0.035921
V_{mpp}	15.448	15

(c) Valores Característicos. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.**Figura 7.14.:** Condiciones de Sombra.

8. Conclusión

Trazar la característica I-V de los paneles fotovoltaicos es muy importante para el diagnóstico de degradación, para el diseño de un sistema de búsqueda del punto de máxima potencia y para la evaluación de su comportamiento bajo diferentes condiciones de irradiación, temperatura y e impedancia de la carga conectada.

Los métodos teóricos utilizados, a pesar de que difieren en el número de parámetros, proporcionan una buena estimación teórica para la mayoría de las curvas modeladas. Por lo que para fines prácticos la exactitud proporcionada por un método que calcula cuatro parámetros puede ser suficiente si nos encontramos en condiciones normales de iluminación. Para niveles más bajos, como los adquiridos mediante la fuente provisional de iluminación, es claro que los métodos que calculan cinco parámetros se ajustan notablemente mejor.

En este trabajo se ha diseñado, construido y verificado un sistema automatizado de obtención de curvas I-V de un panel fotovoltaico. El sistema se ha diseñado atendiendo a las características de un módulo de silicio que se utiliza como test, pero con pequeños cambios en los valores de los componentes se podría aplicar a cualquier otro panel. El diseño permite medir una curva I-V completa en un tiempo pequeño, de manera que se pueda caracterizar el panel sin dar tiempo a que cambien las condiciones de iluminación.

El sistema funciona de forma completamente automatizada utilizando los protocolos de Internet (tcp/ip y http). Cuando un sistema informático se conecta a la "página web" del trazador de curvas recibe los datos preparados para ser procesados por MatLab u Octave. Con estos entornos de procesamiento matemático se implementan los algoritmos de estimación de parámetros para contrastar los resultados teóricos con los experimentales.

Las medidas se pueden realizar con cualquier nivel de iluminación. Bajo iluminación natural, se pueden comprobar las especificaciones del fabricante en condiciones estándar de radiación solar y temperatura. En un día totalmente soleado a unos 25°C se obtienen prácticamente los valores proporcionados por el fabricante.

Se ha diseñado una fuente de luz artificial basada en 24 LEDs blancos de potencia, de manera que se puede seleccionar el nivel de irradiancia a través de la selección de la corriente inyectada a los dispositivos. Esto permite, por un lado, crear diferentes escenarios de medida y por otro comprobar la eficiencia energética del sistema.

Para caracterizar las curvas obtenidas se han tomado de la bibliografía diferentes técnicas de ajuste a modelos circuitales equivalentes de diferente complejidad. Éstas se han implementado en Matlab y se han comparado los resultados obtenidos de forma teórica y de forma experimental. Finalmente se han seleccionado los métodos que producen los mejores resultados y se han aplicado de forma sistemática a las curvas obtenidas con los diferentes niveles de iluminación.

Resumiendo, el sistema completo proporciona una visión global y automatizada para la extracción de curvas I-V experimentales a partir de un panel, la extracción de parámetros, y el ensayo de diferentes modelados teóricos que permiten visualizar el comportamiento de las células en un tiempo aceptable y con una exactitud suficiente. Además, consta de un montaje compacto que permite transportarlo y realizar modificaciones, así como añadir

funcionalidades nuevas como la implementación de otros métodos y el acceso a los datos desde Internet de forma inalámbrica.

A. Scripts MatLab

En este Anexo se muestran todos los Scripts y funciones realizados en MatLab para el cálculo de la distribución de iluminación proporcionada por los LEDs y el necesario para mostrar las curvas teóricas calculados por los métodos de estimación de parámetros.

El programa MÉTODOS es el encargado de coordinar a los programas que realizan el cálculo de parámetros para cada uno de los métodos utilizados.

Dentro de cada uno de estos programas, se calculan los parámetros, y se llama al programa Curva Teórica. Éste dibuja la curva teóricamente utilizando los parámetros para resolver la ecuación.

La función Radiación un LED, calcula el porcentaje de iluminación que recibe un punto de la superficie, por un único LED, dada la altura h y las coordenadas x e y del punto de la superficie. El programa Distribución 2x12 LEDs, llama a esta última función para realizar el cálculo completo de la distribución de iluminación en la superficie del panel provocada por 24 LEDs en filas de 12.

```
%%1. Lectura de Datos
%%%%Recogida de datos
%%Leer Datos
%s=urlread('http://192.168.1.177');
%datosIV=str2num(s);
%load("datos28MAyo.mat");
datosIV(1,:)=datosIVTotal(1,:);
datosIV(2,:)=datosIVTotal(2,:);
corriente=datosIV(1,:);
tension=datosIV(2,:);

%%%Obtencion de puntos
ordenadosIV=fOrdenarVI(datosIV);
corriente=ordenadosIV(1,:);
tension=ordenadosIV(2,:);
Isc=max(corriente);
Voc=max(tension);
potencia=tension.*corriente;
pMaxMuestra=max(potencia);
[fila,columna]=find(potencia==pMaxMuestra);
Imp=corriente(columna);
Vmp=tension(columna);
datosIV=ordenadosIV;

metodoRW;
metodoXiao;
metodoSilva;
metodoVillalva;

figure()
subplot(2,2,1)
    plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_1, Imetodo_1, '-b')
    title('Método Randy Williams')
    xlabel('Tensión (V)')
    ylabel('Corriente (A)')
    grid
    legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,2)
    plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_2, Imetodo_2, '-b')
    title('Método Xiao')
    xlabel('Tensión (V)')
    ylabel('Corriente (A)')
    grid
    legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,3)
    plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_3, Imetodo_3, '-b')
    title('Método Silva')
    xlabel('Tensión (V)')
    ylabel('Corriente (A)')
    grid
    legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,4)
    plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_4, Imetodo_4, '-b')
    title('Método Villalva')
    xlabel('Tensión (V)')
```

```

ylabel('Corriente (A)')
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');

%%%Potencia

figure()
subplot(2,2,1)
plot(tension, (corriente.*tension),'.r',Vmetodo_1, (Vmetodo_1.*Imetodo_1),'-b')
title('Método Randy Williams')
xlabel('Tensión (V)')
ylabel('Potencia (W)')
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,2)
plot(tension, (corriente.*tension),'.r',Vmetodo_2, (Vmetodo_2.*Imetodo_2),'-b')
title('Método Xiao')
xlabel('Tensión (V)')
ylabel('Potencia (W)')
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,3)
plot(tension, (corriente.*tension),'.r',Vmetodo_3,(Vmetodo_3.*Imetodo_3),'-b')
title('Método Silva')
xlabel('Tensión (V)')
ylabel('Potencia (W)')
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
subplot(2,2,4)
plot(tension, (corriente.*tension),'.r',Vmetodo_4, (Vmetodo_4.*Imetodo_4),'-b')
title('Método Villalva')
xlabel('Tensión (V)')
ylabel('Potencia (W)')
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');

ParametrosObtenidos=table(ParametrosRW, ParametrosXiao, ParametrosSilva,↖
ParametrosVillalva,'RowNames',{'Ig','A','Isat','Rs','Rp'})
Experimentales=[Isc;Voc;pMaxMuestra;Imp;Vmp];
Parametros_Experimentales_Vs_Modelados=table(Experimentales,MetodoRW,MetodoXiao,↖
MetodoSilva,MetodoVillalva,'RowNames',{'Isc', 'Voc', 'Pm', 'Imp', 'Vmpp'});

figure()
plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_1, Imetodo_1,'sb',Vmetodo_2, Imetodo_2,'<k',↖
Vmetodo_3, Imetodo_3,'-g',Vmetodo_4, Imetodo_4,'xc');
legend('Curva Experimental','Curva Método RW','Curva Método Xiao','Curva Método↖
Silva','Curva Método Villalva','Location','SouthWest');
title('Comparación de Métodos')
xlabel('Tensión (V)')
ylabel('Corriente (A)')
grid

```

```
%Curva teorica
T=302; %Temperatura
K=1.38065*10^(-23); % Constante de Bolzan
Ns=36; %%NUmero de celdas en serie
q=1.6022*10^(-19);

if(~exist("Ig"))
    Ig = 0.32;
end
if(~exist("Isat"))
    Isat = 8.3e-07;
end
if(~exist("Rs"))
    Rs = 15;
end
if(~exist("A"))
    A = 1.5000;
end
if(~exist("Rp"))
    Rp = 1000000;
end
if(~exist("Ns"))
    Ns=36;
end
if(~exist("Voc"))
    Voc=20;
end

Vt=Ns*A*K*T/q;
clear Vmetodo
clear Imetodo

Vmetodo=[0:1:Voc];

index=1;
Imetodo(1)=Ig;
for V=Vmetodo
    if (index==1)
        Ip=Ig;
    else
        Ip=Imetodo(index-1);
    end
    while((length(Imetodo)<index))
        Inew=Ig-Isat*(exp((V+Ip*Rs)/Vt)-1)-(V+Ip*Rs)/Rp;
        if (Inew>Ip)
            Imetodo(index)=0;
        else
            actualError=Ip-Inew;
            if(actualError < 0.01)%0.0001
                if (Inew < 0)
                    Imetodo(index)=0;
                else
                    Imetodo(index)=Inew;
                end
            end
        end
    end
end
```

```
end
Ip=Ip-0.00001;
end
index=index+1;
end
%figure();
%plot(Vmetodo, Imetodo)
```

```
clear Ig
clear Isat
clear A
clear Rs
clear Rp
%%-----
% Articulo Randy Willians Fonseca

Iph = Isc;
numeradorVt = (2*Vmp-Voc)*(Isc-Imp);
denominadorVt=Isc+((Isc-Imp)*log(1-(Imp/Isc)));
Vt=numeradorVt/denominadorVt;
Io=Isc*exp(-Voc/Vt);
Rs=(Vt*log(1-(Imp/Isc)))+Voc-Vmp;
Rs=Rs/Imp;

clear V_metodo1
clear I_metodo1

Ig=Iph;
Isat=Io;
T=302; %Temperatura
K=1.38065*10^(-23); % Constante de Bolzan
Ns=36; %%Numero de celdas en serie
q=1.6022*10^(-19);
A=Vt*q/(Ns*K*T);

curvaTeorica;

Vmetodo_1=Vmetodo;
Imetodo_1=Imetodo;

figure(1);
plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_1, Imetodo_1)

xlabel('Tension(V)');
ylabel('Corriente(A)');
suptitle('Curva I-V MetodoRW Vs Curva I-V Experimental');
title('Modelo de 4 Parametros');
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
Rptbla=inf;
ParametrosRW=[Ig; A; Isat; Rs;Rptbla];

VocMetodo1=max(Vmetodo_1);
IscMetodo1=max(Imetodo_1);
potenciaMetodo1=Vmetodo_1.*Imetodo_1;
PmMetodo1=max(potenciaMetodo1);
[filal,columnal]=find(potenciaMetodo1==PmMetodo1);
ImpMetodo1=Imetodo_1(columnal);
VmpMetodo1=Vmetodo_1(columnal);

MetodoRW=[IscMetodo1;VocMetodo1;PmMetodo1;ImpMetodo1;VmpMetodo1];
```



```
clear Ig
clear Isat
clear A
clear Rs
clear Rp

% Silva method

%%%%%METODO SILVA
metodo="Silva Method";
%%datosIV contiene las muestras de datos reales
clear datosSinCeros
indiceSinCeros=1;
for indice=[1:1:length(datosIV)]
    if (~((datosIV(1,indice) == 0)&(datosIV(2,indice) == 0)))
        datosSinCeros(1,indiceSinCeros)=datosIV(1,indice);
        datosSinCeros(2,indiceSinCeros)=datosIV(2,indice);
        indiceSinCeros=indiceSinCeros+1;
    end
end
clear ordenadosIV
ordenadosIV=fOrdenarVI(datosSinCeros);
%% Parametros de la placa
Isc = max(ordenadosIV(1,:));
Voc = max(ordenadosIV(2,:));

potenciaMuestra=ordenadosIV(1,:).*ordenadosIV(2,:);
pMaxMuestra=max(potenciaMuestra);
indiceMaxPotMuestra=find(potenciaMuestra==pMaxMuestra);
Imp = ordenadosIV(1,indiceMaxPotMuestra);
Vmp = ordenadosIV(2,indiceMaxPotMuestra);
%%Recibe los parametros de la placa.
%%Si no estan definidos tomamos valores de prueba
%Este metodo debe recibir la matriz de datos experimentales
if(~exist("Isc"))
    Isc=0.32;
end
if(~exist("Voc"))
    Voc=22.0;
end
if(~exist("Imp"))
    Imp=0.29;
end
if(~exist("Vmp"))
    Vmp=17.5;
end
if(~exist("pMaxMuestra"))
    pMaxMuestra=5;
end

if(~exist("potenciaMuestra"))
    printf("debe existir potenciaMuestra: matriz de potencia de las muestras\n");
end

%%Constantes
```

```

T=302; %Temperatura
K=1.38065*10^(-23); % Constante de Bolzan
Ns=36; %%NUMero de celdas en serie
q=1.6022*10^(-19);

clear Vgrafica
clear Igrafica
%eq 7
Ig=Isc;
Voc=Voc;

columnaMaep=1;
clear matrizMAEP
for A=[1:0.5:2] %en articulo en pasos de 0.01
    for Rs=[0.5:0.5:15]
        ResistenciaSerie=Rs;
        %Solve eq 2,7,11, and 13
        %eq 2
        Vt=Ns*A*K*T/q; %A sera obtenido de forma numerica

        %eq 29
        RpTerminoExp=(exp( (Vmp+Imp*Rs) /Vt )-1) / (exp(Voc/Vt)-1);
        RpNumerador=Voc*RpTerminoExp-Vmp-Imp*Rs;
        RpDenominador=Imp+Ig*(RpTerminoExp-1);
        Rp=RpNumerador/RpDenominador;
        if (Rp<0)
            %printf("Error, Rp menor que cero \n");
            Rp=Rp;
            continue;
        end

        %eq 9
        Isat=Ig-(Voc/Rp);
        Isat=Isat/(exp(Voc/Vt)-1);

%%%%%%%
%% Calculo Curva Teorica
Vt=Ns*A*K*T/q;
clear Vmetodo
clear Imetodo

%Vmetodo=[0:1:Voc];
%Como tensiones tomamos las mismas de las experimentales
Vmetodo=ordenadosIV(2,:);
index=1;
Imetodo(1)=Ig;
for V=Vmetodo
    %tension=V;
    index=index;
    if (index==1)
        Ip=Ig;
    else
        Ip=Imetodo(index-1);
    end
    while((length(Imetodo)<index))

```

```

Inew=Ig-Isat*(exp((V+Ip*Rs)/Vt)-1)-(V+Ip*Rs)/Rp;
if (Inew>Ip)
    %printf("Inew mayor que Ip\n");
    Ip=Ip;
    Inew=Inew;
    Imetodo(index)=0;
else
    actualError=Ip-Inew;
    if (actualError < 0.0001)
        if (Inew < 0)
            Imetodo(index)=0;
        else
            Imetodo(index)=Inew;
        end
    end
end
Ip=Ip-0.0001;
end
index=index+1;
end

%% Fin calculo curva Teorica
%%%%%%%%%%%%%
%comparacion entre curva teorica y experimental
% the best set of parameters is chosen based on the lowest value of MAEP
% calculated between the curve generated by the electrical model and the
% curve extracted from the datasheet (or from the experimental curve)
% potenciaMuestra Ya esta calculado
clear Vgrafica;
clear Igrafica;

Vgrafica = Vmetodo;
Igrafica = Imetodo;

potenciaMetodo=Vgrafica.*Igrafica;
miError=potenciaMuestra-potenciaMetodo;
miError=abs(miError);
MAEP=sum(miError)/length(miError);

%grabamos en la matrizMAEP los valores de A,Rs y MAEP obtenidos
%para esta curva.
matrizMAEP(1,columnaMaep)=MAEP;
matrizMAEP(2,columnaMaep)=A;
matrizMAEP(3,columnaMaep)=Rs;
matrizMAEP(4,columnaMaep)=Rp;
matrizMAEP(5,columnaMaep)=Ig;
matrizMAEP(6,columnaMaep)=Isat;
columnaMaep=columnaMaep+1;

end %Valores de Rs
%Vgrafica;
%Igrafica;
%figure();
%plot(Vgrafica,Igrafica,"*");

```

```

end %A

%Consideramos como optimos los valores de A y Rs que nos proporcionan
%el menor indicee de error MAEP
minimoMAEP=min(matrizMAEP(1,:));
indiceMinimoMAEP=find(matrizMAEP(1,:)==minimoMAEP);
AOptimo = matrizMAEP(2,indiceMinimoMAEP);
RsOptimo = matrizMAEP(3,indiceMinimoMAEP);
RpOptimo = matrizMAEP(4,indiceMinimoMAEP);
IgOptimo = matrizMAEP(5,indiceMinimoMAEP);
IsatOptimo=matrizMAEP(6,indiceMinimoMAEP);

A=AOptimo;
Rs=RsOptimo;
Rp=RpOptimo;
Ig=IgOptimo;
Isat=IsatOptimo;

curvaTeorica;
Vmetodo_3=Vmetodo;
Imetodo_3=Imetodo;
figure(3);
plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_3, Imetodo_3)

xlabel('Tension(V)');
ylabel('Corriente(A)');
suptitle('Curva I-V MetodoSilva Vs Curva I-V Experimental');
title('Modelo de 5 Parametros');
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');

ParametrosSilva=[Ig; A; Isat; Rs; Rp];
%ParametrosMetodoSilva=table(ParametrosSilva,'RowNames',{'Ig','A','Isat','Rs','Rp'});
VocMetodo3=max(Vmetodo_3);
IscMetodo3=max(Imetodo_3);
potenciaMetodo3=Vmetodo_3.*Imetodo_3;
PmMetodo3=max(potenciaMetodo3);
[fila3,columna3]=find(potenciaMetodo3==PmMetodo3);
ImpMetodo3=Imetodo_3(columna3);
VmpMetodo3=Vmetodo_3(columna3);

MetodoSilva=[IscMetodo3;VocMetodo3;PmMetodo3;ImpMetodo3;VmpMetodo3];

```

```
clear Ig
clear Isat
clear A
clear Rs
clear Rp
% Villalva Method
metodo="Villalva Method";
%%Recibe los parametros de la placa.
%%Si no estan definidos tomamos valores de prueba
if(~exist("Isc"))
    Isc=0.32;
end
if(~exist("Voc"))
    Voc=22.0;
end
if(~exist("Imp"))
    Imp=0.29;
end
if(~exist("Vmp"))
    Vmp=17.5;
end
if(~exist("pMaxMuestra"))
    pMaxMuestra=5;
end
%%Constantes
T=302; %Temperatura
K=1.38065*10^(-23); % Constante de Bolzan
Ns=36; %%Número de celdas en serie
q=1.6022*10^(-19); %Carga del electron

clear Vgrafica
clear Igrafica

%vease diagrama de fuljo pag 281
A=1.3;
%eq 11
Ig=Isc;
Vt=(Ns*A*K*T) / q ;
Isat=Ig/ (exp (Voc/Vt)-1);
%proponemos
Rs=0;
Rpmin=(Vmp/ (Isc-Imp)) - ((Voc-Vmp)/ Imp);
Rp=Rpmin;

%Para eq 15
PmpCurve=pMaxMuestra;

%Inicio del bucle
errorPmax=100;
while ((errorPmax > 0.005) && (Rs<50))
    %solve eq 7
    Ig=Isc;
    %solve eq 15
    exponenteIsat=(Vmp+ (Rs*Imp)) / Vt;
    RpNumerador =Vmp* (Vmp+Rs*Imp);
```

```

RpDenom=Vmp*(Ig-Isat*(exp(exponenteIsat)-1));
RpDenom=RpDenom-PmpCurve;
Rp=RpNumerador/RpDenom;

if (Rp<0)
    Rs=Rs+0.1;
    continue
end

%solve Eq 16
Ig=(Rp+Rs)*Isc/Rp;

curvaTeorica;

Vgrafica=Vmetodo;
Igrafica=Imetodo;

%% Calculo de potencia del modelo
pGrafica = Vgrafica.*Igrafica;
pGraficaMax = max(pGrafica);

errorPmax=abs(pGraficaMax-pMaxMuestra);

Rs=Rs+0.1;

end %errorPmax
Rs ;
Rp ;
Ig ;
Isat ;
A;
Vmetodo_4=Vmetodo;
Imetodo_4=Imetodo;

figure();
plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_4, Imetodo_4)

xlabel('Tension(V)');
ylabel('Corriente(A)');
suptitle('Curva I-V Modelo Villalva Vs Curva I-V Experimental');
title('Modelo de 5 Parametros');
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');

ParametrosVillalva=[Ig; A; Isat; Rs; Rp];
%ParametrosMetodoVillalva=table(ParametrosVillalva,'RowNames',{'Ig','A','Isat','Rs','Rp'})
VocMetodo4=max(Vmetodo_4);
IscMetodo4=max(Imetodo_4);
potenciaMetodo4=Vmetodo_4.*Imetodo_4;
PmMetodo4=max(potenciaMetodo4);
[fila4,columna4]=find(potenciaMetodo4==PmMetodo4);

```

```
ImpMetodo4=Imetodo_4(columna4);  
VmpMetodo4=Vmetodo_4(columna4);
```

```
MetodoVillalva=[IscMetodo4;VocMetodo4;PmMetodo4;ImpMetodo4;VmpMetodo4];
```

```
% xiao method
clear Ig
clear Isat
clear A
clear Rs
clear Rp
%%datosIV contiene las muestras de datos reales
clear datosSinCeros
indiceSinCeros=1;
for indice=[1:1:length(datosIV)]
    if (~((datosIV(1,indice) == 0)&(datosIV(2,indice) == 0)))
        datosSinCeros(1,indiceSinCeros)=datosIV(1,indice);
        datosSinCeros(2,indiceSinCeros)=datosIV(2,indice);
        indiceSinCeros=indiceSinCeros+1;
    end
end
clear ordenadosIV
ordenadosIV=fOrdenarVI(datosSinCeros);
%% Parametros de la placa
Isc = max(ordenadosIV(1,:));
Voc = max(ordenadosIV(2,:));
potenciaMuestra=ordenadosIV(1,:).*ordenadosIV(2,:);
pMaxMuestra=max(potenciaMuestra);
indiceMaxPotMuestra=find(potenciaMuestra==pMaxMuestra);
Imp = ordenadosIV(1,indiceMaxPotMuestra);
Vmp = ordenadosIV(2,indiceMaxPotMuestra);

%%Constantes
T=302; %Temperatura
K=1.38065*10^(-23); % Constante de Bolzan
Ns=36;%%Número de celdas en serie
q=1.6022*10^(-19);

columnaErrorMatriz=1;
Ig=Isc;

for A=[1:0.05:2]
    Vt=(Ns*A*K*T)/q; %%2
    Isat =Ig/(exp(Voc/Vt)-1); %%11
    %eq 13
    Rs=(Vt*log(((1-Imp/Ig)*exp(Voc/Vt)+Imp/Ig))-Vmp)/Imp;
    clear Vmetodo
    clear Imetodo
    Vmetodo=ordenadosIV(2,:);
    Imetodo(1)=Ig;
    index=1;
    for V=Vmetodo
        %tension=V;
        index=index;
        if (index==1)
            Ip=Ig;
        else
            Ip=Imetodo(index-1);
        end
    end
end
```

```

while((length(Imetodo)<index))
    Inew=Ig-Isat*(exp((V+Ip*Rs)/Vt)-1); %%-(V+Ip*Rs)/Rp;
    if (Inew>Ip)
        %printf("Ines mayor que IP\n");
        Ip=Ip;
        Inew=Inew;
        Imetodo(index)=0;
    else
        actualError=Ip-Inew;
        if(actualError < 0.0001)
            if (Inew < 0)
                Imetodo(index)=0;
            else
                Imetodo(index)=Inew;
            end
        end
    end
    end
    Ip=Ip-0.00001;
end
index=index+1;
end
potenciaModelo=Imetodo.*Vmetodo;
potenciaModeloMax=max(potenciaModelo);

[filaModelo,columnaModelo]=find(potenciaModelo==potenciaModeloMax);
ImpModelo=Imetodo(columnaModelo);
VmpModelo=Vmetodo(columnaModelo);

exponente=(VmpModelo+ImpModelo*Rs)/Vt;
numerador=(Isat/Vt)*exp(exponente);
denominador=1+(Isat*Rs/Vt)*exp(exponente);
t1=numerador/denominador;
t2=ImpModelo/VmpModelo;
errorTotal=t2-t1;

errorMatriz(1,columnaErrorMatriz)=errorTotal;
errorMatriz;
columnaErrorMatriz=columnaErrorMatriz+1;
end

errorMinimo=min(errorMatriz);
[filaError,columnaError]=find(errorMatriz==errorMinimo);
errorMatriz(filaError,columnaError);
matrizA=[1:0.05:2];
Aoptimo=matrizA(filaError,columnaError);

A=Aoptimo;
Vt=(Ns*Aoptimo*K*T)/q;
Isat = Ig/(exp(Voc/Vt)-1);
Rs=(Vt*log(((1-Imp/Ig)*exp(Voc/Vt)+Imp/Ig))-Vmp)/Imp;

curvaTeorica;

Vmetodo_2=Vmetodo;

```

```
Imetodo_2=Imetodo;
figure(2);
plot(tension, corriente,'.r',Vmetodo_2, Imetodo_2)

xlabel('Tension(V)');
ylabel('Corriente(A)');
suptitle('Curva I-V MetodoXiao Vs Curva I-V Experimental');
title('Modelo de 4 Parametros');
grid
legend('Curva Experimental','Curva Modelada','Location','SouthWest');
Rptabla=inf;

ParametrosXiao=[Ig; Aoptimo; Isat; Rs;Rptabla];
%ParametrosMetodoXiao=table(ParametrosXiao,'RowNames',{'Ig','A','Isat','Rs','Rp'})
VocMetodo2=max(Vmetodo_2);
IscMetodo2=max(Imetodo_2);
potenciaMetodo2=Vmetodo_2.*Imetodo_2;
PmMetodo2=max(potenciaMetodo2);
[fila2,columna2]=find(potenciaMetodo2==PmMetodo2);
ImpMetodo2=Imetodo_2(columna2);
VmpMetodo2=Vmetodo_2(columna2);

MetodoXiao=[IscMetodo2;VocMetodo2;PmMetodo2;ImpMetodo2;VmpMetodo2];
```

```
function [R] = FuncionRadiacionUnLed(x,y,altura)
%Característica angular de la radiación de un LED OSRAM Dragon
%%Punto de prueba a distancia x,y,altura respecto al led
indice=1:20;
angulosExtraidosCurva(indice)=(indice-1)*5.0;
%Extraido de la curva característica del led
RadiacionAngulo=[1.0 0.99 0.98 0.95 0.93 0.92 0.88 0.87 ...,
                 0.86 0.85 0.80 0.75 0.73 0.71 0.666 0.60 0.65 0.50 0.1 0.05];

% z=acos(h/d)*180/3.141593;

alfa=atan((sqrt(x^2+y^2))/altura);
alfa=(alfa*180)/pi;
i0=floor(alfa/5)+1;

R=RadiacionAngulo(i0)+(RadiacionAngulo(i0+1)-RadiacionAngulo(i0))/...
    (angulosExtraidosCurva(i0+1)-angulosExtraidosCurva(i0))*...,
    (alfa-angulosExtraidosCurva(i0));
end
```


B. Programa Arduino

En este Anexo, se presenta el programa completo realizado en Arduino en leguaje C, para la captación de datos y su posterior envío a través de Ethernet.

```

*****  

* unoSolar04Ether  

*  

* modifica la toma de muestras para optimizar maximo de puntos a maxima tension  

*/  
  

#include <SPI.h>  

#include <Ethernet.h>  
  

// Enter a MAC address and IP address for your controller below.  

// The IP address will be dependent on your local network:  

byte mac[] = {  

    0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xDF, 0x8E, 0xE06  

};  

//Compatible con las direcciones de red  

IPAddress ip(192, 168, 1, 177);  

EthernetServer server(80);  
  

void CortocircuitaPlacaSolar(boolean);  

void EnviaDatosCliente(EthernetClient);  
  

#define NUMERO_MUESTRAS 256  

int numeroMuestras = NUMERO_MUESTRAS;  

unsigned int arrCorriente[NUMERO_MUESTRAS];  

unsigned int arrTension [NUMERO_MUESTRAS];  

char cadenaF[16] = " ";  

unsigned int numeroSerie=0;  

float corrienteF;  

float tensionF;  
  

void CortocircuitaPlacaSolar (boolean comuta){  

    if (comuta){  

        digitalWrite(3, LOW);  

        delay(5);  

        digitalWrite(13, HIGH);  

        digitalWrite(2, HIGH);  

    }  

    else{  

        digitalWrite(2, LOW);  

        digitalWrite(13, LOW);  

        digitalWrite(3, HIGH);  

    }  

}  
  

void setup()  

{  

    Serial.begin(9600);  

    while (!Serial) {  

        ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only  

    }  
  

    pinMode(2, OUTPUT);  

    pinMode(3, OUTPUT);  

    pinMode(13, OUTPUT);  

    analogReference(EXTERNAL);  

    CortocircuitaPlacaSolar(true);  

    Serial.println("Comienza");  
  

    // start the Ethernet connection and the server:  

    Ethernet.begin(mac, ip);  

    server.begin();  

    Serial.print("Servidor en direccion ");  

    Serial.println(Ethernet.localIP());  

}  
  

void loop()  

{  

    unsigned long microsAntes;

```

```

unsigned long microsDespues;
unsigned long ultimaMuestraCorriente;
unsigned int tEspera = 0;
int nMuestra=0;
int incremento=1;

unsigned int corriente;
unsigned int tension;
unsigned int valorAnteriorCorriente=0;

for (int i = 0; i<NUMERO_MUESTRAS; i++){
    arrTension[i] = 0L;
    arrCorriente[i] = 0L;
}

EthernetClient client = server.available();
*****
* Lectura de datos en crudo
*/
// Solo tomamos muestras si tenemos cliente
if(client){
    numeroSerie++;
    CortocircuitaPlacaSolar(false);
    microsAntes = micros();

    ultimaMuestraCorriente = 1; //Para que entre en el bucle
    nMuestra = 0; //Primera muestra que vamos a tomar
    incremento = 1; //Incremento inicial para llenar el
                    // array de muestras
    /*
     * Tomaremos muestras hasta tener corriente cero.
     * Si antes de tener corriente cero, hemos llenado el array de muestras
     * volveremos a recorrer el array de muestras
     * insertando las nuevas tomas en incrementos de 2,3,4, ... y así
     * sucesivamente hasta llegar a un máximo de 20 pasadas para no provocar
     * un time out en el cliente.
     */
    while (ultimaMuestraCorriente || (nMuestra<5)) {
        arrTension [nMuestra] = analogRead(A1);
        ultimaMuestraCorriente = arrCorriente[nMuestra] = analogRead(A2);
        nMuestra +=incremento;
        if (nMuestra > NUMERO_MUESTRAS-1){
            incremento++;
            nMuestra=incremento-1;
        }
        if (incremento == 15) break;
        delay(incremento*2);
    }

    CortocircuitaPlacaSolar(true);
    microsDespues = micros();
    Serial.print(F("Numero Muestras: "));
    Serial.println(nMuestra);

    Serial.print(F("Incremento: "));
    Serial.println(incremento);

    Serial.print(F("ultimaMuestraCorriente: "));
    Serial.println(ultimaMuestraCorriente);

    Serial.print(F("tiempo de muestreo en microsegundos: "));
    Serial.println(microsDespues-microsAntes);
}
****

** Ajuste de valores en crudo a valores reales

```

```

        * y presentacion de los mismos
        */
int presentaColumnas=0;

if(presentaColumnas){
    Serial.println("Corriente Tension");
    for (int i = 0; i<NUMERO_MUESTRAS; i++){
        //Tension de referencia a 3.2 V
        //
        //3.3/1024 = 3.22265 exp -3 Para Vref = 3.3V

        /***** 
         * Medimos caida de tension en una R de 1 Ohmio
         * a la salida de un amplificador con Av=10
         * Valor Real de la corriente. Av=10, R=1 ohmio
         * Por ello dividimos por 10
        */
        corrienteF = arrCorriente[i]*3.22265*0.0001;
        /***** 
        /* Valor Real de Tension:
         *   Divisor de tension
         *   Vi Tension en la Placa
         *   Vo Tension medida
         *   R1=56.67 Mohm
         *   R2=10 Mohm
         *   Vo=R2/(R1+R2) * Vi
         *   Vi=(R1+R2)/R2 * Vo
         *
         *   Vi=(56.67+10)/10 *Vo
         *   Vi=66.67/10 * Vo
         *   Vi = 6.667*Vo
        */
        tensionF = arrTension[i]*3.22265*0.001*6.667;

        //Presentamos resultados
        dtostrf(corrienteF,-9,5,cadenaF); //dato, anchoTotal, decimales, buffer
        Serial.print(cadenaF);
        Serial.print(" ");
        dtostrf(tensionF,-9,5,cadenaF);
        Serial.println(cadenaF);
    }
}

// listen for incoming clients

if (client) {
    Serial.println("new client");
    // an http request ends with a blank line
    boolean currentLineIsBlank = true;
    while (client.connected()) {
        if (client.available()) {
            char c = client.read();
            Serial.write(c);
            // if you've gotten to the end of the line (received a newline
            // character) and the line is blank, the http request has ended,
            // so you can send a reply
            if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
                // send a standard http response header
                client.println("HTTP/1.1 200 OK");
                client.println("Content-Type: text/html");
                client.println("Connection: close"); // the connection will be closed
                after completion of the response
                //client.println("Refresh: 5"); // refresh the page automatically every
                5 sec
                client.println();
                //client.println("<!DOCTYPE HTML>");

```

```

        //client.println("<html><body>");
        // output the value of each analog input pin
        EnviaDatosCliente(client);
        //client.println("</body></html>");
        break;
    }
    if (c == '\n') {
        // you're starting a new line
        currentLineIsBlank = true;
    } else if (c != '\r') {
        // you've gotten a character on the current line
        currentLineIsBlank = false;
    }
}
// give the web browser time to receive the data
delay(1);
// close the connection:
client.stop();
Serial.println("client disconnected");
}
else {
*****
//Para octave
Serial.print("corriente");
Serial.print(numeroSerie);
Serial.print("[");
for (int i = 0; i<2; i++){
    corrienteF = arrCorriente[i]*3.22265*0.0001;
    dtostrf(corrienteF,-9,5,cadenaF);//dato, anchoTotal, decimales, buffer
    Serial.print(cadenaF);
    Serial.print(" ");
}
Serial.println("];<br>");

Serial.print("tension");
Serial.print(numeroSerie);
Serial.print("[");
for (int i = 0; i<2; i++){
    tensionF = arrTension[i]*3.22265*0.001*6.667;
    dtostrf(tensionF,-9,5,cadenaF);
    Serial.print(cadenaF);
    Serial.print(" ");
}

}
Serial.println("];");
*****
}
}

//delay(10000);

}

void EnviaDatosCliente(EthernetClient cliente){
//cliente.println("Hola");
//Para octave
//cliente.print("corriente");
//cliente.print(numeroSerie);
cliente.print("[");
for (int i = 1; i<NUMERO_MUESTRAS; i++){
    corrienteF = arrCorriente[i]*3.22265*0.0001;
    dtostrf(corrienteF,-9,5,cadenaF);//dato, anchoTotal, decimales, buffer
    cliente.print(cadenaF);
    cliente.print(" ");
}
cliente.println(";");
//cliente.print("tension");
//cliente.print(numeroSerie);
}

```

```
cliente.print(" ");
for (int i = 1; i<NUMERO_MUESTRAS; i++){
    tensionF = arrTension[i]*3.22265*0.001*6.667;
    dtostrf(tensionF,-9,5,cadenaF);
    cliente.print(cadenaF);
    cliente.print(" ");

}
cliente.println("];");
}
```

Índice de figuras

2.1. Diagrama de bloques del sistema.	4
3.1. Curva I-V [5]	6
3.2. Superposición de una Fuente de corriente con un diodo de unión PN [5]	9
3.3. Circuito Modelo Ideal de una célula PV [5]	10
3.4. Modelo de un único diodo con efecto de R_S [5]	10
3.5. Modelo de un único diodo con efecto de R_S y R_P [5]	11
3.6. Circuito del Modelo de dos Diodos [5]	12
4.1. Circuito Trazador de Curvas Completo	14
4.2. PCB Circuito Trazador de Curvas I-V.	16
4.3. Circuito Final.	17
4.4. Panel solar y Circuito trazador.	18
4.5. Diagrama de Flujo funcionamiento del Circuito.	19
4.6. Diagrama de Flujo del Sistema de toma de Muestras.	20
4.7. Esquema de Comunicación del Sistema.	21
4.8. Esquema de Comunicación del sistema si existe posibilidad de Configuración de Router.	22
4.9. Curva Experimental tomada en Condiciones Practicamente Estándar (Totalmente Soleado).	22
4.10. Curva Experimental tomada en condiciones Soleadas.	23
4.11. Curva Experimental tomada en condiciones de Sombra.	23
5.1. Diagrama de Flujo del programa realizado en MatLab para mostrar las gráficas y las tablas de parámetros obtenidos mediante los métodos mencionados en Capítulo 5.	29
5.2. Delimitación de Zonas de una curva I-V.	30
5.3. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Randy Williams.	31
5.4. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Randy Williams. En condiciones no Estándar.	31
5.5. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Xiao.	32
5.6. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Xiao. En condiciones no Estándar.	33
5.7. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Silva	34
5.8. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Silva. Condiciones no Estándar	35
5.9. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Villalva.	36
5.10. Curva Experimental frente a Curva Modelada mediante el método Villalva. Condiciones no estándar.	36
5.11. Comparación Resultados Curvas I-V en condiciones Estándar.	37
5.12. Comparación Resultados Curvas I-V en Condiciones Estándar.	38

5.13. Parámetros obtenidos en Condiciones Estándar. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_{Pen} Ω .	38
5.14. Valores Característicos Curvas Teóricas en Condiciones Estándar. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.	38
5.15. Comparación de Resultados Curvas I-V en Condiciones no Estándar.	39
5.16. Comparación Curvas P-V en Condiciones no Estándar.	39
5.17. Parámetros Obtenidos para Condiciones no Estándar. I_g e I_{Sat} en A. R_S y R_{Pen} Ω .	40
5.18. Valores Característicos de las curvas Teóricas Obtenidas. I_{sc} e I_{mpp} en A. V_{OC} y V_{mpp} en V y P_m en W.	40
 6.1. LED Golden Dragon Plus.	41
6.2. Porcentaje de Iluminación dependiendo del ángulo de incidencia.	42
6.3. Distribución de la iluminación proporcionada por un LED central, a 20 cm de altura de la superficie de la Placa Solar.	43
6.4. Distribución de la iluminación en la superficie del panel para una formación de 2x12 LEDs.	44
6.5. Circuito Correspondiente a media Fuente de Iluminación.	44
6.6. PCB (media) Fuente de Iluminación.	45
6.7. Espectro de emisión LEDs Golden Gragon Plus.	46
6.8. Espectro de emisión de los LEDs utilizados para la toma de medidas.	47
6.9. Sistema completo,con fuente de iluminación provisional.	47
6.10. Intensidad de cortocircuito Frente a Intensidad suministrada a los LEDs.	48
6.11. Familia de Curvas obtenida mediante Fuente de Iluminación.	49
 7.1. Intensidad suministrada a los LEDs de 0.8 A.	53
7.2. Intensidad suministrada a los LEDs de 1.0 A.	54
7.3. Intensidad suministrada a los LEDs de 1.2 A.	55
7.4. Intensidad suministrada a los LEDs de 1.4 A.	56
7.5. Intensidad suministrada a los LEDs de 1.6 A.	57
7.6. Intensidad suministrada a los LEDs de 1.8 A.	58
7.7. Intensidad suministrada a los LEDs de 2.0 A.	59
7.8. Intensidad suministrada a los LEDs de 2.1 A.	60
7.9. Intensidad suministrada a los LEDs de 2.2 A.	61
7.10. Intensidad suministrada a los LEDs de 2.4 A.	62
7.11. Intensidad suministrada a los LEDs de 2.8 A.	63
7.12. Intensidad suministrada a los LEDs de 3.0 A.	64
7.13. Condiciones de Nublado Parcial.	65
7.14. Condiciones de Sombra.	66

Bibliografía

- [1] Saad Mekhilef Hussein M. Hamada, Ali M. Humada, Mojgan Hojabri. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (56):494–509, 2016.
- [2] Arduino. *Arduino Uno Datasheet*.
- [3] Gerard M. Crawley. *Solar Energy*, volume 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2016.
- [4] Marcelo C. Calvalcanti Aguinaldo J. Nascimento Jr. Emmerson A.Silva, Fabricio Bradaschia. Parameter estimation method to improve the accuracy off photovoltaics electrical model. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(1):8, January 2016.
- [5] A. Rezaee Jordehi. Parameter estimation of solar photovoltaic (pv) cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (61):354–371, 2016.
- [6] Bureau Veritas Formacion Mendez J. M., Cuervo R. *EnergIA Solar Fotovoltaica*. 4 edition.
- [7] WIZnetâs online Technical Support. *W5100 Datasheet Version 1.1.6*.
- [8] OSRAM Opto Semiconductor. *Golden DRAGON Plus Datasheet Version 1.0*.
- [9] Samkeliso Shongwe and Moin Hanif. Comparative analysis of different single-diode pv modeling methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(3):938–946, May 2015.
- [10] Randy Williams Faustino Chenlo Joao L. Afonso Vicente Leite, Jose Batista. Determination of models parameters of pv modules using a low cost i-v tracer. *Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão*, pages 53–60, 2012.
- [11] Gazoli J. R. Villalva, M. G. and Filho E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208, May 2009.

