

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR BASADA EN MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**SANTIAGO CUSHICÓNDOR COLLAGUAZO**

**thiagopmscc@hotmail.com**

**DIRECTOR: Dr.-Ing. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ**

**nelson.granda@epn.edu.ec**

**Quito, Abril 2019**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Santiago Cushicóndor Collaguazo, bajo mi supervisión.

---

**Dr.-Ing. Nelson Victoriano Granda Gutiérrez**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Santiago Cushicóndor Collaguazo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Santiago Cushicóndor Collaguazo

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Ana María y José Antonio, gracias por todo su esfuerzo y apoyo para terminar mi carrera universitaria, mis éxitos serán el fruto de todo su apoyo y amor que me brindan.

A mis hermanos y mis hermanas.

A una persona muy especial que he conocido en el transcurso de mi carrera universitaria.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco especialmente a mis amados padres, por todo su apoyo, por sus consejos y valores que al final del día son los más importantes.

A toda mi familia que siempre me han ayudado y apoyado en todo momento para seguir adelante.

Al Ing. Nelson V. Granda Gutiérrez PhD, director de esta tesis, gracias por el apoyo, ayuda, paciencia y guía, para que el presente trabajo de titulación se lleve a cabo de la mejor manera.

A quienes colaboraron en el presente proyecto de titulación: a GRANSOLAR S.A. por el préstamo del panel fotovoltaico, al laboratorio de “Energías Alternativas y Eficiencia Energética” a cargo del Fis. Marco Yáñez MSc, a los ingenieros, amigos y compañeros que me ayudaron de una u otra manera en la realización de la tesis, gracias por su tiempo y ayuda.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT .....	IX
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.2 Alcance.....	2
CAPÍTULO II.....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Energía solar .....	5
2.1.1 Irradiancia solar .....	6
2.1.2 Irradiancia global, normal directa, difusa y reflejada .....	7
2.1.3 Instrumentos de medida de la irradiancia solar .....	8
2.1.4 Importancia de la irradiancia solar en sistemas fotovoltaicos .....	12
2.2. Celdas fotovoltaicas.....	19
2.2.1 Principio de funcionamiento.....	19
2.2.2 Materiales de las celdas fotovoltaicas.....	21
2.2.3 Parámetros básicos de una celda fotovoltaica .....	26
2.2.4 Curvas características de paneles fotovoltaicos bajo condiciones estándar.....	29
2.2.5 De celdas a paneles y a cadenas fotovoltaicas.....	31
2.2.6 Factores que afectan la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos .....	33
2.2.7 Impacto de la temperatura y la irradiancia solar sobre los paneles fotovoltaicos.....	34
2.2.8 Impacto del sombreado en paneles fotovoltaicos .....	35
2.2.9 Degradación de las celdas fotovoltaicas .....	38
2.2.10 Pruebas en paneles fotovoltaicos y garantía de calidad .....	39
2.3. Circuitos equivalentes del panel fotovoltaico.....	40
2.3.1 Circuito equivalente ideal [8].....	40
2.3.2 Circuito equivalente simple [48] .....	43
2.3.3 Circuito equivalente expandido – modelo de un diodo [8] .....	47

2.3.4	Circuito equivalente expandido – modelo de dos diodos [8].....	52
2.4.	Modelos de estimación de irradiancia solar .....	56
2.4.1	Modelo 1.....	56
2.4.2	Modelo 2.....	58
2.4.3	Modelo 3.....	62
CAPÍTULO III.....		65
3.	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR BASADA EN MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS .....	65
3.1.	Introducción .....	65
3.2.	Metodología propuesta – Diagrama de flujo.....	66
3.3.	Descripción de cada etapa de la metodología propuesta.....	67
3.3.1	Determinación del modelo matemático del panel fotovoltaico .....	67
3.3.1.1	Circuito equivalente del panel fotovoltaico .....	67
3.3.1.2	Cálculo de los parámetros desconocidos.....	69
3.3.2	Validación del modelo matemático del panel fotovoltaico .....	72
3.3.3	Desarrollo de los modelos de estimación de irradiancia solar .....	74
3.3.4	Validación del modelo de estimación de irradiancia solar .....	78
3.3.4.1	Metodología propuesta .....	79
3.3.5	Presentación de resultados .....	81
3.4.	Descripción y diseño del circuito electrónico a implementarse.....	82
3.4.1	Descripción del funcionamiento y conexionado del circuito electrónico.....	82
3.4.2	Diseño del circuito electrónico y sus elementos .....	84
3.4.2.1	Descripción de los sensores .....	85
3.4.2.2	Descripción de los interruptores .....	87
3.4.2.3	Diagrama de conexión de los sensores e interruptores .....	88
3.4.1	Construcción y montaje del circuito electrónico .....	89
3.4.2	Programación del circuito electrónico .....	90
3.4.3	Pruebas y validación del circuito diseñado .....	91
CAPÍTULO IV .....		93
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	93
4.1.	Características de los paneles fotovoltaicos .....	93
4.2.	Determinación del modelo matemático del panel fotovoltaico .....	95
4.3.	Validación del modelo matemático del panel fotovoltaico .....	97
4.4.	Cálculo y validación de la irradiancia solar estimada basada en los modelos matemáticos del panel fotovoltaico.....	103
4.4.1	Medición de las variables del panel fotovoltaico .....	104

4.4.2	Validación de los modelos matemáticos de estimación de irradiancia solar .....	106
4.4.3	Estimación de parámetros de los paneles fotovoltaicos mediante la herramienta “Estimador de parámetros” de Matlab-Simulink.....	108
4.4.4	Análisis de degradación de los paneles fotovoltaicos mediante los parámetros estimados .....	111
4.5.	Presentación de resultados de irradiancia solar estimada .....	114
4.5.1	Resultados del panel fotovoltaico de 50W .....	115
4.5.2	Resultados del panel fotovoltaico de 80W (Panel 1).....	119
4.5.3	Resultados del panel fotovoltaico de 80W (Panel 2).....	122
4.5.4	Resultados panel fotovoltaico de 250W .....	125
CAPÍTULO V .....		130
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	130
5.1.	CONCLUSIONES.....	130
5.2.	RECOMENDACIONES.....	131
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
7.	ANEXOS.....	137
ANEXO I. Hoja de datos proporcionado por los fabricantes .....		137
ANEXO II. Código de programación Newton Raphson .....		142
ANEXO III. Simulaciones en Simulink de los modelos matemáticos del panel fotovoltaico en base a los métodos de estimación de irradiancia solar .....		147
ANEXO IV Circuito electrónico simulado en Proteus.....		151
ANEXO V Código de programación del circuito electrónico en Arduino .....		152
ANEXO VI Script realizado en Matlab para estimar la irradiancia solar.....		156
ORDEN DE EMPASTADO.....		159



## RESUMEN

Conocer la irradiancia solar, es de mucha importancia en sistemas fotovoltaicos para el análisis de su eficiencia y rendimiento principalmente. El presente trabajo de titulación consiste en la estimación de la irradiancia solar, basada en modelos matemáticos y mediciones de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos. Se trabajará con paneles fotovoltaicos de diferentes potencias y años de vida útil; en primera instancia, se determinará el modelo matemático que caracterice de mejor manera el comportamiento y funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, posteriormente se obtendrán los parámetros de los modelos matemáticos usando el método iterativo Newton Raphson; una vez obtenidos los parámetros ideales se procederá a simularlos en Matlab Simulink, para validar los parámetros calculados. En una segunda etapa se determinarán las ecuaciones que permitan estimar de la irradiancia solar, dichas ecuaciones están en función de variables eléctricas de los paneles fotovoltaicos como: voltaje, corriente y temperatura; debido a esto, se diseñará e implementará un circuito electrónico, usando el micro controlador Arduino Uno, capaz de medir y almacenar las variables en una base de datos, considerando tres condiciones: i) circuito abierto, ii) bajo carga y iii) corto circuito.

Los paneles fotovoltaicos con varios años de uso no entregan los valores de voltaje y corriente nominales, por lo tanto, se usará el estimador de parámetros de Matlab-Simulink para determinar los parámetros eléctricos de los diferentes modelos matemáticos y de esta manera, simular el funcionamiento real de los paneles fotovoltaicos.

Finalmente, se estimará la irradiancia solar mediante los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos y se comparará con las mediciones de irradiancia solar obtenidas mediante un piranómetro y de esta manera validar los modelos presentados para la estimación de irradiancia solar.

**PALABRAS CLAVE:** Estimación, irradiancia solar, paneles fotovoltaicos, Matlab, Arduino, piranómetro.

## ABSTRACT

Knowing the solar irradiance, is of great importance in photovoltaic systems for the analysis of its efficiency and performance mainly. The present final thesis, consists in the estimation of solar irradiance, based on mathematical models and measurements of electrical variables of photovoltaic panels. We will work with photovoltaic panels of different powers and years of useful life; in the first instance, the mathematical model that best characterizes the behavior and operation of the photovoltaic panels will be determined, later the parameters of the mathematical models will be obtained using the iterative method Newton Raphson; Once the ideal parameters have been obtained, they will be simulated in Matlab Simulink, to validate the calculated parameters. In a second instance be determined equations to estimate the solar irradiance, these equations are functions of electrical variables of photovoltaic panels as voltage, current and temperature; Due to this, an electronic circuit will be designed and implemented, using the Arduino Uno micro controller, capable of measuring and storing the variables in a database, considering three conditions: i) open circuit, ii) under load and iii) short circuit.

The photovoltaic panels with several years of use do not deliver the nominal voltage and current values, therefore, the Matlab-Simulink parameter estimator will be used to determine the electrical parameters of the different mathematical models and in this way, simulate the operation real photovoltaic panels.

Finally, the solar irradiance will be estimated using the mathematical models of the photovoltaic panels and will be compared with the solar irradiance measurements obtained by means of a pyranometer and in this way validate the models presented for the solar irradiance estimation.

**KEYWORDS:** Estimation, solar irradiance, photovoltaic panels, Matlab, Arduino, pyranometer.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

En una central fotovoltaica, el monitoreo de la irradiancia solar es de mucha importancia, para el análisis de la eficiencia y cálculo del índice de rendimiento de la central; dicho monitoreo se realiza mediante diferentes dispositivos de medición como: pirheliómetro, piranómetros, celdas de referencias entre otros [1], [2], [3]. Sin embargo, los piranómetros son los más usados en las estaciones meteorológicas de las centrales fotovoltaicas ya que permiten la medición directa de la irradiancia global y la configuración de este dispositivo es relativamente simple [4]; a pesar de esto, su costo de adquisición es relativamente alto. Debe considerarse que para un estudio completo en una central fotovoltaica es necesario medir la irradiancia solar en varios puntos geográficos de la central.

En una central fotovoltaica donde la irradiancia solar no es uniforme, principalmente por sombras y/o nubosidad, es necesario tener piranómetros en diversos lugares, idealmente en cada cadena de paneles fotovoltaicos, de forma que pueda monitorearse la irradiancia solar. El conocer este parámetro permite también determinar una cadena con paneles defectuosos, mejorando aspectos relacionados con la operación y mantenimiento de la central. Esta información puede ser usada para definir la arquitectura de sistemas de conversión. Cuando la exposición solar de los módulos es uniformes, se puede usar un inversor único (centralizado) en la central fotovoltaica de tamaño pequeño o mediano. Caso contrario, cuando las condiciones de trabajo no son uniformes suele ser útil el uso de inversores de cadena o micro inversores [4].

Con el objetivo de monitorear la irradiancia solar en toda el área donde se colocan los paneles fotovoltaicos, minimizando los costos de equipos de medición (varios piranómetros), una solución, es estimar la irradiancia solar a partir de modelos matemáticos del panel fotovoltaico y mediciones de voltaje, corriente y temperatura usualmente disponibles en la central fotovoltaica.

Una metodología que permita estimar la irradiancia solar usando equipos y mediciones disponibles en la central, permitirá ahorros en equipos para el dueño de la central y además proveerá de información importante que puede ser usada para mejorar el mantenimiento de la central y aumentar su índice de rendimiento. Para este fin, es necesario una investigación profunda acerca del modelado matemático de paneles fotovoltaicos y la obtención de los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico.

## 1.1 Objetivos

El objetivo general de este Estudio Técnico es:

- Realizar la estimación de irradiancia solar mediante paneles fotovoltaicos, para lo cual se emplean modelos matemáticos que representan al panel fotovoltaico y mediciones de voltaje, corriente y temperatura del panel.

Los objetivos específicos de este Estudio Técnico son:

- Estudiar los modelos matemáticos propuestos para la estimación de la irradiancia solar mediante paneles fotovoltaicos.
- Determinar los parámetros de los diferentes circuitos equivalentes propuestos para representar un panel fotovoltaico mediante pruebas de campo y algoritmo de estimación de parámetros empleando el software MATLAB.
- Obtener las curvas características de los diferentes modelos matemáticos del panel solar en Simulink, usando los parámetros obtenidos mediante pruebas y comparar las curvas características provistas por el fabricante.
- Determinar el modelo matemático de estimador de irradiancia solar que más se aproxime a los valores de irradiancia reales medidos mediante un piranómetro.

## 1.2 Alcance

Se realizará un estudio de los diferentes modelos matemáticos propuestos para estimar la irradiancia solar mediante paneles fotovoltaicos (se pretende utilizar los paneles fotovoltaicos como medidores de irradiancia solar); se determinarán aquellos que presentan la mejor aproximación a valores medidos de irradiancia. Las variables de entrada al proceso serán: parámetros eléctricos del panel fotovoltaico, obtenidos del fabricante o mediante pruebas y mediciones de voltaje, corriente y temperatura del panel [4]–[6].

En una primera instancia, se determinarán los modelos matemáticos propuestos para representar un panel fotovoltaico. Luego, a través de pruebas e información entregada por los fabricantes de paneles, se determinan los parámetros eléctricos de los paneles fotovoltaicos de diferentes potencias y años de uso. Se trabajará con paneles fotovoltaicos de 250W y 50W prácticamente nuevos, y dos paneles de 80W c/u de aproximadamente 8 años de vida útil.

Para obtener los parámetros del modelo matemático del panel solar se usarán métodos iterativos (Newton Raphson) para la solución del conjunto de ecuaciones que surgen del problema de estimación de parámetros. Una vez obtenido todos los parámetros del modelo equivalente del panel fotovoltaico, se usará el software de programación MATLAB y su herramienta Simulink para validar los modelos obtenidos mediante la comparación de resultado de simulaciones con mediciones reales.

Los paneles fotovoltaicos con varios años de uso, no entregan los mismos valores de voltaje y corriente que los paneles nuevos, y sería un error considerar los parámetros eléctricos en condiciones estándar. Por esta razón, se usará el estimador de parámetros de MATLAB-SIMULINK, para determinar los parámetros eléctricos de los paneles en las condiciones actuales en las que se encuentran. Posteriormente, se corregirán los modelos obtenidos en condiciones estándar.

Para realizar la estimación de parámetros, son necesarias mediciones de temperatura, voltaje y corriente de los paneles fotovoltaicos. Se construirá un circuito electrónico para la adquisición de dichas variables en plataforma Arduino. El circuito contará con un sensor de temperatura clase A, un sensor de corriente, un divisor de voltaje y relés que servirán como interruptores durante las pruebas a realizar. Adicionalmente, se usará una librería que proporciona Arduino para almacenar las mediciones obtenidas en una base de datos en Excel.

Se realizará pruebas en campo bajo distintas condiciones climatológicas para tener una diversidad de medidas de irradiancia solar que permitan validar el uso de los estimadores implementados. Los resultados obtenidos de los estimadores serán comparados con mediciones obtenidas de un piranómetro para determinar el mejor modelo de estimación de irradiancia solar.

## CAPÍTULO II

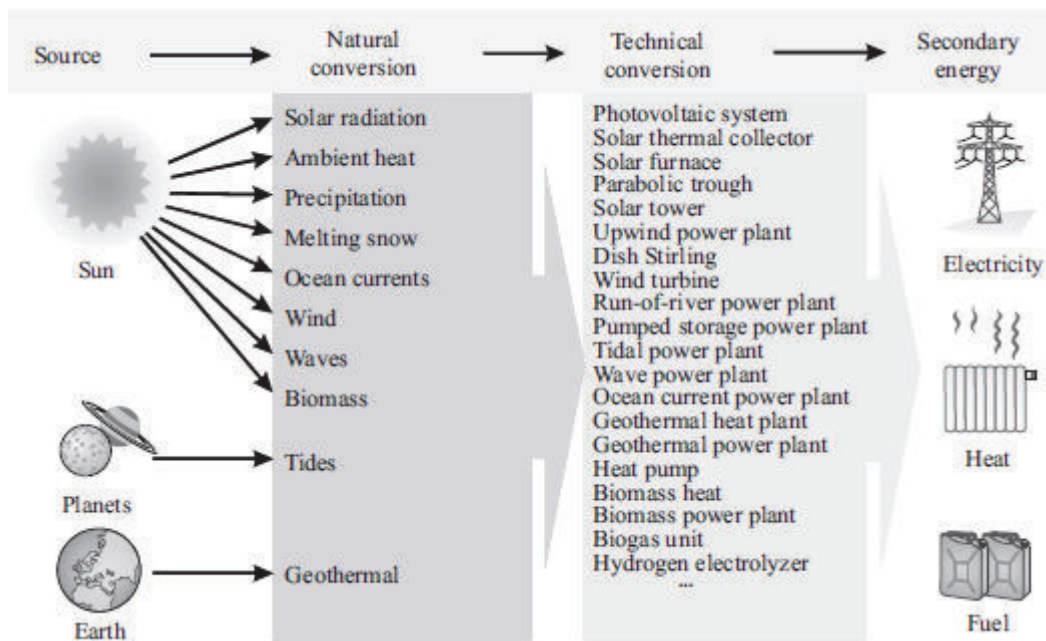
### 2. MARCO TEÓRICO

En la actualidad, la energía es la base fundamental del desarrollo tecnológico y económico de un país, no hay actividad que sea independiente de la energía; el aumento del uso de energía, ha creado problemas de demanda y oferta. Si se pretende satisfacer la creciente demanda mundial de energía con combustibles fósiles, es posible que estos combustibles ya no estén disponibles en pocos años para la producción de energía, por lo cual, el mundo debe enfocarse en fuentes de energía renovable para satisfacer la demanda y conservar los recursos naturales finitos [7].

Las energías renovables desempeñan un papel importante, ya que satisfacen la demanda energética mundial cuidando el medio ambiente. Las fuentes de energía que se consideran renovables son aquellas que son infinitas dentro de un marco de tiempo relevante para los seres vivos. A la energía renovable se la puede dividir en tres grupos: i) solar, ii) planetaria y iii) geotérmica. El potencial de suministro anual de estas tres fuentes de energía se divide en el mundo de la siguiente manera [8]:

- Energía Solar 3,900,000,000 [PJ/año] (Peta Joule/año)
- Energía Planetaria 94,000 [PJ/año]
- Energía Geotérmica 996,000 [PJ/año]

En la siguiente figura se presenta la clasificación de las fuentes y formas del uso de la energía renovable.



**Figura 2.1.** Fuentes y formas de usar la energía renovable [8].

## 2.1. Energía solar

La energía solar, es la energía radiante del sol, es abundante, relativamente confiable y no se limita a una determinada región geográfica, siendo una fuente de energía renovable ilimitada.

Como se puede apreciar en la figura 2.1, el sol es la mayor fuente de energía renovable, ya que, anualmente la tierra recibe una gran cantidad de energía solar ( $3,9 \times 10^{24}$  J  $\approx 1,08 \times 10^{18}$  kWh), esta cantidad es casi 10 000 veces más que la demanda mundial de energía primaria, si se lograra aprovechar solo el 1/10 000 de la energía solar incidente en la Tierra, se podría satisfacer toda la demanda de energía de la humanidad [8].

Cuando se habla de energía solar existen varios términos que es necesario definirlos.

- Radiación solar
- Irradiancia solar
- Irradiación solar

- **Radiación solar**

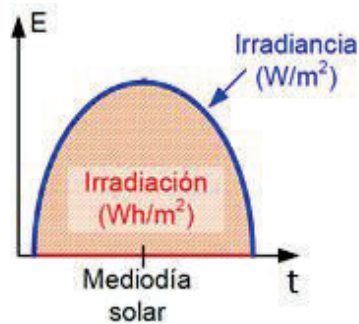
En [7] se define a la radiación solar como, la energía brillante emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas, estas ondas atraviesan el espacio interplanetario desde el sol hasta llegar a la Tierra sin necesidad de un medio material para su propagación, en un espectro desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

- **Irradiancia solar**

La irradiancia solar, está definida como la energía incidente sobre una superficie por unidad de área y tiempo, lo que equivale a la potencia incidente por unidad de superficie teniendo como unidad de medida el W/ m<sup>2</sup> [9].

- **Irradiación solar**

La irradiación es el valor acumulado de la irradiancia solar en un intervalo de tiempo, corresponde a la energía recibida por unidad de superficie, se mide en Wh/m<sup>2</sup> o en determinados casos en J/m<sup>2</sup> [9].



**Figura 2.2.** Irradiancia e Irradiación solar [9].

### 2.1.1 Irradiancia solar

En los sistemas fotovoltaicos, se prefiere a la irradiancia solar ya que su unidad de medida es el  $\text{W/m}^2$ , la irradiancia solar es un parámetro importante de monitoreo, usado para evaluar la eficiencia y rendimiento de los sistemas fotovoltaico principalmente [5].

- **Irradiancia solar extraterrestre**

Es aquella que se encuentra por encima de la atmósfera de la Tierra, y no se ve afectada por la aerósfera y condiciones climáticas, dependerá de la rotación de la Tierra, el valor promedio de irradiancia extraterrestre que la Organización Internacional Metroológica Legal (OIML) sugiere es  $1366 \text{ W/m}^2$  [7]. Dado que, la intensidad solar es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del sol, la irradiancia extraterrestre que incide sobre la superficie terrestre varía en un rango de 6,7% a medida que la Tierra orbita el sol [3].

- **Irradiancia solar en la Tierra**

Es aquella que atraviesa la atmósfera y toca la superficie terrestre, esta irradiancia es menor a la irradiancia solar extraterrestre puesto que la atmósfera reduce la irradiancia debido a los siguientes factores [8]:

- Reducción por reflexión atmosférica.*
- Reducción por absorción atmosférica (principalmente  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ ).-* La absorción de varios componentes atmosféricos, como el vapor de agua, el ozono, el oxígeno y el dióxido de carbono, es altamente selectiva y cubre solo unas pocas partes del espectro solar.
- Reducción como resultado de la dispersión de Rayleigh.-* ocurre cuando la luz llega a los componentes moleculares de la atmósfera con un diámetro mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz.



- iv. *Reducción como resultado de la dispersión de Mie.-* es el resultado de la contaminación en el aire. Es más débil a grandes altitudes y más fuerte en áreas industriales con aire altamente contaminado.

### **2.1.2 Irradiancia global, normal directa, difusa y reflejada**

La irradiancia solar se divide en varias componentes, debido a que, no toda la irradiancia extraterrestre llega directamente a la superficie terrestre, efecto de la atmósfera, nubes o porque incide sobre el suelo y se refleja.

#### **Irradiancia directa**

Se denomina irradiancia directa a la componente de la irradiancia global, que incide sobre una superficie y viene directamente del sol, sin que exista cambio de dirección [3].

#### **Irradiancia difusa (Irradiancia indirecta)**

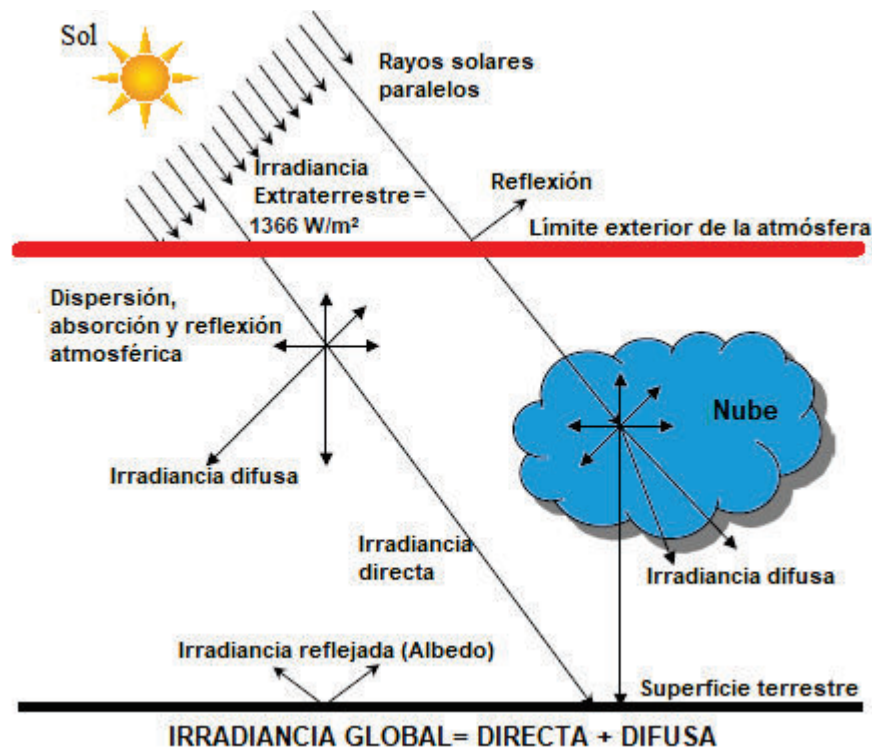
Es la componente de la irradiancia global que incide sobre la superficie terrestre de forma indirecta, ya que atraviesa la atmósfera y las nubes, lo que hace que se disperse [3], la irradiancia difusa representa un 15% de la irradiancia global en días soleados y en días nublados este porcentaje aumenta considerablemente.

#### **Irradiancia horizontal global**

Se denomina irradiancia horizontal global a toda la cantidad de luz en una superficie horizontal [3], es la suma de la irradiancia directa más la difusa.

#### **Irradiancia reflejada**

Se denomina irradiancia reflejada a la cantidad de luz solar dispersa desde la superficie terrestre que depende del albedo de la superficie. El albedo está definido como la relación de la irradiancia solar reflejada o ascendente que se refleja hacia el cielo y la irradiancia horizontal global incidente o descendente. El albedo depende de la superficie y puede variar de 0,1 para superficies oscuras a 0,2 para pastizales y a más de 0,8 para nieve recién caída. En una superficie perfectamente reflectante el albedo toma un valor de 1 [3].



**Figura 2.3.** Irradiancia directa, difusa y reflejada. Elaboración propia.

### 2.1.3 Instrumentos de medida de la irradiancia solar

La irradiancia solar, es una de las mediciones físicas menos precisas, mientras que otras cantidades físicas como la masa, corriente eléctrica y demás, se pueden medir con precisiones de partes por millón o incluso mejores, la instrumentación para mediciones solares no es muy precisa, aproximadamente 3 partes por mil. Esto, por la dificultad que implica físicamente convertir fotones en una determinada señal ya sea eléctrica o térmica que pueda medirse fácilmente. Las mediciones de irradiancia solar exactas no son muy comunes debido al costo de la instrumentación, mano de obra para la calibración y mantenimiento de estos instrumentos así como recopilar, procesar, y almacenar estos datos [10].

La ingeniería de sistemas de energía solar basada en estas mediciones está llena de incertidumbre que aumenta a medida que se usan mediciones de menor calidad [10].

En la actualidad se tiene varias formas de medir o calcular la irradiancia solar, ya sea mediante instrumentos de precisión como son los piranómetros y pirheliómetros que se describen en [3], [8], [10], [1]. En [10] hace referencia al concepto de calorimetría y al uso de diferentes dispositivos como: i) detectores termoelectrónicos en los cuales se encuentran las termopilas y ii) detectores fotoeléctricos. En [11], [12], [13] mencionan el uso de una

celda solar de referencia para el cálculo de la irradiancia solar, otro método que se utiliza para calcular la irradiancia es mediante estimaciones, ya sea usando datos meteorológicos [14], [15], o basados en paneles fotovoltaicos como indican las referencias [5], [4] y [6]. Incluso en [16] se presenta una forma de medir la irradiancia solar mediante el uso de dispositivos inteligentes.

Los instrumentos que se utiliza principalmente en estaciones meteorológicas, laboratorios o centrales fotovoltaicas para monitorear y medir la irradiancia solar son:

### **Pirheliómetro**

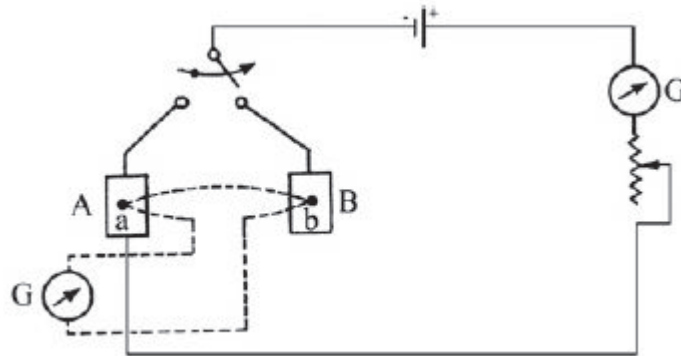
El pirheliómetro es un instrumento que permite la medición de la irradiancia normal directa, debido a que recolecta todos los fotones en el haz, esto se logra con un tubo largo y angosto con deflectores que limitan el campo de visión del detector, el cual se coloca en el fondo del tubo, el tubo bloquea los fotones difusos del cielo. Un requisito para las mediciones de irradiancia con un pirheliómetro es que el detector siempre sea normal al haz directo, lo que significa que el pirheliómetro debe seguir al sol a lo largo de su trayectoria durante todo el día [10].



**Figura 2.4.** Pirheliómetro [10].

El principio de funcionamiento del pirheliómetro de tipo termoeléctrico se basa en comparar las temperaturas de dos tiras “Manganin” ennegrecidas idénticas. Cada tira se conecta a un termopar y un calentador eléctrico como se muestra en la figura 2.5. Para medir la radiación, una tira se sombrea y se calienta mediante una corriente eléctrica que pasa a través de ella y la otra se calienta absorbiendo las radiaciones solares que inciden en ella. Para el segundo conjunto de observaciones cambian los roles de las tiras para anular el efecto de las diferencias menores inevitables en las propiedades de las tiras. Cuando sus temperaturas se igualan, la energía eléctrica usada para el calentamiento de la primera tira será igual a la energía solar absorbida por la segunda tira. Y la radiación solar absorbida

por la segunda tira es igual a la división de la energía eléctrica para el producto del área de la banda y su capacidad de absorción [1].



**Figura 2.5.** Diagrama de circuito para pirheliómetro de tipo termoelectrico [1].

## Piranómetro

El piranómetro es un dispositivo que mide la irradiancia solar global total recibida de todo el hemisferio en una superficie horizontal [1], el piranómetro así como el pirheliómetro necesita un campo de visión bien definido [10].

Los piranómetros se basan en dos enfoques para medir la irradiancia global: sensores térmicos y sensores de semiconductor.

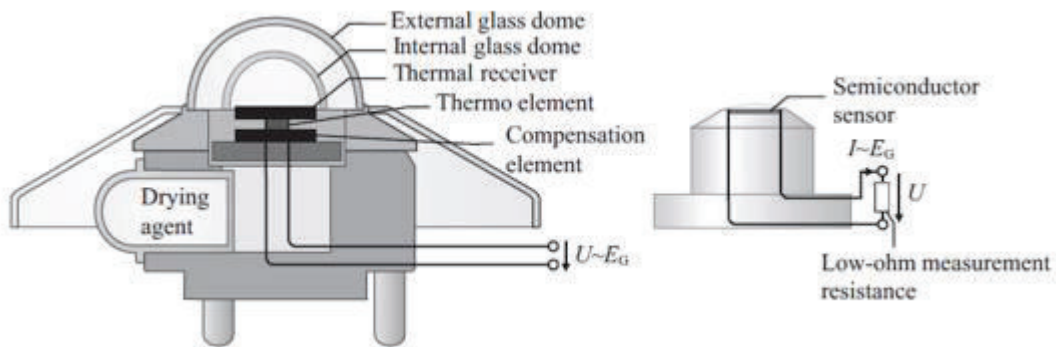
- **Sensores térmicos**

Este tipo de sensores tienen un receptor negro que se calienta con la luz solar, para el aislamiento térmico se usa dos cúpulas de vidrio, la diferencia entre la temperatura de la superficie del receptor y la temperatura ambiente es proporcional a la irradiancia, un elemento térmico en la parte posterior del receptor convierte a la diferencia de temperatura en una señal de voltaje. Este sensor es más exacto en condiciones constantes de radiación, el inconveniente es que el sensor tiene un poco de inercia y dependiendo del diseño específico puede tomar hasta un minuto alcanzar los valores finales correctos [8].

- **Sensores de semiconductor**

Estos sensores consisten normalmente en silicio como las celdas fotovoltaicas, generan una corriente de cortocircuito que aumenta linealmente a la irradiancia. Una resistencia de medición muy pequeña permite que el sensor se aproxime al cortocircuito y la corriente se convierte en una señal de voltaje. Sin embargo, estos sensores son sensibles a variaciones de temperatura, por lo que la temperatura del

sensor también debe registrarse para hacer correcciones de los valores de medición. La corriente generalmente aumenta en  $0,15\%/^{\circ}\text{C}$ . Otro inconveniente es que no todas las longitudes de ondas de la luz solar se convierten igualmente en una señal, debido a su sensibilidad espectral [8].

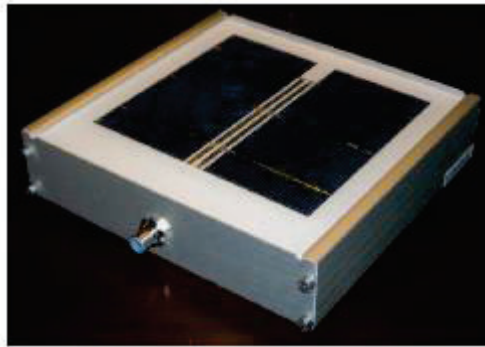


**Figura 2.6.** Piranómetro para la medición de la irradiancia global. Izquierda: piranómetro con sensor térmico; derecha: piranómetro con un semiconductor de silicio [8].

### Celdas fotovoltaicas de referencia

Las celdas fotovoltaicas de referencia son utilizadas para medir la irradiancia solar, funcionan de forma diferente, los fotones con energía por encima del intervalo de banda del material fotovoltaico se convierten directamente en cargas positivas y negativas que se pueden recopilar y utilizar en un circuito externo [13]. La celda fotovoltaica de referencia genera una corriente que depende del número y la distribución espectral de los fotones. La corriente de la celda de referencia se obtiene midiendo el voltaje a través de una pequeña resistencia que se incluye en el paquete de celdas de referencia. Este voltaje se calibra bajo condiciones ( $1000 \text{ W / m}^2$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ) utilizando técnicas estándar [17].

Las celdas de referencia son especialmente útiles para la caracterización precisa del rendimiento fotovoltaico, lo que permite una mejor detección de los cambios en el rendimiento del sistema fotovoltaico [17].

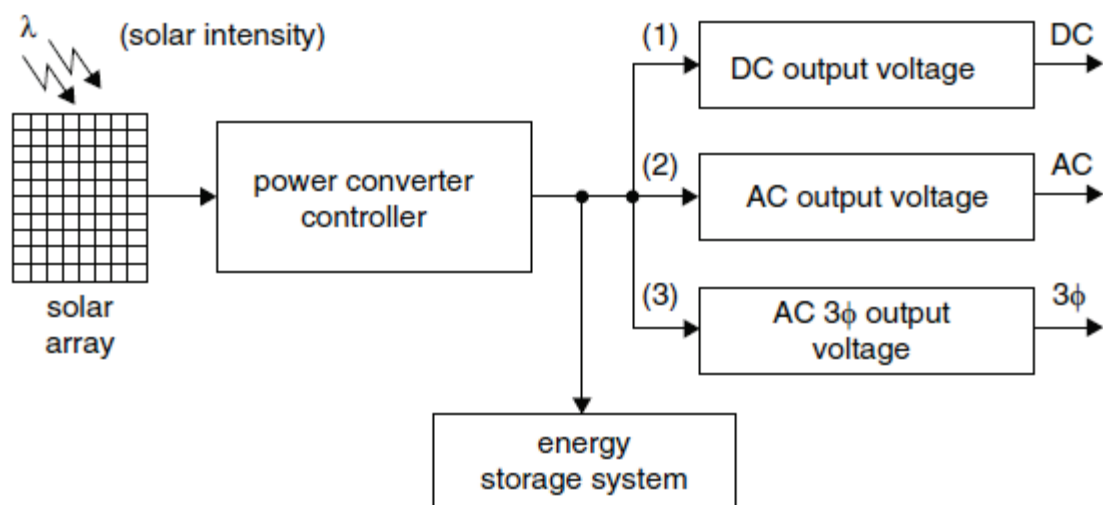


**Figura 2.7.** Celda fotovoltaica de referencia [17].

### 2.1.4 Importancia de la irradiancia solar en sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos transforman la energía solar en energía eléctrica, esto se logra a partir de paneles fotovoltaicos conectados entre sí [1]. Además de los paneles fotovoltaicos, los componentes del sistema incluyen un controlador de carga de la batería, un inversor (convierte la energía de corriente continua a corriente alterna), un controlador MPPT (seguimiento punto de máxima potencia) y determinados componentes del equipo de conmutación de bajo voltaje [7].

Un sistema fotovoltaico típico se muestra en el siguiente diagrama en la figura 2.8. El panel fotovoltaico recibe la luz solar y la convierte en electricidad. Un convertidor de potencia, que posee un controlador de seguimiento de potencia máxima, determina el tipo de corriente entregada a la carga. Se puede proporcionar un sistema de almacenamiento de energía y posibles conexiones con una utilidad monofásica o trifásica [7].

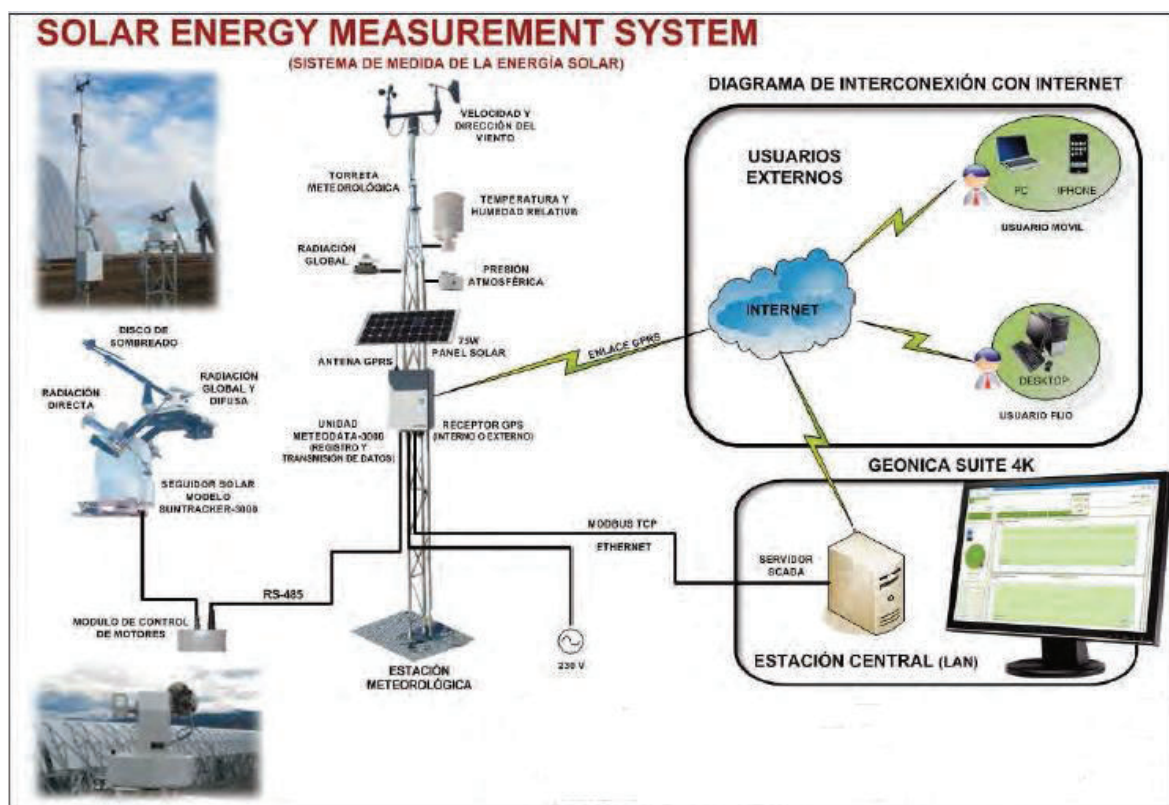


**Figura 2.8.** Diagrama de bloque de un sistema fotovoltaico [7].

Existen tres configuraciones comunes de los sistemas fotovoltaicos: i) sistemas que alimentan energía directamente a la red eléctrica, ii) sistemas independientes o aislados que cargan baterías (no se conectan a la red), quizás con respaldo de un generador, y iii) aplicaciones en las que la carga está directamente conectada a los paneles fotovoltaicos [18].

## Sistemas de monitoreo meteorológico

Los sistemas fotovoltaicos, principalmente las centrales fotovoltaicas tienen una estación meteorológica para el monitoreo, medición y almacenamiento de variables como: temperatura ambiente, humedad relativa, la velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y la irradiancia solar [3].



**Figura 2.9.** Estación meteorológica [19].

Los parámetros meteorológicos antes mencionados influyen en la conversión de energía por lo que es necesario tener registros de los mismos para estudios y mejoramiento en la producción de energía en las centrales fotovoltaicas y de esa manera el sistema se mantenga en un punto óptimo [3], por lo que es necesario los sistemas de monitoreo [20], [21], [22], [23].



## **Aplicaciones basadas en la medición de la irradiancia solar**

La medición y el monitoreo de la irradiancia solar en un sistema fotovoltaico es de mucha importancia y puede ser utilizado para:

- Diseño de un sistema fotovoltaico.
- Mejorar el rendimiento y eficiencia de una central fotovoltaica
- Diseño de arquitecturas de sistemas de conversión.
- Aumentar la eficiencia del proceso de extracción de energía en condiciones de sombreado parcial.

### **i. Diseño de un sistema fotovoltaico**

En [24] se presenta una metodología que identifica cinco pérdidas del sistema fotovoltaico basados en la medición de cuatro variables simples entre las principales están la irradiancia y la temperatura. A esta metodología de evaluación se la conoce como “método de verificación sofisticada” y es importante para el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico. Este método puede identificar pérdidas como disminución de la eficiencia, pérdidas de sombreado, pérdidas de desajustes de energía, pérdidas del inversor entre otras.

### **ii. Rendimiento y eficiencia de una central fotovoltaica**

El cálculo del rendimiento y la eficiencia en un sistema fotovoltaico es de mucha importancia para mejorar capacidad de generación de energía principalmente en centrales fotovoltaicas. En [25], se realiza un estudio sobre el rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a la red, para lo cual se usa un sensor de irradiancia y dos sensores de temperatura que están conectados externamente al sistema a través del inversor para obtener la irradiancia, la temperatura ambiente y los perfiles de temperatura del módulo en el sitio. Por el contrario, otros datos de rendimiento, como la corriente alterna, la corriente y el voltaje continuo, se registran desde el inversor.



### Factor de Rendimiento.-

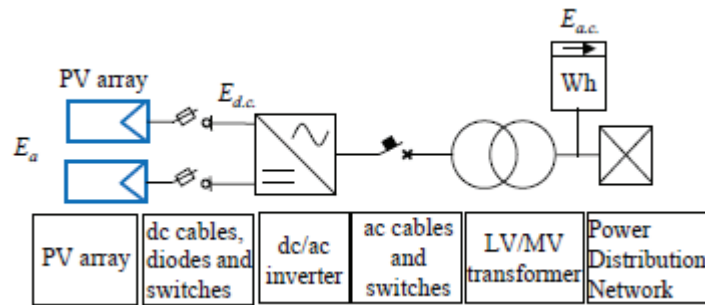
El factor de rendimiento PR (performance ratio) es un parámetro importante de evaluación para la verificación del diseño del sistema y la calidad operativa de los sistemas fotovoltaicos [26], el factor de rendimiento da una idea de cuanta energía se aprovechó durante la operación normal del sistema fotovoltaico, este valor es representado en porcentaje, sin embargo, no se logra tener un factor de rendimiento con un valor ideal de 100%, las centrales de fotovoltaicas de alto rendimiento pueden alcanzar un PR hasta el 80% [27].

El factor de rendimiento se define como la relación del rendimiento final del sistema fotovoltaico ( $Y_f$ ) dividido para el rendimiento de referencia ( $Y_r$ ) [26].

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

**Ecuación 2.1.** Factor de rendimiento [26].

Los parámetros rendimiento final y el rendimiento de referencia del sistema fotovoltaico. Se definen considerando el esquema típico de planta fotovoltaica mostrado en la siguiente figura.



**Figura 2.10.** Esquema típico de un sistema fotovoltaico [27].

El rendimiento final del sistema fotovoltaico ( $Y_f$ ), se define como la relación entre la salida de energía neta de CA (corriente alterna), ( $E_{ac}$ ) energía calculada para un periodo de tiempo dividido para la potencia nominal instalada (DC) que viene dado por la placa de características de los paneles fotovoltaicos [27].

$$Y_f = \frac{E_{ac}(t)[kWh]}{P_0 [kW]}$$

**Ecuación 2.2.** Rendimiento final [26].

Representa la cantidad de horas que el generador fotovoltaico necesitaría para funcionar a su potencia nominal para proporcionar la misma energía [26].

*El rendimiento de referencia del sistema fotovoltaico ( $Y_r$ )*, se define como la relación entre la irradiación solar incidente en el plano del sistema fotovoltaico ( $H$ ) en un intervalo de tiempo dividido para la irradiancia en condiciones estándar  $G_{STC}$  [27].

$$Y_r = \frac{H(t)[kWh/m^2]}{G_{STC}[kW/m^2]}$$

**Ecuación 2.3.** Rendimiento de referencia [26].

Representa un número equivalente de horas a la irradiancia de referencia en STC [26].

### **Eficiencia.-**

La eficiencia de los módulos fotovoltaicos, está definida como la relación entre la potencia máxima de salida y la irradiancia incidente que a su vez es el producto de la irradiancia ( $G$ ) y el área del panel fotovoltaico ( $A_{PV}$ ) [28]; y es la manera de definir la calidad de los paneles fotovoltaicos

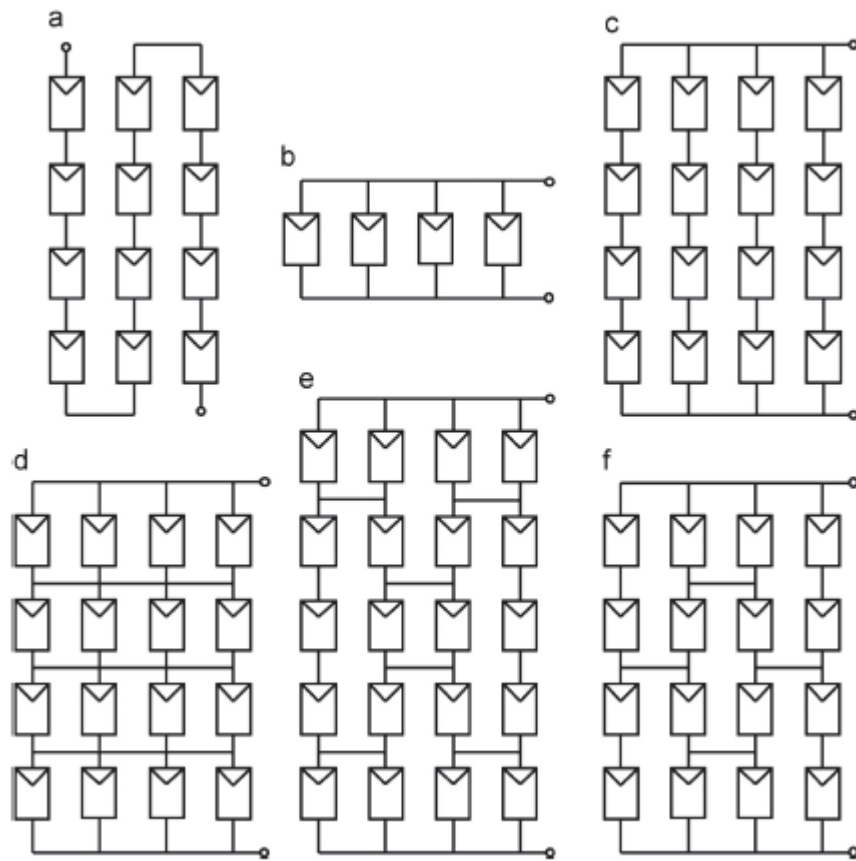
$$\eta = \frac{P_{\max out}}{G * A_{PV}}$$

**Ecuación 2.4.** Eficiencia de los paneles fotovoltaicos [28].

### **iii. Diseño de arquitecturas de sistemas de conversión**

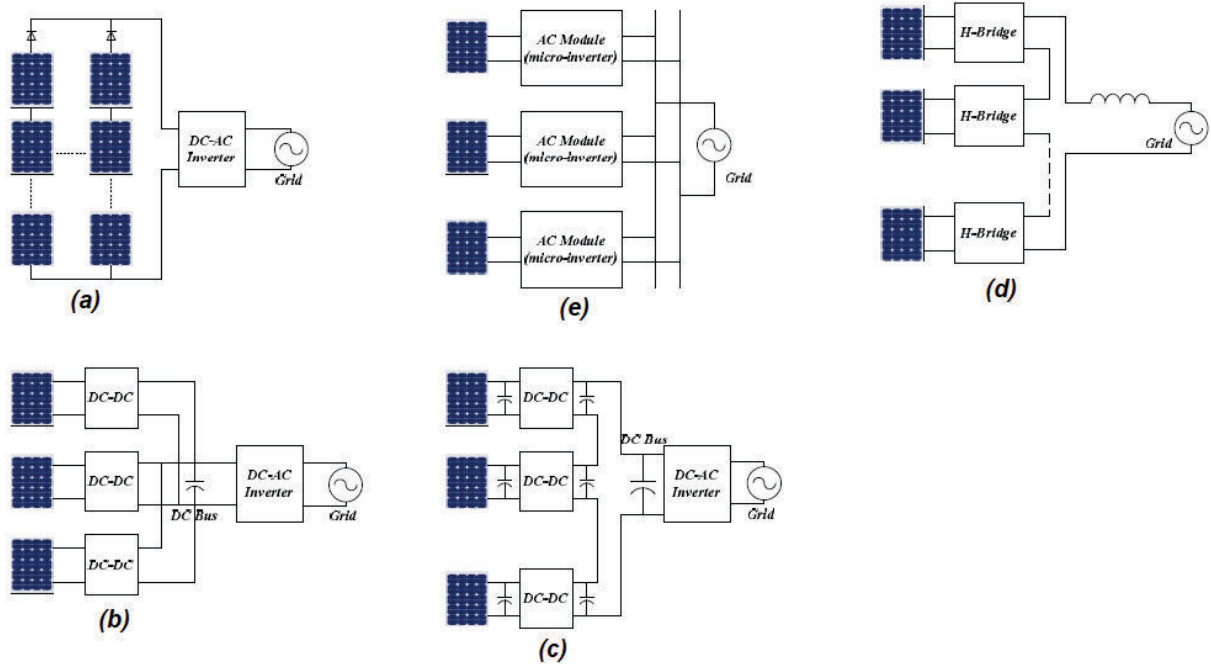
En la actualidad se han realizado diversos estudios acerca de diferentes arquitecturas de sistemas fotovoltaicos, considerando irradiancia solar desigual que puede haber en las centrales fotovoltaicas debido a nubosidad. A continuación, se presentan diferentes tipos de arquitecturas.

Para mejorar el rendimiento de las centrales fotovoltaicas con irradiancia desigual, en [29], [30], [31], se proponen varias estrategias sobre la arquitectura de sistemas de conversión en una central fotovoltaica, diferentes topologías o reconfiguración de paneles fotovoltaicos esto con el fin de reducir las pérdidas de desajuste.



**Figura 2.11.** Topologías de conexión de sistemas fotovoltaicos. (a) serie, (b) paralelo, (c) serie-paralelo, (d) total-cruzado, (e) puente-enlace y (f) panel [29].

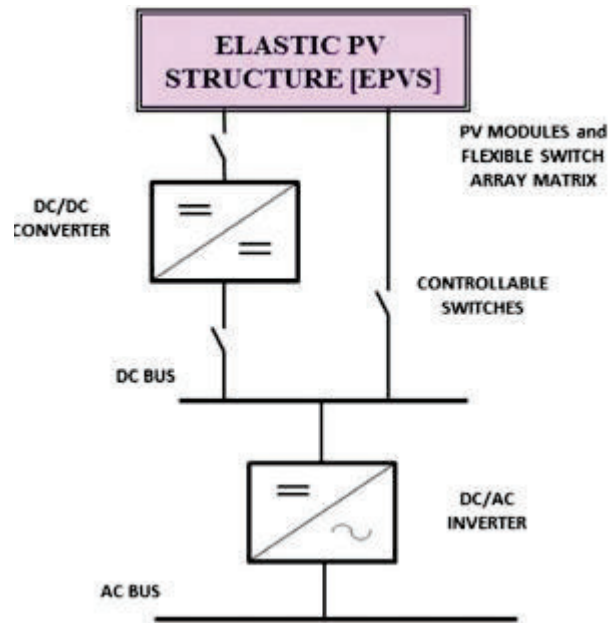
Existen otras arquitecturas de sistemas de conversión como lo muestra la figura 2.12, por ejemplo cuando la irradiancia solar es uniforme, se puede utilizar un inversor único (centralizado) en una central fotovoltaica pequeña o mediana; en otros casos, cuando las condiciones de trabajo no son uniformes se utilizan inversores de cadena o micro inversores [32], [33], [34]. Estos modelos están enfocados en electrónica de potencia teniendo en cuenta la irradiancia solar que se tiene en una central fotovoltaica.



**Figura 2.12.** Sistemas de conexión de inversores. (a) inversor de cadena, (b) micro convertidor en paralelo, (c) micro convertidor conectados serie, (d) inversor en cadena, y (e) modulo CA (micro inversor) [34].

#### iv. Aumentar la eficiencia del proceso de extracción de energía en condiciones de sombreado

En varios estudios se presenta un enfoque para aumentar la producción de potencia de los paneles fotovoltaicos bajo condiciones de sombreado [35], en donde se estima o mide la irradiancia solar en los paneles, cambiando las interconexiones eléctricas entre ellos. En [36], se muestra un aumento de energía de la matrices fotovoltaicas hasta el 30% de la energía total. Los resultados obtenidos en [37] demuestran que al usar arquitecturas reconfigurables en donde se utiliza un convertidor CC/CC adicional, el cual solo se conecta si es necesario cuando exista sombreado, como se ilustra en la figura 2.13. El fin de usar un convertidos CC/CC es para rastrear el punto de máxima potencia, al implementar este sistema se puede recuperar hasta el 13% de las pérdidas de potencia en sombreado.



**Figura 2.13.** Propuesta de sistema interactivo de utilidad adaptativa [37].

## 2.2. Celdas fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica o celda solar es un dispositivo semiconductor que convierte la energía solar directamente en energía eléctrica (CC), a través del efecto fotoeléctrico [2], están constituidas por dos capas semiconductoras una negativa y otra positiva.

### 2.2.1 Principio de funcionamiento

#### Semiconductores

La energía fotovoltaica usa semiconductores para transformar la luz solar en electricidad, esta tecnología está relacionada con las tecnologías de estado sólido las mismas que se utilizan para la fabricación de transistores, diodos, entre otros. El punto de partida para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos así como para semiconductores es el silicio cristalino, que se encuentra en la cuarta columna de la tabla periódica (IV), el germanio es otro elemento que se está en el grupo IV, adicionalmente el boro y el fósforo, de los grupo III y V, se agregan al silicio para producir la mayoría de los paneles fotovoltaicos [18].

## Dopaje

Es el proceso de agregar impurezas a un semiconductor puro, para alterar las propiedades eléctricas. Las impurezas usadas dependerán del tipo de semiconductor [1].

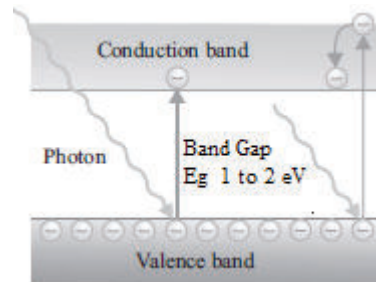
## Efecto fotoeléctrico

Se denomina efecto eléctrico, cuando un electrón es movido a un orbital más alto debido a la energía a los fotones que inciden sobre los semiconductores [8].

## Energía de banda prohibida ( $E_g$ )

Es la energía mínima que se necesita para que un electrón pase de la banda de valencia hacia la banda de conducción esta energía, es medida en electronvoltio (eV).

La  $E_g$  para el silicio es de 1,12 eV, lo que significa que el electrón necesita adquirir esa cantidad de energía procedente de los fotones de la radiación incidente, para liberarse de la fuerza electrostática que lo une a su propio núcleo, para saltar a la banda de conducción [18].



**Figura 2.14.** Fotones que mueven electrones de la banda de valencia a la banda de conducción [8].

## Unión P-N

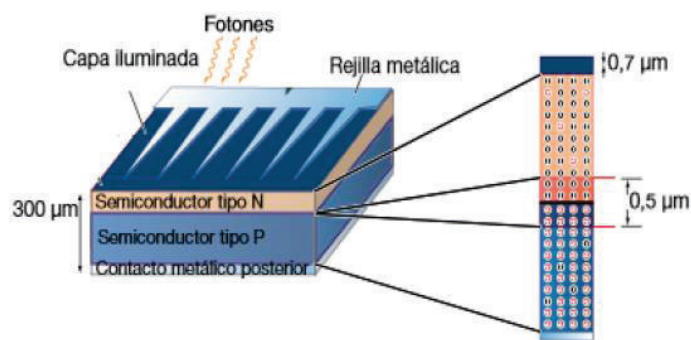
La asimetría electrónica se logra poniendo en contacto los semiconductores tipo p y tipo n, en la unión de estos semiconductores la mayoría de los portadores de carga fluyen en la dirección opuesta, creando así una carga positiva en la región n y una carga negativa en la región p.

La unión p-n se conecta en polarización directa o polarización inversa; en condición de polarización directa, el portador de carga enfrenta una diferencia de potencial de banda reducida apareciendo la corriente de circulación, mientras que en condiciones de

polarización inversa, los portadores de carga deben superar la diferencia de banda aumentada por ende la corriente de circulación es muy baja [1].

### Partes de una celda fotovoltaica

Una celda fotovoltaica está constituida principalmente por una capa de material semiconductor tipo n que se encuentra dopada con átomos de fósforo, una capa inferior de material semiconductor tipo p generalmente dopada con átomos de boro, una rejilla metálica (electrodo negativo), un contacto metálico posterior (electrodo positivo) [38].



**Figura 2.15.** Partes de una celda fotovoltaica [38].

### 2.2.2 Materiales de las celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son fabricadas de varios materiales con diferentes estructuras para reducir el costo inicial y lograr la máxima eficiencia eléctrica. Existen varios tipos de materiales de celdas fotovoltaicas como: (a) mono cristalinos, (b) poli cristalinos, (c) silicio amorfo, (d) compuestos de película delgada, así como otras capas absorbentes de semiconductores, que proporcionan celdas fotovoltaicas eficientes para aplicaciones especializadas [1].

A su vez las celdas fotovoltaicas de película delgada se pueden fabricar utilizando una variedad de semiconductores compuestos. Estos materiales compuestos incluyen (a) seleniuro de indio y cobre ( $\text{CuInSe}_2$ ), (b) sulfuro de cadmio ( $\text{CdS}$ ), (c) telururo de cadmio ( $\text{CdTe}$ ), (d) sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y (e) fosfato de indio ( $\text{InP}$ ) [1].

A continuación, se describen los materiales más utilizados para la fabricación de celdas fotovoltaicas:

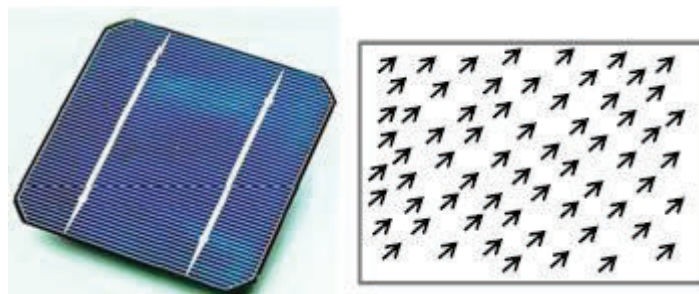
**i. Silicio mono cristalino (c-Si).**

El silicio es el segundo elemento más abundante en la tierra, se encuentra en arena común, en sílice o cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) de alta calidad que provienen de minas. Sin embargo, al no ser silicio puro, necesita de diferentes procesos hasta purificarlo, esto representa costos elevados [18].

El silicio utilizado en este tipo de celda presenta alta pureza y una estructura cristalina perfecta [1]. La superficie de la celda mono cristalino está formada por una variedad de pirámides de cuatro lados que permiten reflejar la luz en el cristal [18], su eficiencia está en el rango de 14-17% [38].

Características:

- Las obleas son de aproximadamente 0,3 mm de grosor.
- Los bloques de silicio (Si) consisten en un solo cristal.
- Los átomos de silicio están en una sola dirección.
- Su apariencia es de un solo color.
- Tienen una eficiencia promedio de 16 %



**Figura 2.16.** Celda de silicio mono cristalino [39].

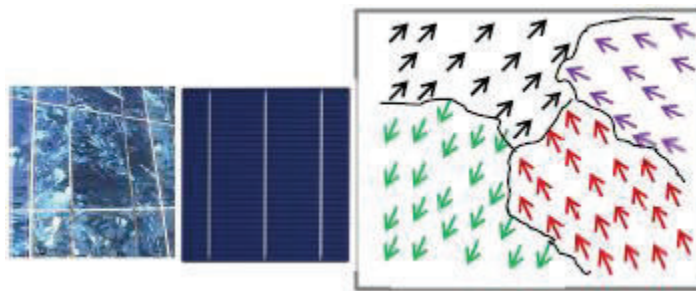
**ii. Silicio poli cristalino o multi cristalino (poli-Si o mc-Si)**

Las celdas fotovoltaicas de silicio poli cristalino están hechas de lingotes cuadrados, este material no es igual en todas sus partes, las celdas poli-cristalinas están hechas de material de silicio similar al mono-cristalino, son menos costosas en comparación con las celdas solares mono cristalinas y de menor eficiencia debido a los límites de grano que se encuentran en las celdas [1], alcanzan un rendimiento aproximado de 11 al 14% [38].



Características:

- Las obleas son de aproximadamente 180 a 350  $\mu\text{m}$  de grosor.
- Cuando el silicio en estado líquido se solidifica, se tiene una estructura cristalina formada de numerosos cristales más pequeños.
- Los átomos de silicio están distribuidos de manera homogénea en una misma área.
- Los átomos de silicio, tienen distinta dirección, dependiendo de la superficie.
- Antes eran de distintos colores, ahora se tiene celdas de un mismo color.
- Son más comercializadas que las celdas de silicio mono cristalino.
- La eficiencia media es de aproximadamente el 12%.



**Figura 2.17.** Celdas de silicio poli cristalino [39].

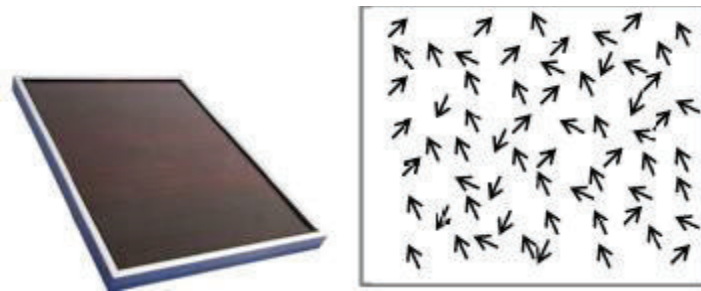
### iii. Película delgada (Silicio Amorfo a-Si)

La tecnología de película delgada actualmente está basada en silicio amorfo, es decir, silicio en que hay muy poco orden en la disposición de los átomos [18], en estas celdas fotovoltaicas, la capa superior (silicio amorfo) absorbe de manera predominante la porción visible del espectro solar y la parte inferior absorbe principalmente la parte infrarroja del espectro solar [1].




Las celdas de laboratorio de este tipo tienen una eficiencia de casi el 13%, sin embargo, los módulos comerciales llegan a tener una eficiencia menor, entre el 5 y 8% [18]. Estas celdas fotovoltaicas son menos costosas y con menor eficiencia comparado con las otras tecnologías. Para mejorar la eficiencia de este tipo de celdas fotovoltaicas, se implementan diferentes técnicas, como los esquemas de captura de luz, para aumentar la absorción de la luz solar [1].

Características:

- Es una alternativa rentable.
- Se requiere de menos material semiconductor.
- Los átomos de silicio se encuentran en dirección aleatoria.
- Generalmente son de color negro.
- Tiene una eficiencia menor del 10%, entre 5-8%.



**Figura 2.18.** Celda de película delgada (silicio amorfo) [39].

CÉLULA		EFICIENCIA EN LABORATORIO	EFICIENCIA DIRECTA
	Mono-cristalina	24%	14-17 %
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfos)	16%	<10%

**Figura 2.19.** Eficiencia de los diferentes tipos de materiales [38].

#### iv. Nuevas tecnologías

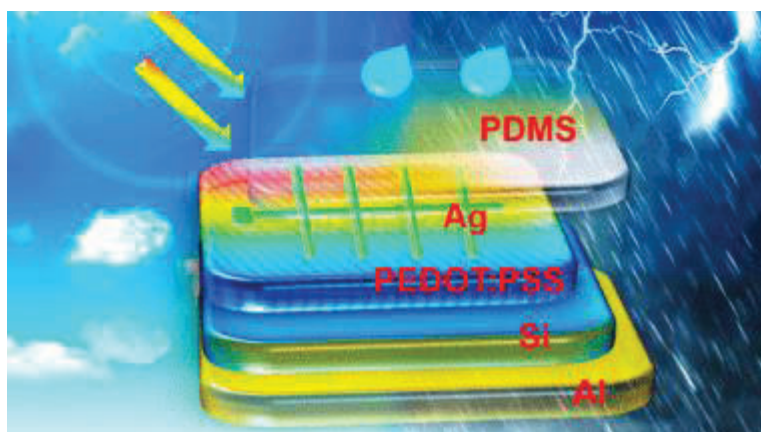
En la actualidad se ha investigado y creado celdas fotovoltaicas basadas en nuevas tecnologías, capaces de generar energía eléctrica en la noche e inclusive en lluvia.

Científicos han desarrollado celdas fotovoltaicas con nuevas tecnologías, capaces de generar electricidad en la noche, este proyecto está a cargo de dos

universidades: Universidad Oceánica de China, y la Universidad Pedagógica de Yunnan, que participan en el desarrollo de estas celdas fotovoltaicas [40].

Estas nuevas celdas fotovoltaicas están basadas en un nuevo material llamado LPP (siglas en inglés de "fósforo de larga persistencia") que es capaz almacenar energía solar durante el día para que ésta sea recolectada en la noche. Con las tecnologías comunes a base de silicio, la luz parcialmente visible puede ser absorbida y convertida en electricidad, pero el LPP es capaz de almacenar energía solar a partir de luz no absorbida y cercana a la infrarroja [40].

Para el caso de celdas capaces de generar energía eléctrica en condiciones de lluvia, científicos han creado, celdas fotovoltaicas de silicio con nanogeneradores triboeléctricos (el efecto triboeléctrico entra en vigor cuando entran en contacto dos materiales diferentes que están dispuestos de acuerdo con su facilidad de donar o aceptar electrones) que convierte la energía mecánica (el movimiento), en electricidad, usando un electrodo mutuo para obtener energía de la luz solar y las gotas de lluvia. Dado que los paneles de tecnologías convencionales reducen la potencia de salida en lluvia, y casi en su totalidad en la noche, estas nuevas celdas podrían generar electricidad en cualquier condición climática diurna, e inclusive en la noche si hay lluvia; estas celdas tienen una eficiencia superior a 13,6% [41].



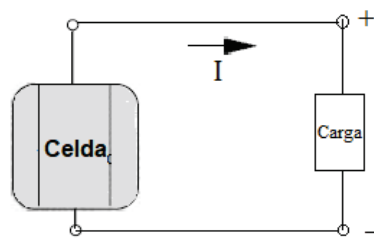
**Figura 2.20.** Estructura de la celda fotovoltaica compuesta de silicio (Si) de heterounión está integrada con un TENG (nanogenerador triboeléctrico), por un electrodo mutuo de una película de poli (3,4-etilendioxitiofeno): poli (estirenosulfonato) (PEDOT: PSS) [41].

### 2.2.3 Parámetros básicos de una celda fotovoltaica

A continuación se describen los parámetros principales de una celda fotovoltaica [1]:

- **Corriente de la celda fotovoltaica ( $I$ )**

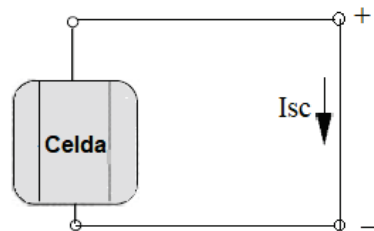
Es la corriente de salida que fluye a través de los terminales de la celda fotovoltaica, cuando se encuentra conectada a una carga.



**Figura 2.21.** Corriente de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

- **Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ )**

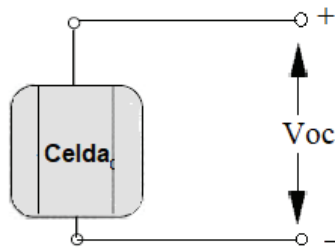
Es la corriente inducida por la luz solar en los terminales de la celda fotovoltaica cuando están conectados entre sí, es decir, cuando la carga de la celda es cero.



**Figura 2.22.** Corriente de cortocircuito de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

- **Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ )**

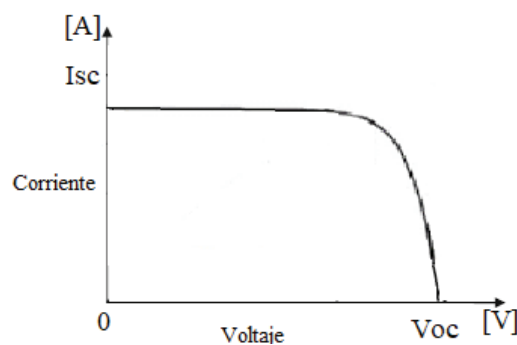
Es el voltaje en los terminales de la celda fotovoltaica cuando no se tiene conectado ninguna carga, es decir cuando no exista una corriente fluyendo.



**Figura 2.23.** Voltaje de circuito abierto de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

- **Curva característica I-V**

La curva característica I-V de una celda fotovoltaica es la gráfica de la corriente en función del voltaje, desde un voltaje igual a cero al voltaje de circuito abierto.



**Figura 2.24.** Curva I-V de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

- **Potencia máxima (Pmax)**

La potencia de salida de una celda fotovoltaica es el producto entre la corriente de salida y el voltaje de salida de la celda, está definida por la siguiente expresión.

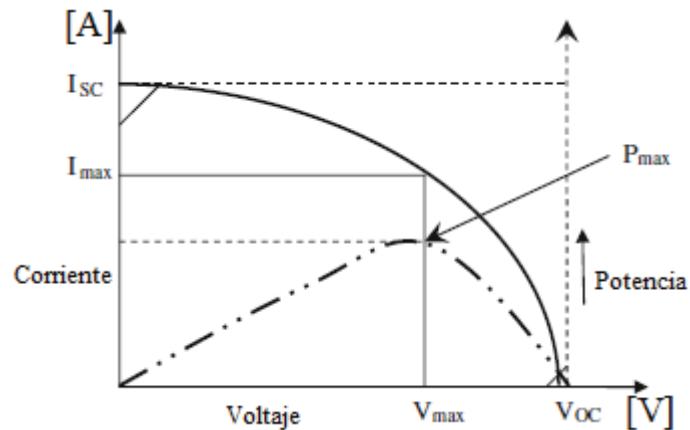
$$P_{out} = I_{out} * V_{out}$$

**Ecuación 2.5.** Potencia de salida de la celda fotovoltaica [1].

De igual forma, la potencia máxima es el producto entre la corriente máxima y el voltaje máximo.

$$P_{max} = I_{max} * V_{max}$$

**Ecuación 2.6.** Potencia máxima de la celda fotovoltaica [1].



**Figura 2.25.** Potencia máxima de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

- **Factor de llenado (FF)**

El factor de llenado se define como, la salida de potencia máxima extraída de una celda fotovoltaica dividido para la corriente de cortocircuito y un voltaje de circuito abierto. El valor ideal del FF es la unidad, sin embargo, debido a defectos y resistencia de contacto, el valor del factor de llenado es proporcional al pronunciamiento de la curva I-V, para una celda fotovoltaica de silicio (Si) el FF es de 0,88. El FF está dado por la siguiente ecuación [1]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} * V_{oc}}$$

**Ecuación 2.7.** Factor de llenado de la celda fotovoltaica [1].

- **Eficiencia de la celda fotovoltaica ( $\eta$ )**

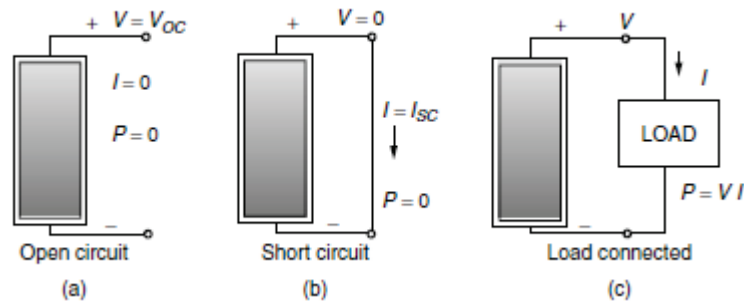
La eficiencia de una celda fotovoltaica está definida por la relación entre la potencia máxima y el producto entre la irradiancia solar incidente (G) y el área de la celda fotovoltaica ( $A_c$ ) (Ecuación 2.4).

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * Ac}$$

## 2.2.4 Curvas características de paneles fotovoltaicos bajo condiciones estándar

Para realizar el análisis de las curvas características I-V y P-V, de un panel fotovoltaico, se considera las tres condiciones en las que se puede encontrar el panel fotovoltaico: circuito abierto, cortocircuito y bajo carga.

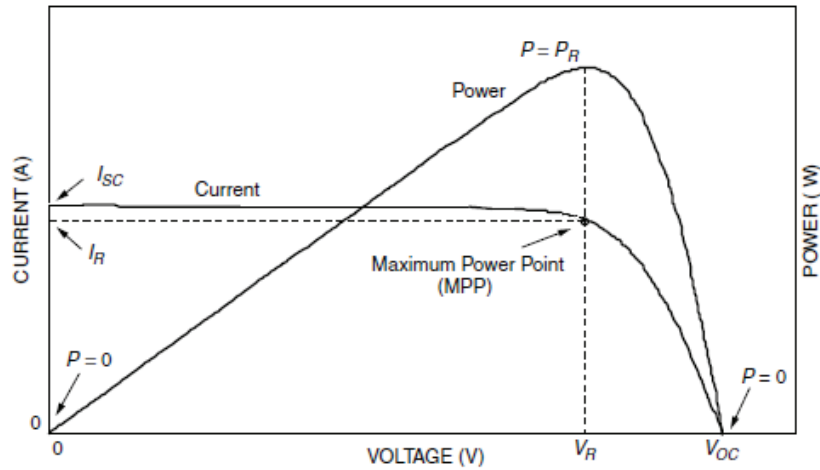
Se encuentra en circuito abierto cuando el panel fotovoltaico está expuesto al sol sin ninguna carga, por ende, no fluirá ninguna corriente. Cortocircuito, cuando se conectan los terminales del panel y fluye una corriente y su voltaje de salida es cero, en ambos casos la potencia es cero ya que es el producto entre la corriente y el voltaje. Y bajo carga cuando se conecta un elemento al panel fotovoltaico el cual producirá una corriente y un voltaje y se suministrará una potencia [18].



**Figura 2.26.** (a) circuito abierto, (b) cortocircuito y (c) bajo carga [18].

Para el cálculo de la potencia se debe considerar la curva característica I-V del panel fotovoltaico, en la siguiente figura se muestra una curva I-V para un determinado panel fotovoltaico, donde se visualiza varios parámetros importantes como el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ). En los extremos de la curva I-V la potencia de salida es cero ya que el voltaje o la corriente son cero. El punto de máxima potencia, se encuentra en la curvatura, es el punto donde el producto entre la corriente y el voltaje es máximo y se les denomina  $I_m$  y  $V_m$  respectivamente, y se denominan como  $I_R$  y  $V_R$  (I

nominal y  $V$  nominal) bajo casos especiales que corresponden a condiciones de prueba idealizadas [18].



**Figura 2.27.** La curva I-V y la potencia de salida para un panel fotovoltaico. En el punto de máxima potencia (MPP), el módulo proporciona la mayor cantidad de energía que puede bajo las condiciones de luz solar y temperatura para las cuales se ha dibujado la curva I-V [18].

La variación de la curva I-V depende directamente de la variación de la irradiancia solar y la temperatura del panel fotovoltaico, las pruebas en condiciones estándar (STC) se han establecido para comparaciones con otros paneles. Las condiciones estándar es cuando el panel fotovoltaico es sometido a una irradiancia solar ( $G$ ) de  $1000 \text{ W/m}^2$  (1 sol), masa de aire (AM) de 1,5 y una temperatura del panel fotovoltaico ( $T_c$ ) de  $25^\circ\text{C}$ . Los fabricantes de paneles fotovoltaicos proporcionan todos los parámetros del panel fotovoltaico bajo estas condiciones; el parámetro más importante es la potencia del panel fotovoltaico [18].

**Tabla 2.1.** Parámetros de un panel fotovoltaico que entrega el fabricante en condiciones estándar ( $1000 \text{ W/m}^2$ , AM 1,5 y  $25^\circ\text{C}$ ) [18]. Panel Kyocera KC120-1 [42].

Parámetros	Panel Kyocera KC120-1
Modelo	KC120-1
Material	Poli cristalino
Número de celdas	36
Potencia nominal [W]	120 W
Voltaje nominal [V]	16,9 V
Corriente nominal [A]	7,10 A
Corriente de cortocircuito [A]	7,45 A
Voltaje de circuito abierto [V]	21,5 V

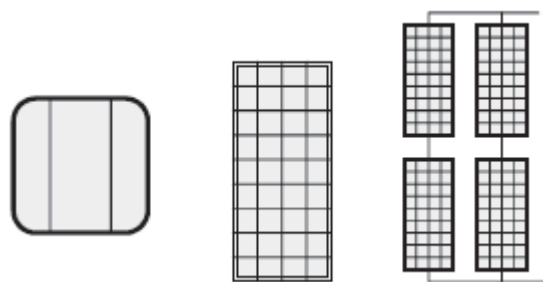


Largo	1425 mm
Ancho	652 mm
Profundidad	56 mm
Peso	11,9 Kg
Eficiencia del panel.	14%

### 2.2.5 De celdas a paneles y a cadenas fotovoltaicas

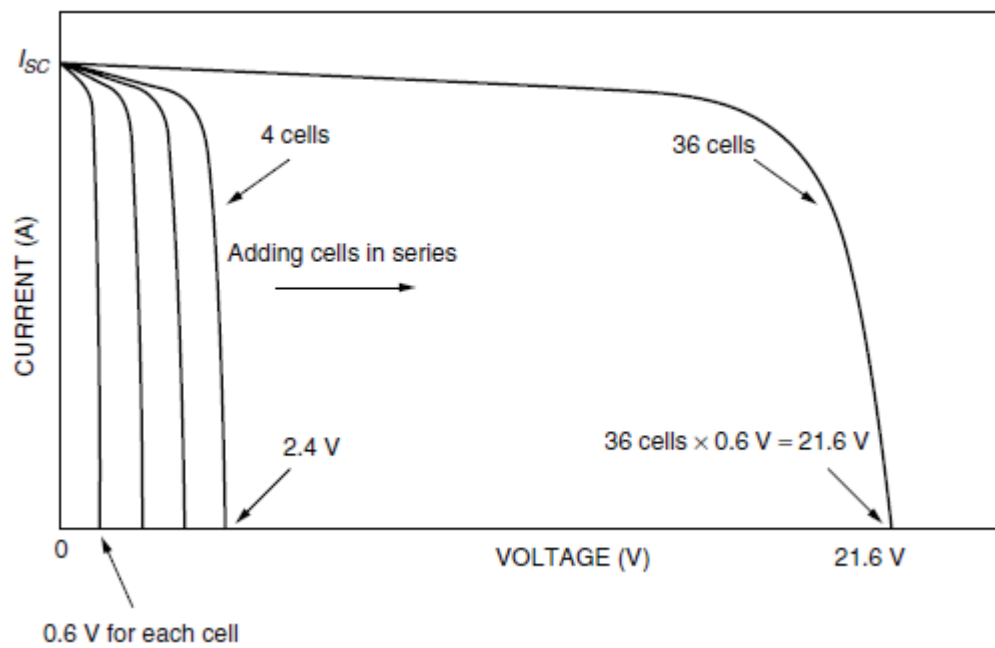
Una celda fotovoltaica es capaz de producir alrededor de 0,5 voltios; sin embargo, las celdas fotovoltaicas individuales no son capaces de generar suficiente energía para aplicaciones prácticas [1], por lo que es necesario la construcción de los paneles fotovoltaicos, que es un conjunto de celdas conectadas en serie, cubiertas por una estructura resistente a la intemperie. Por lo general; un panel de baja potencia está constituido por conjunto de 36 celdas conectadas en serie, los módulos de mayor potencia están constituidos por 72 celdas fotovoltaicas todas conectadas en serie; en algunos casos se tiene conectados en paralelo dos cadenas de 36 celdas fotovoltaicas [18].

La conexión de un determinado número de paneles fotovoltaicos se los conoce como sistemas fotovoltaicos, los paneles fotovoltaicos pueden ser conectados en serie o en paralelo; en serie para aumentar el nivel de voltaje y en paralelo para aumentar la corriente, con el fin de aumentar la potencia de salida. Un punto importante en el diseño de sistemas o centrales fotovoltaicos es determinar el número de paneles fotovoltaicos en serie y en paralelo para que entregue la energía que se necesite [1].



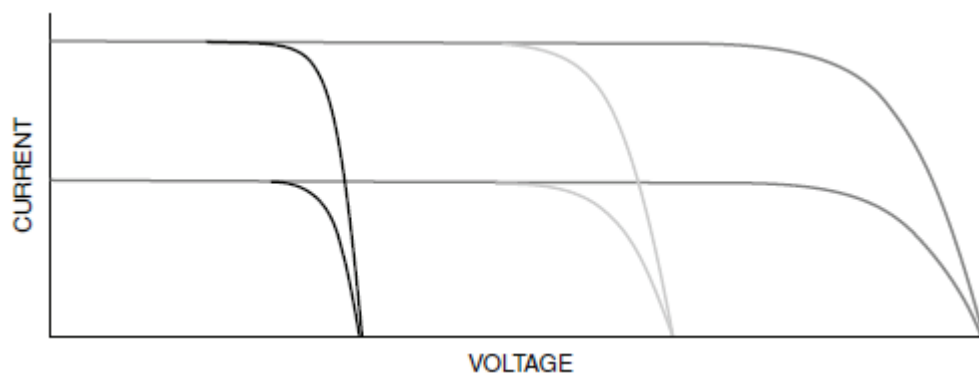
**Figura 2.28.** Celda, panel y cadena de paneles fotovoltaicos [18].

En la figura 2.29 se muestra como el voltaje del panel fotovoltaico va aumentando dependiendo del número de celdas fotovoltaicas que se conecten en serie.



**Figura 2.29.** Voltaje de celdas fotovoltaicas conectadas en serie [18].

En la figura 2.30 se muestra como varía el voltaje y la corriente, dependiendo de cómo están conectados los paneles fotovoltaicos en una cadena ya sea en serie para aumentar el voltaje o en paralelo para aumentar la corriente.



**Figura 2.30.** Curva I-V de una cadena de paneles fotovoltaicos [18].

### 2.2.6 Factores que afectan la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos

La conversión de energía eléctrica a partir de energía solar no es 100% eficiente, existen varios factores que disminuyen la eficiencia en los sistemas fotovoltaicos como por ejemplo los factores ambientales y pérdidas en componentes eléctricos. A continuación se presentan factores típicos que afectan a la eficiencia [43]:

- **Temperatura:** en condiciones de altas temperaturas, la eficiencia de un panel fotovoltaico varía y se tiene un impacto negativo en el rendimiento.
- **Suciedad:** el material acumulado sobre los paneles fotovoltaicos como el polvo o la nieve impide que la luz solar llegue directamente sobre las celdas lo que implica que la energía generada se reduce.
- **Sombreado:** es la obstrucción de la luz solar hacia los paneles fotovoltaicos debido a nubes (en centrales fotovoltaicas), arboles, edificios y otros objetos, lo que provoca que la potencia de salida sea variable.
- **Conexiones y cableado:** estos factores representan resistencias en el sistema fotovoltaico lo que constituye pequeñas pérdidas de energía
- **Diferentes tipos de paneles fotovoltaicos:** al tener paneles de diferentes características eléctricas produce un desajuste lo que conlleva a una pérdida de rendimiento.
- **Eficiencia del inversor:** los convertidores CC/CA tienen una eficiencia aproximada de 96-97%, estos inversores tienen una mayor eficiencia cuando la potencia de entrada de CC es alta y a su vez es menor que la potencia nominal del inversor.
- **Envejecimiento:** Los paneles fotovoltaicos reducen la energía generada con el pasar de los años de vida útil, se asume un valor de 0,5% por año.

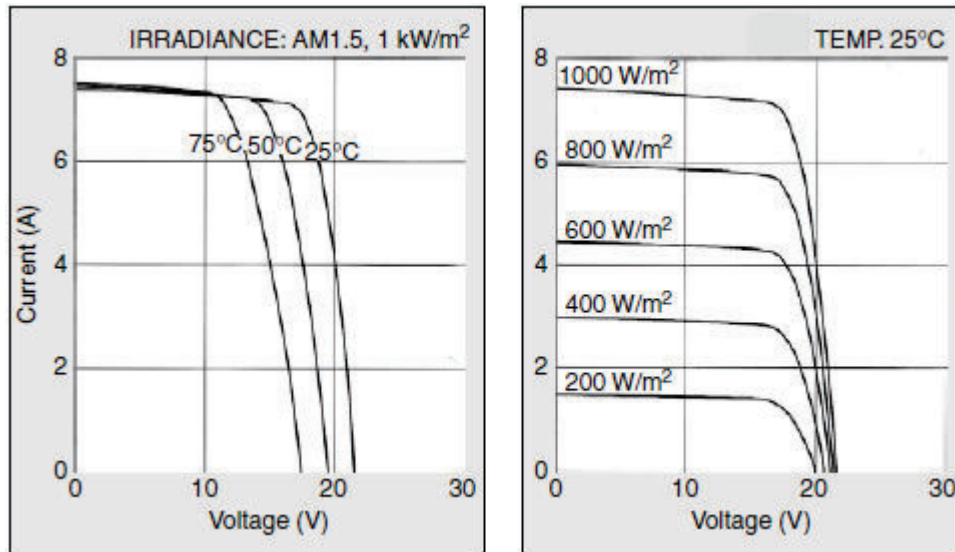
**Tabla 2.2.** Valores típicos de eficiencia [43].

<b>Factor</b>	<b>Valor Típico</b>
Temperatura	-0,5% sobre los 25°C
Eficiencia del inversor	96,5 %
Diferentes Características	98 %
Conexiones y Cableado	98 %
Suciedad	95 % (muy variables)
Envejecimiento	-0,5 % / año
Sombreado	Muy dependiente del medio ambiente

### **2.2.7 Impacto de la temperatura y la irradiancia solar sobre los paneles fotovoltaicos**

La temperatura y la irradiancia solar son dos parámetros que están directamente relacionados con las curvas características del panel fotovoltaico, cuando estos dos parámetros varíen también cambiarán las curvas I-V y P-V. Cuando aumenta la irradiancia solar aumenta la corriente de cortocircuito y la corriente del panel fotovoltaico, ya que la irradiancia es directamente proporcional a la corriente. Por otro lado, la temperatura es inversamente proporcional al voltaje. A medida que la temperatura sube, el voltaje baja. De acuerdo a esto el panel fotovoltaico producirá una mayor potencia cuando el nivel de irradiancia sea alto y la temperatura sea baja, pero es una condición no común, ya que al aumentar el nivel de irradiancia también aumenta la temperatura [2].

En ocasiones los fabricantes suelen proporcionar las curvas I-V, donde se muestra cómo cambia la curva I-V dependiendo del aumento o disminución de la temperatura y la irradiancia solar, en [18] muestra la variación de la curva I-V de un determinado panel fotovoltaico.



**Figura 2.31.** Curvas características de voltaje y corriente bajo diferentes temperaturas y niveles de irradiancia para el módulo fotovoltaico Kyocera KC120-1 [18], [42].

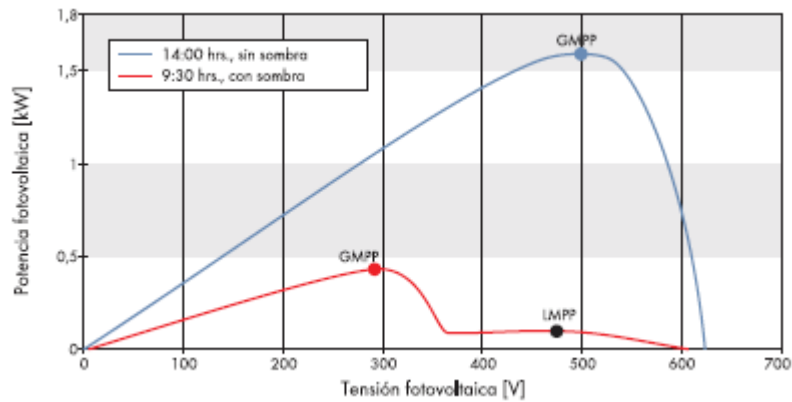
## 2.2.8 Impacto del sombreado en paneles fotovoltaicos

El sombreado es un factor de mucha importancia, ya que la potencia de salida de un panel fotovoltaico puede reducirse drásticamente incluso cuando una pequeña parte del panel se encuentre sombreado [18]. Como consecuencia del sombreado parcial, en los paneles fotovoltaicos se generan fallas por sobrecalentamiento local del área sombreada y provoca un mal funcionamiento de toda la cadena de paneles fotovoltaicos [44].

Cuando una celda fotovoltaica está sombreada un 50%, la salida de potencia del panel fotovoltaico se reduce casi a la mitad. Si el sombreado es mayor, el diodo de bypass mantiene activa la mitad no sombreada del módulo. En el proceso de generación, el MPP se mueve a un voltaje mucho más bajo. En la práctica, este interruptor representa un gran desafío para los equipos posteriores, como el inversor, que está diseñado para operar en el punto de máxima potencia en todas las condiciones de operación.

Los sistemas fotovoltaicos presentan el punto de máxima potencia (MPP), punto en el que transfieren la máxima potencia que depende directamente de la irradiancia, sin embargo, cuando existe un sombreado sobre los módulos fotovoltaicos, las curvas características se modifican presentando varios punto máximos de trabajo [45].

A estos puntos se los denomina MPP local (LMPP) y MPP global (GMPP) como se puede apreciar a continuación:

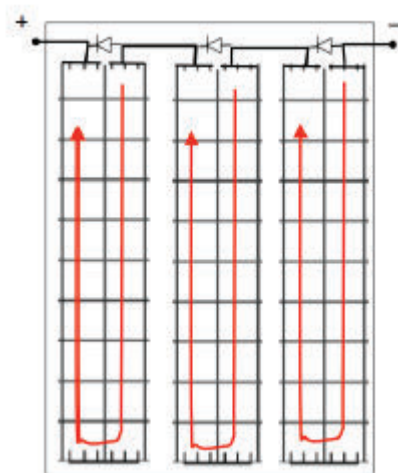


**Figura 2.32.** Curva P-V de un sistema fotovoltaico a dos diferentes horas del día [45].

## Métodos para mitigar el efecto de las sombras:

### 1. Diodos de derivación

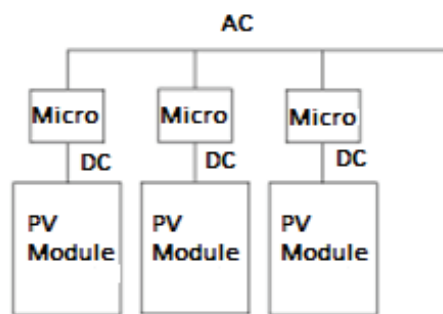
Una forma de reducir el efecto de sombreado, es el uso de diodos externos que son colocados por el fabricante o por el diseñador del sistema, ya que ayudan a preservar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, estos diodos son colocados en paralelo con los paneles o en cadenas de celdas dentro del panel fotovoltaico [18]. En condiciones normales los diodos se encuentran inactivos, la potencia fluye a través de los diodos cuando existe sombreado [8].



**Figura 2.33.** Sistema con diodos de derivación [18].

## 2. Micro inversor

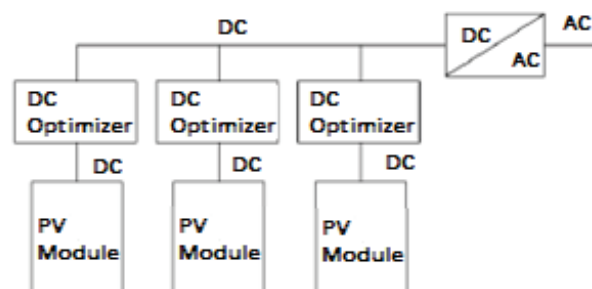
En ciertos sistemas fotovoltaicos tienen un solo inversor al servicio de todos los paneles, cuando se habla de micro inversores cada panel puede tener un pequeño inversor conectado para convertir su salida de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). Como cada micro inversor tiene un MPP, las salidas están conectadas en paralelo, cada panel fotovoltaico funcionará en su punto de máxima potencia, sin afectar los demás paneles.



**Figura 2.34.** Sistemas con micro inversores [18].

## 3. Optimizador CC

Un optimizador de CC ajustan los valores de corriente y voltaje de salida de cada módulo fotovoltaico para mantener la potencia máxima sin afectar el rendimiento de los demás módulos. Cuando existe sombreado, el optimizador CC eleva la corriente al nivel de los demás módulos sin sombras para no afectar al rendimiento total y adicionalmente se usa un inversor CC/CA.



**Figura 2.35.** Sistemas con optimizadores CC [18].

### 2.2.9 Degradación de las celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas se degradan debido a dos factores: i) condiciones ambientales y condiciones normales de trabajo, el principal efecto de la degradación es la disminución de la potencia de salida de las celdas [1].

- **Efecto del polvo**

Al estar expuestos a condiciones ambientales, existe deposición de polvo sobre los paneles que afecta directamente al rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. La disminución del rendimiento dependerá de las condiciones climáticas y la composición física y química del polvo, también dependerá de la superficie de los paneles fotovoltaicos ya que, si su superficie es rugosa, la acumulación de polvo será mayor. El polvo impide que la radiación solar incida directamente sobre los paneles fotovoltaicos y una forma de disminuir este efecto es con paneles inclinables. Las condiciones climáticas, la superficie, la velocidad de viento y el ángulo de inclinación también afectan a la acumulación de polvo [1].

- **Efecto del envejecimiento**

Las condiciones normales de trabajo a las que son expuestos los paneles fotovoltaicos, condiciones ambientales, y el paso del tiempo hace que el rendimiento se degrade, este efecto se conoce como “efecto de envejecimiento”. La vida útil de un panel fotovoltaico está relacionado directamente con el periodo de tiempo durante el cual produce la potencia nominal y depende principalmente de los materiales y la tecnología usados en la fabricación de las celdas fotovoltaicas [1].

Un método para la reducción de este efecto es utilizar sustratos de vidrio con filtro UV, ya que los paneles fotovoltaicos se harán más resistentes a la degradación [1].

Los paneles fotovoltaicos están diseñados para trabajar continuamente alrededor de 25 años, el nivel esperado de degradación natural en la potencia de salida es de alrededor de 0.5% -1.0% por año. Esto dependerá de las condiciones a las cuales están sometidos los paneles fotovoltaicos, ya que su degradación será más rápida si se encuentran en ambientes de altas temperaturas o alta humedad, estos parámetros pueden corroer o degradar los materiales que protegen al panel e incluso a las celdas fotovoltaicas [2].



## **2.2.10 Pruebas en paneles fotovoltaicos y garantía de calidad**

Bajo condiciones reales de trabajo los paneles fotovoltaicos están fabricados para funcionar un promedio de 25 años. Para verificar el tiempo de vida útil de un panel fotovoltaico fabricado en serie, se desarrollan varios métodos de prueba. Existen dos estándares (IEC 61215 e IEC 61646) que especifican métodos de pruebas para paneles fotovoltaicos cristalinos y de película fina. Estas pruebas se las realiza en laboratorios de pruebas certificadas, con ocho muestras que el fabricante envía, estas pruebas son [8]:

- Inspección visual y mediciones de salida
- Resistencia de aislamiento húmedo
- Prueba a largo plazo en condiciones exteriores ( $60\text{kWh/m}^2$ )
- Prueba de punto de acceso con sombreado de celda
- Prueba de temperatura de diodos de derivación
- Prueba de pre tratamiento UV ( $15\text{kWh/m}^2$ )
- Prueba de humedad
- Impacto de granizo (bolas de 25mm de hielo a una velocidad de 23m/s)
- Prueba de carga estática
- Prueba de resistencias de las conexiones.

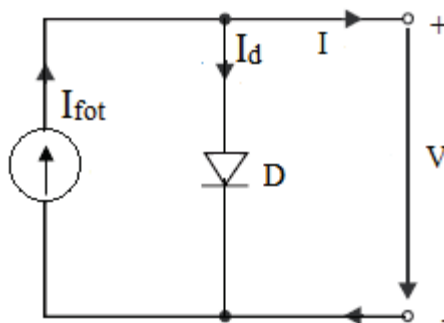
## 2.3. Circuitos equivalentes del panel fotovoltaico

Se analizará el circuito equivalente de una celda fotovoltaica y posteriormente se generalizará para paneles fotovoltaicos. El circuito equivalente de una celda fotovoltaica, es aquel que representa su funcionamiento y su comportamiento, sin perder las características eléctricas de la celda, por lo general estos circuitos contienen elementos pasivos y lineales [8].

Se describen los diferentes circuitos equivalentes, desde un modelo más simple (modelo ideal), hasta el modelo más complejo y se describirá los métodos para el cálculo de los parámetros desconocidos, en cada caso.

### 2.3.1 Circuito equivalente ideal [8]

Este circuito consta únicamente de un diodo en paralelo a una fuente ideal de corriente, la celda fotovoltaica, al ser de un material semiconductor dopado en unión n-p, y no estar expuesta a la luz solar actúa como un diodo. Cuando la celda fotovoltaica está expuesta al sol se la puede representar como una fuente de corriente conectada en paralelo al diodo como lo muestra la siguiente figura [8]. El circuito ideal, no se aproxima al comportamiento real de una celda fotovoltaica [46].



**Figura 2.36.** Circuito equivalente ideal. Elaboración propia.

Al aplicar la ley de corrientes Kirchhoff en el circuito anterior, se obtiene la siguiente ecuación de la corriente de la celda fotovoltaica [8].

$$I = I_{fot} - I_d$$

**Ecuación 2.8.** Corriente de salida del circuito equivalente ideal [8].

Donde:

$I$  es la corriente de la celda fotovoltaica.

$I_{fot}$  es la fotocorriente generada por la celda fotovoltaica.

$I_d$  es la corriente del diodo.

La fotocorriente ( $I_{fot}$ ) es directamente proporcional a la irradiancia solar y se describe con la siguiente expresión [4].

$$I_{fot} = I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}}$$

**Ecuación 2.9.** Fotocorriente [4].

Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito en STC de la celda fotovoltaica

$G$  es la irradiancia solar.

$G_{STC}$  es la irradiancia solar en STC (1000 W/m<sup>2</sup>)

A su vez la corriente del diodo ( $I_d$ ) viene dada por la siguiente expresión [8].

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{V}{AV_t}\right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.10.** Corriente del diodo del circuito equivalente ideal [8].

Donde:

$I_s$  es la corriente de saturación del diodo, es aproximadamente 10<sup>-10</sup> A [8].

$V$  es el voltaje de la celda fotovoltaica.

$V_t$  es el voltaje térmico [8].

$A$  es el factor de idealidad del diodo, al ser un modelo ideal el valor es uno [8].

La ecuación completa de la corriente, para un circuito equivalente ideal de una celda fotovoltaica está dada por la siguiente expresión:

$$I = I_{sc} * \frac{G}{1000} - I_s \left( \exp\left(\frac{V}{AV_t}\right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.11.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente ideal para una celda fotovoltaica [8].

Ecuación de la corriente para un panel fotovoltaico [47]:

$$I = N_p * I_{sc} * \frac{G}{1000} - N_p * I_s \left( \exp\left(\frac{V}{N_s * AV_t}\right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.12** Corriente de salida expandida del circuito equivalente ideal para un panel fotovoltaico [8].

Donde:

$N_p$  es el número de celdas en paralelo.

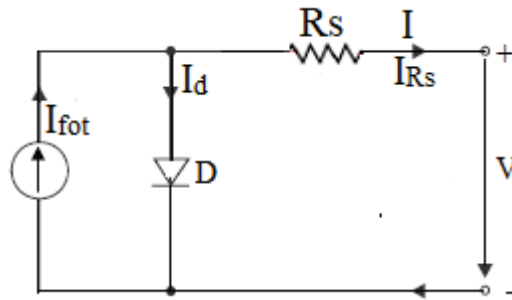
$N_s$  es el número de celdas en serie.

### **Cálculo de los parámetros desconocido del circuito equivalente ideal**

Al ser un modelo simple los parámetros  $I_{sc}$ ,  $N_p$  y  $N_s$  los proporcionan los fabricantes de los paneles fotovoltaicos. La corriente de saturación ( $I_s$ ) es aproximadamente de  $10^{-10}$  A; el factor de diodo ( $A$ ) es 1 en un diodo ideal y el voltaje térmico ( $V_t$ ) depende de la temperatura (25°C) y tiene un valor aproximado de 25,7 mV [8].

### 2.3.2 Circuito equivalente simple [48]

Este circuito equivalente consta de: un diodo, una fuente de corriente y una resistencia en serie ( $R_s$ ) que representa la resistencia interna del panel fotovoltaico [5], principalmente debido a las pérdidas de efectos Joule y la resistencia intrínseca de los semiconductores, así como a un contacto deficiente (electrodos) [49]. Este modelo es utilizado para simplificar los cálculos al momento de determinar los parámetros desconocidos, se aproxima mejor al comportamiento de las celdas fotovoltaicas reales.



**Figura 2.37.** Circuito equivalente simple de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

Al aplicar la ley de corrientes Kirchhoff en el circuito anterior, se obtiene la siguiente ecuación de la corriente de la celda fotovoltaica [8].

$$I = I_{fot} - I_d$$

**Ecuación 2.13.** Corriente de salida del circuito equivalente simple [8].

La fotocorriente ( $I_{fot}$ ) es directamente proporcional a la irradiancia solar y se describe con la siguiente expresión [4].

$$I_{fot} = I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}}$$

La corriente del diodo ( $I_d$ ) viene dada por la siguiente expresión [4].

$$I_d = I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.14.** Corriente del diodo del circuito equivalente simple [4].

Donde:

$I_s$  es la corriente de saturación.

$V$  es el voltaje de la celda fotovoltaica.

$A$  es el factor de idealidad del diodo.

$R_s$  es la resistencia en serie

$V_t$  es el voltaje térmico, que a su vez se expresa como [4]:

$$V_t = \frac{k T_c}{q}$$

**Ecuación 2.15.** Voltaje térmico [4].

Donde [5]:

$T_c$  es la temperatura de la celda, en “Grados Kelvin”

$k$  es la constante de Boltzmann's  $1,38 \times 10^{-23}$

$q$  es la carga del electrón  $1,6 \times 10^{-19}$

La corriente de saturación del diodo ( $I_s$ ) se expresa con la siguiente ecuación en STC [50].

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{A * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.16.** Corriente de saturación del diodo de la celda fotovoltaica [50].

Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito en STC de la celda fotovoltaica

$V_{oc}$  es el voltaje circuito abierto en STC de la celda fotovoltaica

La ecuación completa de la corriente, para el circuito equivalente apropiado está dada por la siguiente expresión:

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.17.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente simple para una celda fotovoltaica [50].

Ecuación de la corriente para un panel fotovoltaico [47]:

$$I = N_p * \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - N_p * I_s \left( \exp \left( \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{(I * R_s)}{N_p}}{A * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.18.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente simple para un panel fotovoltaico [47].

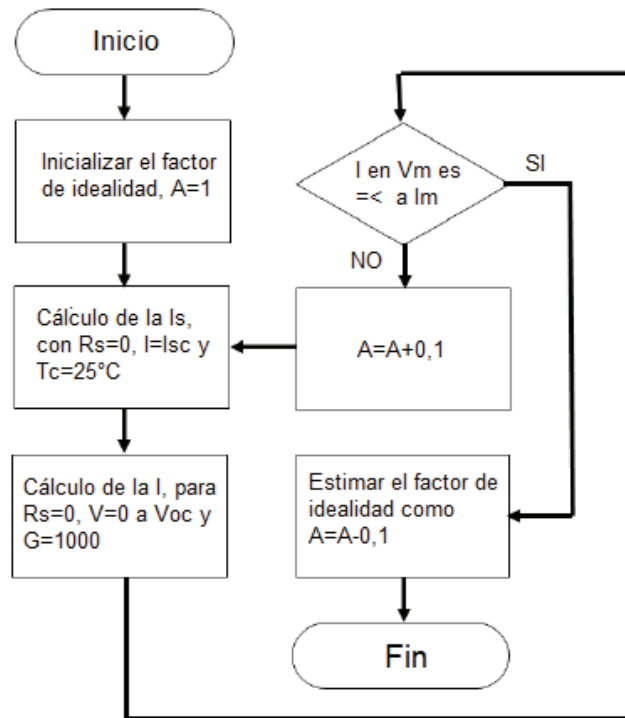
$$I_s = \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.19.** Corriente de saturación del diodo para un panel fotovoltaico [47].

### **Cálculo de los parámetros desconocidos (A, Rs) del circuito equivalente simple del panel fotovoltaico**

Para hacer un análisis de las curvas características de un panel fotovoltaico a partir de este circuito equivalente, es necesario conocer todos los parámetros; sin embargo, hay ciertos parámetros que los fabricantes no proporcionan, como: el factor de idealidad del diodo (A), y la resistencia en serie (Rs). Se ha propuesto que la Rs se calcule mediante aproximaciones [18], [51], mientras que el factor de idealidad del diodo (A), tiene un valor entre 1 y 2 [5], sin embargo, este valor dependerá del proceso de dopaje de los semiconductores y de la tecnología de las celdas fotovoltaicas [52].

En [5] se presenta una metodología basada en un proceso iterativo para la obtención del factor de idealidad (A), a continuación se presenta un diagrama de flujo:



**Figura 2.38.** Metodología para calcular el factor de idealidad (A) [5].

Una vez obtenido el factor de idealidad, se procede a calcular la resistencia en serie (Rs) con la siguiente expresión [5].

$$R_S = \frac{V_t}{I_m} * \ln \left( \frac{I_{sc} - I_m}{I_s} + 1 \right) - \frac{V_m}{I_m}$$

**Ecuación 2.20.** Resistencia en serie [5].

Donde:

$I_m$  es la corriente a potencia máxima en STC de la celda fotovoltaica.

$V_m$  es el voltaje a potencia máxima en STC de la celda fotovoltaica.

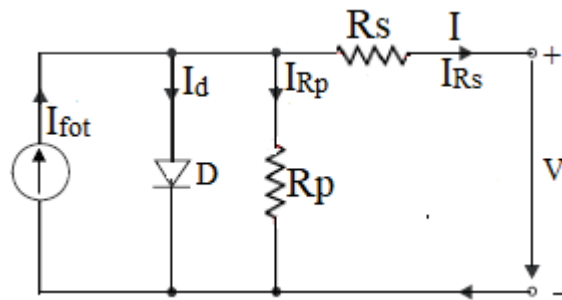
.



### 2.3.3 Circuito equivalente expandido – modelo de un diodo [8]

Conocido también como “modelo general” [48], o “modelo estándar” [46], este modelo tiene una buena calidad de aproximación a los paneles reales [46]. Para conocer el comportamiento general de un panel fotovoltaico es suficiente con el “modelo ideal” sin embargo para análisis más profundos de los paneles fotovoltaicos y simular el comportamiento real de un panel fotovoltaico es necesario tener un circuito equivalente más sofisticado, con este fin, se considera una resistencia en paralelo a la fuente de corriente, que representa la corriente de fuga a lo largo del borde de la celda fotovoltaica [8].

Este circuito equivalente es el más utilizado en la literatura técnica, para estudios y análisis de los paneles fotovoltaicos debido a que se aproxima a las características de un panel fotovoltaico real.



**Figura 2.39.** Circuito equivalente expandido - modelo de un diodo de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 2.39, aparece un nuevo elemento, por lo que, al aplicar ley de corrientes Kirchhoff en el circuito anterior, se obtiene la siguiente ecuación de la corriente de la celda fotovoltaica [8].

$$I = I_{fot} - I_d - I_{Rp}$$

**Ecuación 2.21.** Corriente de salida del circuito equivalente expandido-modelo de un diodo [8].

Donde:

$I_{Rp}$  es la corriente que fluye por la resistencia en paralelo.

La  $I_{Rp}$  se expresa con la siguiente ecuación [4]:

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_s}{Rp}$$

**Ecuación 2.22.** Corriente que fluye por la resistencia en paralelo [4].

Donde:

$R_s$  es la resistencia en serie

$V$  es el voltaje de la celda fotovoltaica.

$I$  es la corriente de la celda fotovoltaica

$R_p$  es la resistencia en paralelo

La ecuación completa de la corriente, para un circuito equivalente expandido - modelo de un diodo de una celda fotovoltaica está dada por la siguiente expresión:

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{Rp}$$

**Ecuación 2.23.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente expandido-modelo de un diodo para una celda fotovoltaica [50].

Ecuación de la corriente para un panel fotovoltaico [47]:

$$I = N_p * \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - N_p * I_s \left( \exp \left( \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{(I * R_s)}{N_p}}{A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{N_p}{N_s} V + IR_s}{Rp}$$

**Ecuación 2.24.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente expandido-modelo de un diodo para un panel fotovoltaico [50].

## **Cálculo de los parámetros desconocidos (A, Is, Rs y Rp) del circuito equivalente del panel fotovoltaico**

Como en el caso anterior, estos parámetros se suelen aproximar para facilidad de cálculos. Sin embargo, para una aproximación más real al comportamiento del panel fotovoltaico en condiciones estándar, estos parámetros desconocidos deben ser calculados.

Existen varias metodologías para obtener estos parámetros, a continuación se presentará una solución basada en el método de iteraciones recursivas “Newton Raphson” [53], [54], [55]; el siguiente método fue implementado en Matlab para obtener los parámetros en STC de un panel fotovoltaico en base a mediciones de voltaje (V), corriente (I) y temperatura (T).

### **Newton Raphson**

En [53] se presenta una introducción sobre el método de Newton Raphson, que es un método iterativo para estimar una función dada  $f(x)$  con valores de referencia inicial.

Este método se obtiene a través de la expansión series de Taylor en  $(x-x_0)$  dado por la siguiente expresión.

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} f''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots = 0$$

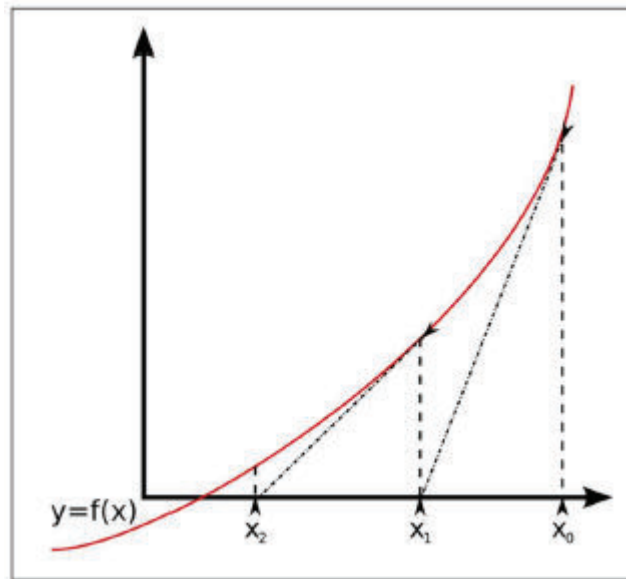
**Ecuación 2.25.** Expansión series de Taylor [53].

Si la conjetura inicial es muy cercana a la raíz real de la ecuación. Entonces  $(x-x_0)$  es lo suficientemente pequeño y los primeros términos son importantes para estimar el valor de la raíz, dado  $x_0$ . Al truncar la serie en el segundo término se obtiene la fórmula general del método de Newton Raphson.

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

De forma general, dado  $x_n$ , el punto  $x_{(n+1)}$  se obtendrá al intersecar la línea tangente en  $f(x)$  en  $x_n$  con el eje  $x$ . Se puede representar esto matemáticamente, de acuerdo con la ecuación anterior y gráficamente, de acuerdo con la figura 2.40.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$



**Figura 2.40.** Ilustración del método Newton Raphson [53].

La convergencia del método de Newton Raphson está garantizada para un cierto intervalo  $[a, b]$  que contiene la raíz de  $f(x)$ , siempre que  $f(x)$  y  $f'(x)$  sean continuas en este intervalo y que  $f(\alpha) = 0$ , donde  $\alpha$  es la raíz de  $f(x)$ .

### **Newton Raphson aplicado a la solución del modelo matemático del panel solar**

#### **Procedimiento.-**

Se obtienen cinco funciones que se derivaran de la ecuación de corriente del panel fotovoltaico que representan determinadas condiciones de la curva característica I-V, para formar el sistema [54]:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \\ f_4(x_k) \\ f_5(x_k) \end{bmatrix}$$

**Ecuación 2.26.** Matriz de funciones [53].

Una vez obtenido las funciones se procede al cálculo del Jacobiano.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{bmatrix}$$

**Ecuación 2.27.** Jacobiano de la matriz de funciones [53].

La matriz “x” contiene la solución del sistema:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{for}} \\ I_s \\ A \\ R_s \\ R_p \end{bmatrix}.$$

**Ecuación 2.28.** Matriz de la solución del sistema [53].

Donde:

$I_{\text{for}}$  es la corriente fotovoltaica

$I_s$  es la corriente inversa de saturación del diodo

$A$  es el factor de idealidad del diodo

$R_s$  es la resistencia en serie del panel fotovoltaico

$R_p$  es la resistencia en paralelo del panel fotovoltaico

Dadas las matrices, es posible establecer el sistema para la resolución.

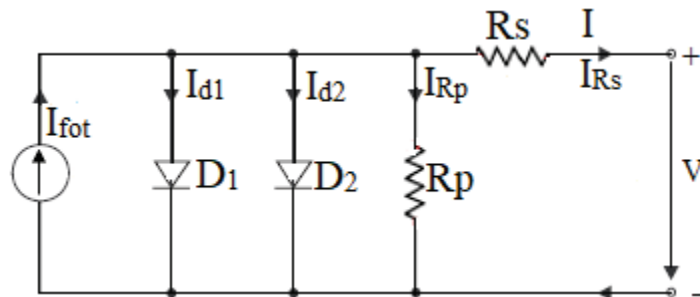
$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \\ x_{3,k+1} \\ x_{4,k+1} \\ x_{5,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ x_{3,k} \\ x_{4,k} \\ x_{5,k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \\ f_4(x_k) \\ f_5(x_k) \end{bmatrix}$$

**Ecuación 2.29.** Sistema de solución del método Newton Raphson [53].

### 2.3.4 Circuito equivalente expandido – modelo de dos diodos [8]

El circuito equivalente de dos diodos describe de mejor manera el comportamiento y funcionamiento de una celda fotovoltaica. Se adiciona un segundo diodo paralelo al primero, cada diodo tiene un factor de idealidad y una corriente de saturación diferente. El modelo de dos diodos representa las pérdidas de recombinación que se producen en la unión de la celda fotovoltaica [8].

Sin embargo, este modelo presenta sus limitaciones, para celdas fotovoltaicas de silicio cristalino, este modelo proporciona una descripción casi óptima. Sin embargo, es solo de uso limitado para celdas fotovoltaicas de película delgada. Las desviaciones son especialmente grandes bajo cargas parciales [8].



**Figura 2.41.** Circuito equivalente expandido - modelo de dos diodos de la celda fotovoltaica. Elaboración propia.

Al aplicar ley de corrientes Kirchhoff en el circuito anterior, se obtiene la siguiente ecuación de la corriente de la celda fotovoltaica [8].

$$I = I_{fot} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rp}$$

**Ecuación 2.30.** Corriente de salida del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos [8].

Donde:

$I$  es la corriente de salida de la celda fotovoltaica.

$I_{d1}$  es la corriente que fluye por el diodo D1

$I_{d2}$  es la corriente que fluye por el diodo D2

$I_{fot}$  es la fotocorriente generada por la celda fotovoltaica.

$I_{Rp}$  es la corriente que fluye por la resistencia en paralelo.

Las corrientes de los diodos ( $I_{d1}$ ) y ( $I_{d2}$ ) vienen dadas por las siguientes expresiones respectivamente [55]:

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A1 * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.31.** Corriente del diodo 1 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos [55].

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A2 * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.32.** Corriente del diodo 2 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos [55].

Donde:

$I_{s1}$  es la corriente de saturación del diodo D1.

$I_{s2}$  es la corriente de saturación del diodo D2.

$V$  es el voltaje de la celda fotovoltaica.

$A1$  es el factor de idealidad del diodo.

$A_2$  es el factor de idealidad del diodo.

$R_s$  es la resistencia en serie

$V_t$  es el voltaje térmico.

La corriente de saturación del diodo ( $I_{s1}$ ) y ( $I_{s2}$ ) se expresan por las siguientes ecuaciones en STC [56].

$$I_{s1} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{A_1 * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.33.** Corriente de saturación del diodo 1 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos, para una celda fotovoltaica [55].

$$I_{s2} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{A_2 * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.34.** Corriente de saturación del diodo 2 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos, para una celda fotovoltaica [55].

Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito en STC de la celda fotovoltaica

$V_{oc}$  es el voltaje circuito abierto en STC de la celda fotovoltaica

La ecuación completa de la corriente, para un circuito equivalente de dos diodos de una celda fotovoltaica está dada por la siguiente expresión:

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A_1 * V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{A_2 * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p}$$

**Ecuación 2.35.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos para una celda fotovoltaica [55].



Ecuación de la corriente para un panel fotovoltaico [56].

$$I = Np * \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - Np * I_{s1} \left( \exp \left( \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{(I * R_s)}{Np}}{A1 * V_t} \right) - 1 \right) - Np * I_{s2} \left( \exp \left( \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{(I * R_s)}{Np}}{A2 * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{Np}{R_p} V + IR_s$$

**Ecuación 2.36.** Corriente de salida expandida del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos para un panel fotovoltaico [56]

$$I_{s1} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s * A1 * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.37.** Corriente de saturación del diodo 1 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos, para un panel fotovoltaico [56]

$$I_{s2} = \frac{1}{2} \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s * A2 * V_t} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.38.** Corriente de saturación del diodo 1 del circuito equivalente expandido-modelo de dos diodos, para un panel fotovoltaico [56]

### Cálculo de los parámetros desconocidos (A1, A2, Is1, Is2, Ifot, Rs y Rp)

Este circuito equivalente al tener un diodo adicional, se tiene dos parámetros desconocidos más. Se han propuesto diferentes metodologías para la obtención de los parámetros desconocidos para el modelo de 2 diodos [55], [57], [56], [58], [59], [60]; sin embargo, para la obtención de todos los parámetros, se necesitaría un número mayor de ecuaciones, lo que representa un mayor tiempo de ejecución para el cálculo de los parámetros. En las referencias antes mencionadas, asumen valores para determinadas variables, como por ejemplo en [56], asumen valores de los factores de idealidad (A1 y A2), o asumen que las corrientes de saturación ( $I_{s1}$  y  $I_{s2}$ ) de los diodos son iguales [60], esto con el fin de facilitar los cálculos, una vez reducido el número de parámetros, se resuelve el sistema de ecuaciones mediante métodos iterativos.

En la referencia [61], se presenta un método para el cálculo de los siete parámetros desconocidos sin la necesidad de asumir valores para los parámetros del modelo; se basa en tres puntos principales: circuito abierto, cortocircuito y potencia máxima. Este modelo emplea la ecuación básica del modelo de dos diodos y los datos proporcionado por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos para establecer los valores iniciales de las siete ecuaciones del sistema, para su posterior solución mediante el método de Newton Raphson.

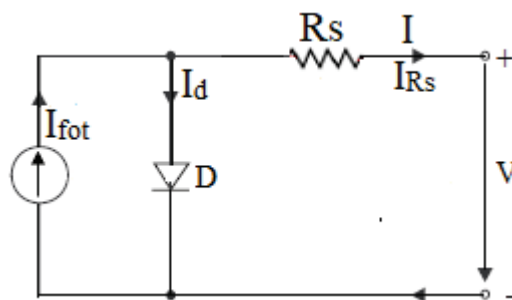
## 2.4. Modelos de estimación de irradiancia solar

A continuación, se describen los tres modelos para estimar la irradiancia solar basados en el modelo matemático y mediciones de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos.

### 2.4.1 Modelo 1

**“Estimación de irradiancia solar basada en la medición de la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico” [5]**

En [5] se presenta un modelo de estimación de irradiancia solar en  $W/m^2$ , el cual está basado en la medición de la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico. Este método de estimación de irradiancia solar se deriva del modelo matemático del panel fotovoltaico, obtenido del “circuito equivalente simple” (descrito en el punto 2.3.2); este modelo no toma en cuenta la variación de la temperatura.



**Figura 2.42.** Circuito equivalente simple del panel fotovoltaico. Elaboración propia.

Se parte de la ecuación 2.18 (descrito en el punto 2.3.2); siendo  $N_p=1$ , ya que los paneles fotovoltaicos con los que se trabaja no tienen celdas en paralelo:

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.39.** Corriente de salida del panel fotovoltaico (modelo equivalente simple) [5].

A partir de la ecuación anterior se deriva la siguiente expresión con la que estima la irradiancia solar en condiciones bajo carga.

$$G = \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{I_{sc}} * G_{STC}$$

**Ecuación 2.40.** Irradiancia solar en condiciones bajo carga [5].

Donde:

$I$  es la corriente medida bajo carga.

$V$  es el voltaje medido bajo carga.

- Teniendo como carga, una resistencia a la cual el panel fotovoltaico entrega su potencia máxima en condiciones estándar. La resistencia puede ser calculada dividiendo el voltaje a máxima potencia ( $V_m$ ) para la corriente a máxima potencia ( $I_m$ ).

$$G = \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{(I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{I_{sc}} * G_{STC}$$

**Ecuación 2.41.** Irradiancia solar en condiciones de cortocircuito [5].

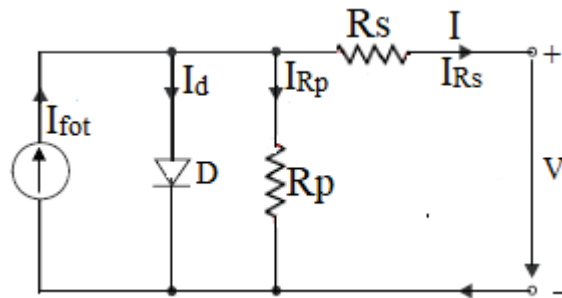
Donde:

$I$  es la corriente de cortocircuito medida.

## 2.4.2 Modelo 2

### “Prueba de concepto de un sistema de estimación de irradiancia para matrices fotovoltaicas reconfigurables” [4]

Este modelo está basado en el circuito equivalente expandido de un diodo, del panel fotovoltaico a partir del cual, se estima los valores de irradiancia solar, donde es necesario la medición de la temperatura, el voltaje y la corriente del panel fotovoltaico.



**Figura 2.43.** Circuito equivalente expandido - modelo de un diodo del panel fotovoltaico. Elaboración propia.

Se parte del circuito equivalente expandido - modelo de un diodo, descrito en el punto 2.3.3, para obtener la ecuación de la corriente del panel fotovoltaico, sin embargo, existe cierta diferencia ya que se toma en cuenta la temperatura por lo que a continuación se describe la metodología para obtener el modelo matemático del panel fotovoltaico.

La fotocorriente ( $I_{fot}$ ) es directamente proporcional a la irradiancia solar, la cual, a su vez depende de la temperatura y se expresa con la siguiente ecuación [4].

$$I_{fot} = \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{Isc}(T_C - T_{C\ STC})]$$

**Ecuación 2.42.** Corriente fotovoltaica en función de la temperatura [4].

Donde:

$G$  es la irradiancia solar.

$G_{STC}$  es la irradiancia solar en STC (1000 W/m<sup>2</sup>)

$\mu_{Isc}$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito

$T_C$  es la temperatura medida del panel fotovoltaico

$T_{C\ STC}$  es la temperatura del panel fotovoltaico en STC (298°K)

$I_{fot\ STC}$  es la fotocorriente generada por el panel fotovoltaico en STC

$$I_{fot\ STC} = I_{sc}$$

**Ecuación 2.43.** Corriente fotovoltaica en condiciones estándar [62].

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito en condiciones de prueba estándar (STC), dada por los fabricantes en el dato de placa.

La corriente de saturación del diodo ( $I_s$ ) dependiente de la temperatura, se expresa con la siguiente ecuación [4]:

$$I_s = I_{s\ STC} \left( \frac{T_c}{T_{C\ STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{A k} \left( \frac{1}{T_{C\ STC}} - \frac{1}{T_c} \right) \right]$$

**Ecuación 2.44.** La corriente de saturación del diodo ( $I_s$ ) dependiente de la temperatura [4].

Donde [5]:

$I_{s\ STC}$  es la corriente de saturación en STC

$E_g$  es la energía de la banda prohibida de separación

La corriente de saturación del diodo en STC ( $I_{s\ STC}$ ) se expresa con la siguiente ecuación [50].

$$I_{s\ STC} = \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s * A * V_{t\ STC}} \right) - 1 \right)}$$

**Ecuación 2.45.** La corriente de saturación del diodo en STC [50].

Donde:

$I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito en STC del panel fotovoltaico

$V_{oc}$  es el voltaje circuito abierto en STC del panel fotovoltaico

$V_{t\ STC}$  es el voltaje térmico en STC ( $T_c=298$  °K)

La energía de la banda de separación ( $E_g$ ) dependiente de la temperatura se expresa con la siguiente ecuación [4]:

$$E_g = 1,16 - 7,02 * 10^{-4} * \frac{T_c^2}{T_c + 1108}$$

**Ecuación 2.46.** Energía de la banda de separación [4].

La ecuación de la corriente, para un circuito equivalente dependiente de la temperatura del panel fotovoltaico está dada por la siguiente expresión [4]:

$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{IsC} (T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

**Ecuación 2.47.** Corriente de salida del panel fotovoltaico en función de la variación de la temperatura (circuito equivalente expandido-modelo de un diodo) [4].

A partir de la ecuación anterior se derivan las siguientes tres expresiones para estimar la irradiancia solar, basados en tres enfoques: i) bajo carga, ii) circuito abierto y iii) cortocircuito.

#### i. Bajo carga

A partir de la ecuación anterior (2.47) se obtiene el modelo de estimación de irradiancia solar en condiciones bajo carga [4]:

$$G = \frac{G_{STC}}{I_{fot\ STC} + \mu_{IsC} * (T_C - T_{C\ STC})} \left[ I + I_s * \left( \exp \left( \frac{V_m + (I_m * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) + \frac{V_m + I_m R_s}{R_p} \right]$$

**Ecuación 2.48.** Irradiancia solar bajo carga [4].

Donde:

$G$  es la irradiancia estimada

$V_m$  es el voltaje medido del panel fotovoltaico bajo carga.

$I_m$  es la corriente medida del panel fotovoltaico bajo carga.

Sin embargo, para simplificar de la ecuación anterior, se puede forzar el punto de trabajo del panel fotovoltaico bajo las siguientes condiciones.

## ii. Circuito abierto

$$G_{Voc} = G_{STC} * \exp\left(\frac{V_{oc\ m} - V_{oc} - \mu_{Voc} * (T_c - T_{c\ STC})}{N_s * A * V_t}\right)$$

**Ecuación 2.49.** Irradiancia solar en condiciones de circuito abierto [4].

Donde:

$G_{Voc}$  es la irradiancia estimada bajo condiciones de circuito abierto

$V_{oc\ m}$  es el voltaje medido del panel fotovoltaico en condiciones de circuito abierto

$\mu_{Voc}$  es el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto

## iii. Cortocircuito

Esta expresión parte de la ecuación 2.11:

$$G_{Isc} = \frac{G_{stc}}{I_{sc\ STC} + \mu_{Isc} * (T_c - T_{c\ stc})} * (I_{sc\ m})$$

**Ecuación 2.50.** Irradiancia solar en condiciones de corto circuito [4].

Donde:

$G_{Isc}$  es la irradiancia estimada bajo condiciones de cortocircuito

$I_{sc\ m}$  es la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico en condiciones de cortocircuito

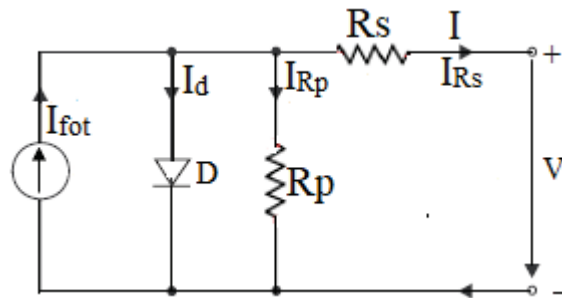
$\mu_{Isc}$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito

### 2.4.3 Modelo 3

**“Un procedimiento rápido y eficaz para determinar la irradiancia solar en matrices fotovoltaicas” [6]**

En [6], se demuestra que la estimación de la irradiancia solar se puede llevar a cabo, teniendo las mediciones de corriente, voltaje y temperatura del panel fotovoltaico disponibles. Este método está basado en condiciones bajo carga, similar al modelo anterior; sin embargo, se tiene diferentes expresiones para el cálculo de la corriente de saturación ( $I_s$ ), la energía de banda de separación ( $E_g$ ) y se toma en cuenta la variación de la resistencia en paralelo en función de la variación de la irradiancia solar.

Se trabaja con el circuito equivalente expandido - modelo de un diodo del panel fotovoltaico.



**Figura 2.44.** Circuito equivalente expandido - modelo de un diodo del panel fotovoltaico. Elaboración propia.

La corriente de saturación del diodo ( $I_s$ ) dependiente de la temperatura se expresa con la siguiente ecuación [6].

$$I_s = I_{s\ STC} * \left( \frac{T_c}{T_{c\ STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q}{A * K} * \left( \frac{E_{g\ STC}}{T_{c\ STC}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right]$$

**Ecuación 2.51.** Corriente de saturación del diodo dependiente de la temperatura [6].

Donde [5]:

$I_{s\ STC}$  es la corriente de saturación en STC

$E_g$  es la energía de la banda prohibida de separación

$E_{g\ STC}$  es la energía de la banda prohibida de separación en STC



La energía de la banda de separación ( $E_g$ ) dependiente de la temperatura se expresa con la siguiente ecuación [6].

$$E_g = 1,17 - 4.73 * 10^{-4} * \frac{T_C^2}{T_C + 636}$$

**Ecuación 2.52.** Energía de la banda de separación [6].

La energía de la banda de separación en STC ( $E_{g\ STC}$ ) en se expresa con la siguiente ecuación [6].

$$E_{g\ STC} = 1,17 - 4.73 * 10^{-4} * \frac{T_{C\ STC}^2}{T_{C\ STC} + 636}$$

**Ecuación 2.53.** Energía de la banda de separación en STC [6].

Donde:

$T_{C\ STC}$  es la temperatura del panel fotovoltaico en STC (298°K)

La resistencia en paralelo en función de la variación de la irradiancia solar se expresa con la siguiente ecuación:

$$R_p = R_{p\ STC} * \frac{G_{STC}}{G}$$

**Ecuación 2.54.** Resistencia en paralelo dependiente de la variación de la irradiancia [6].

Donde:

$R_{p\ STC}$  es la resistencia en paralelo en STC

La ecuación de la corriente, para un circuito equivalente dependiente de la temperatura del panel fotovoltaico está dada por la siguiente expresión:

$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{isc} (T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{p\ STC} * \frac{G_{STC}}{G}}$$

**Ecuación 2.55.** Corriente de salida del panel fotovoltaico en función de la variación de la temperatura (circuito equivalente expandido-modelo de un diodo) [6].

A partir de la ecuación anterior se deriva la expresión para estimar la irradiancia solar.

$$G = G_{STC} * \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{\left[ I_{fot\ STC} + \mu_{isc} (T_c - T_{c\ STC}) \right] - \frac{V + IR_s}{R_{p\ STC}}}$$

**Ecuación 2.56.** Irradiancia solar en condiciones bajo carga [6].

Donde:

$I, V$  y  $T_c$ , son la corriente, voltaje y temperatura respectivamente, variables medidas del panel fotovoltaico en condiciones bajo carga.

## CAPÍTULO III

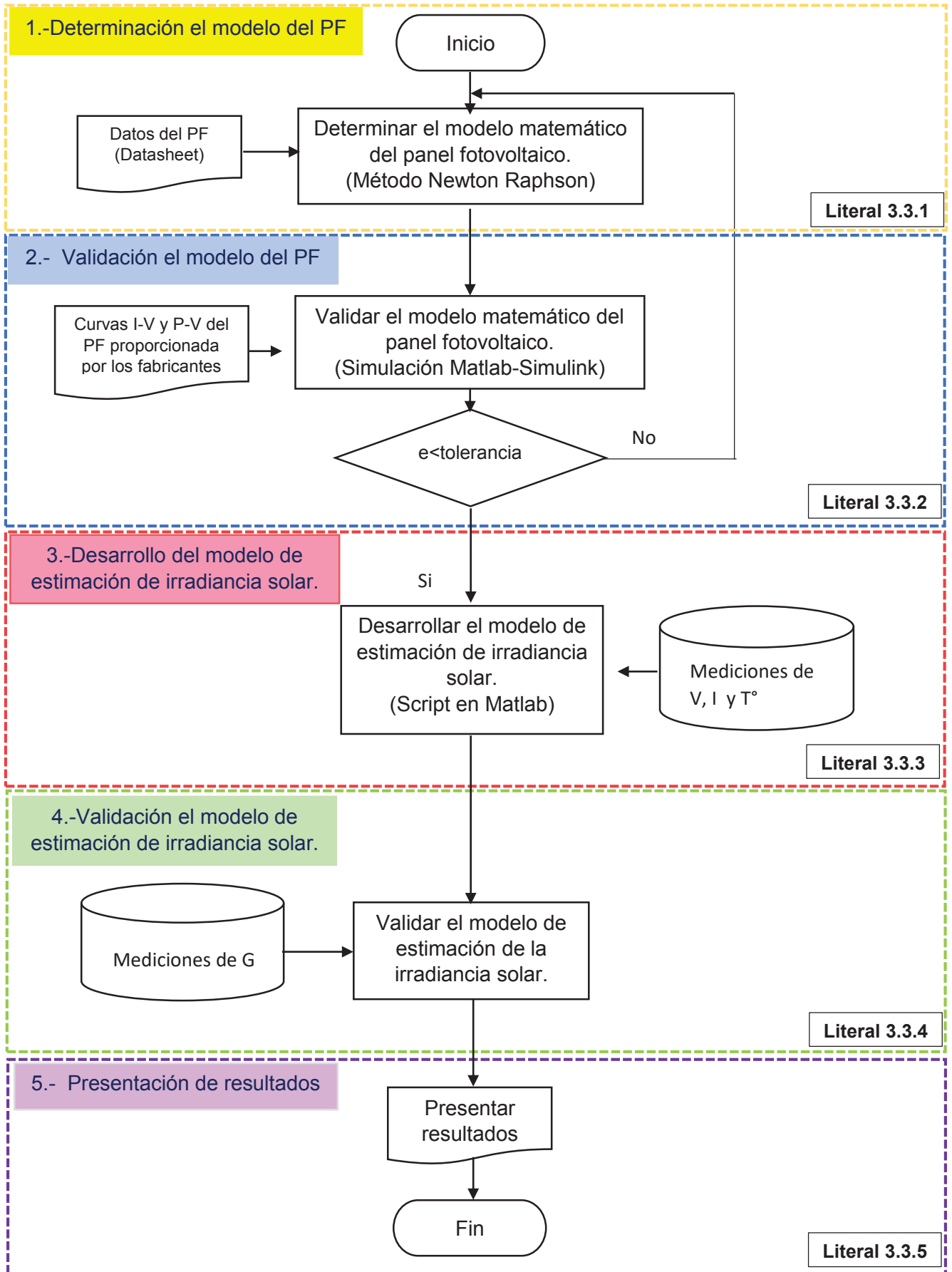
### 3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR BASADA EN MODELOS MATEMÁTICOS Y MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

#### 3.1. Introducción

En este capítulo se presenta la metodología a desarrollarse para la estimación de la irradiancia solar basada en modelos matemáticos y medición de variables eléctricas de paneles fotovoltaicos. Se describen las herramientas necesarias (hardware y software) para llevar a cabo cada etapa de la metodología:

- i) **Determinación del modelo matemático del panel fotovoltaico.-** Se parte del circuito equivalente que mejor simule el comportamiento del panel fotovoltaico y se determinan los parámetros desconocidos, usando el método iterativo “Newton Raphson”. Modelos presentados en la sección 2.3; para definir el circuito equivalente que mejor representa al panel fotovoltaico.
- ii) **Validación del modelo del panel fotovoltaico.-** Una vez calculados estos parámetros, se obtienen las curvas características del panel fotovoltaico (I-V y P-V) y se los compara con las curvas proporcionadas por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos. Para obtener las curvas I-V y P-V se implementa y simula cada modelo en Matlab-Simulink.
- iii) **Desarrollo del modelo de estimación de irradiancia solar.-** Se valoran los diferentes modelos para estimar la irradiancia solar, para lo cual se necesitan las mediciones de tres variables del panel fotovoltaico: temperatura, voltaje y la corriente.
- iv) **Validación del modelo de estimación de irradiancia solar.-** Una vez calculados los valores estimados de irradiancia solar mediante los modelos descritos anteriormente, se compararán con los valores reales de irradiancia solar medidos mediante un piranómetro.
- v) **Presentación de resultados.-** Se compararán los tres modelos de estimación de irradiancia solar y se determina el modelo que presente menor error.

## 3.2. Metodología propuesta – Diagrama de flujo



### 3.3. Descripción de cada etapa de la metodología propuesta

#### 3.3.1 Determinación del modelo matemático del panel fotovoltaico

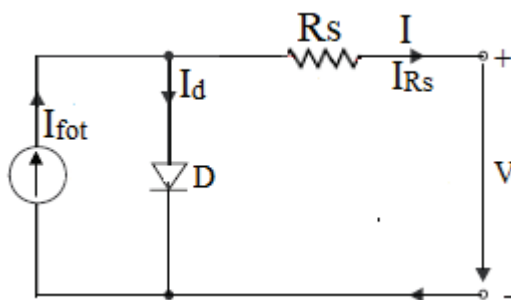
Para determinar el modelo matemático del panel fotovoltaico se debe partir del circuito equivalente del panel fotovoltaico que describa de mejor manera su comportamiento y posteriormente obtener la ecuación de la corriente de salida, a partir de la cual se puede graficar las curvas características del panel fotovoltaico, como las curvas I-V (corriente-voltaje) y P-V (potencia-voltaje).

##### 3.3.1.1 Circuito equivalente del panel fotovoltaico

Los circuitos equivalentes que se presentan a continuación, están basados en las referencias investigadas para la estimación de la irradiancia solar [5], [4] y [6]. Sin embargo, para obtener las ecuaciones de las corrientes de salida de los paneles fotovoltaicos, estos modelos están descritos en condiciones estándar de prueba (STC) y sin tomar en cuenta la variación de la temperatura. Para aplicar el método iterativo de solución “Newton Raphson”

- **Modelo 1**

El modelo 1 parte del “circuito equivalente simple” (descrito en el numeral 2.3.2), el cual consta de la fuente de corriente, un diodo en paralelo y una resistencia en serie.



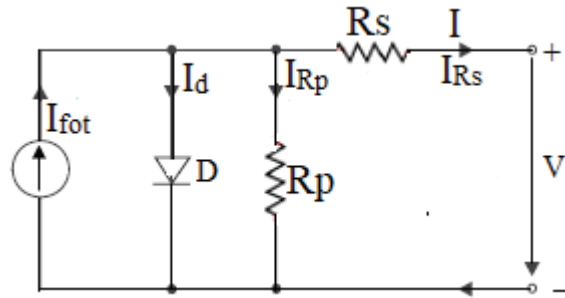
**Figura 3.1.** Circuito equivalente simple. Elaboración propia.

Una vez seleccionado el circuito equivalente se obtiene la ecuación de la corriente de salida, descrita en el numeral 2.4.1 (ecuación 2.39).

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)$$

- **Modelo 2**

El modelo 2, parte del circuito equivalente expandido-modelo de un diodo (descrito en el numeral 2.3.3), el cual consta de una fuente de corriente, un diodo en paralelo, una resistencia en serie y adicionalmente una resistencia en paralelo. Como se observa en la siguiente figura.



**Figura 3.2.** Circuito equivalente expandido – modelo de un diodo. Elaboración propia.

Para obtener la ecuación de la corriente de salida, se parte de la ecuación 2.24 (descrito en el punto 2.3.3); siendo  $N_p=1$ , ya que los paneles fotovoltaicos con los que se trabaja no tienen celdas en paralelo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

**Ecuación 3.1.** Corriente de salida del circuito equivalente-modelo de un diodo del panel fotovoltaico en STC [57].

- **Modelo 3**

El modelo 3 parte del mismo circuito equivalente que del modelo 2 y se obtiene la misma ecuación de la corriente de salida del panel fotovoltaico (ecuación 3.1). Se presenta esta similitud ya que al aplicar “Newton Raphson”, las ecuaciones deben estar en condiciones estándar (STC). La diferencia entre el modelo 2 y 3, es cuando se toma en la variación de la temperatura y la variación de la irradiancia solar.

### 3.3.1.2 Cálculo de los parámetros desconocidos

Con las ecuaciones de las corrientes de salida de los circuitos equivalentes anteriores no es posible graficar las curvas características debido a que dichas ecuaciones están en función de parámetros desconocidos como, el factor de idealidad del diodo ( $A$ ), la resistencia en serie ( $R_s$ ) y la resistencia en paralelo ( $R_p$ ); que no son proporcionados por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos, las demás variables se las obtiene de las hojas de datos (Anexo I) o pueden ser calculadas con las expresiones descritas anteriormente.

Los parámetros desconocidos serán obtenidos en condiciones estándar de prueba (STC), utilizando el método iterativo Newton Raphson descrito en el numeral 2.3.3.

Para aplicar el método de Newton Raphson, se parte de la ecuación de la corriente de salida del panel fotovoltaico (ecuación 3.1); de la cual se derivan 5 funciones:

#### Desarrollo de las cinco funciones:

Se debe obtener 5 funciones, que formarán el sistema de ecuaciones para la resolución por medio del método iterativo “Newton Raphson”.

$f(1)$ : Ecuación de corriente del PF en circuito abierto (OC-Open Circuit) [54].

$$0 = I_{fot} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{A * N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p}$$

**Ecuación 3.2.** Corriente del panel fotovoltaico en circuito abierto [54].

$f(2)$ : Ecuación de corriente del PF en corto circuito (SC-Short Circuit) [54].

$$I_{sc} = I_{fot} - I_s \left[ \exp \left( \frac{I_{sc} * R_s}{A * N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} * R_s}{R_p}$$

**Ecuación 3.3.** Corriente del panel fotovoltaico en corto circuito [54].

$f(3)$ : Ecuación de corriente del PF en potencia máxima (MPP- Maximum Power Point) [54].

$$I_m = I_{fot} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_m + (I_m * R_s)}{A * N_s * V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + (I_m * R_s)}{R_p}$$

**Ecuación 3.4.** Corriente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia [54].

Para obtener las dos ecuaciones restantes se emplea la ecuación de la corriente derivada con respecto al voltaje (V) [57]:

$$\frac{dI}{dV} = -I_s * \left[ \frac{1}{N_s * V_t} \left( 1 + \frac{dI}{dV} * R_s \right) \exp\left(\frac{V + I * R_s}{A * N_s * V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_p} \left( 1 + \frac{dI}{dV} * R_s \right)$$

**Ecuación 3.5.** Derivada de la corriente respecto al voltaje [57].

$f(4)$ : Además, la derivada  $\frac{dP}{dV} = 0$  en el MPP es usada para desarrollar la cuarta ecuación.

La potencia transferida en cualquier punto viene dada por:

$$P = I * V$$

Se puede derivar una ecuación utilizando el hecho, que en un sistema fotovoltaico en el punto de máxima potencia, la derivada de potencia con voltaje es cero [57]:

$$\left( \frac{dP}{dV} \right)_{I=I_m}^{V=V_m} = \frac{d(I * V)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} * V = 0$$

**Ecuación 3.6.** Derivada de la potencia respecto al voltaje [57].

Donde se obtiene:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_m}{V_m}$$

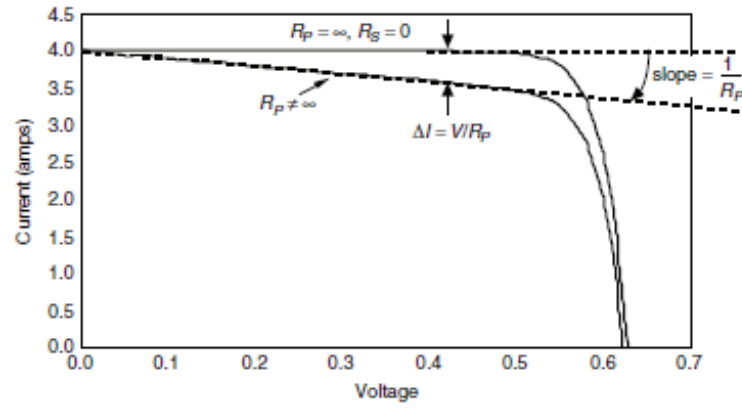
Al reemplazar el anterior término en la función de la derivada de la corriente se obtiene la cuarta función [57]:

$$-\frac{I_m}{V_m} = -I_s * \left[ \frac{1}{N_s * V_t} \left( 1 - \frac{I_m}{V_m} * R_s \right) \exp\left(\frac{V_m + I_m * R_s}{A * N_s * V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_p} \left( 1 - \frac{I_m}{V_m} * R_s \right)$$

**Ecuación 3.7.** Derivada de la potencia en el punto de máxima potencia [57].



$f(5)$ : Finalmente, el recíproco de la pendiente de la curva I-V, en el punto de cortocircuito, se utiliza para desarrollar la quinta ecuación [57]:



**Figura 3.3.** La modificación del circuito equivalente de PV idealizado al agregar resistencia paralela hace que la corriente en cualquier voltaje dado caiga en  $\Delta V / R_p$  [18].

$$\frac{dI}{dV|_{I_{sc}}} = -\frac{1}{R_p}$$

$$-\frac{1}{R_p} = -I_s * \left[ \frac{1}{N_s * V_t} \left( 1 - \frac{1}{R_p} * R_s \right) \exp \left( \frac{I_{sc} * R_s}{A * N_s * V_t} \right) \right] - \frac{1}{R_p} \left( 1 - \frac{1}{R_p} * R_s \right)$$

**Ecuación 3.8.** Recíproco de la pendiente de la curva I-V en el punto de corto circuito [57].

Funciones finales igualadas a cero:

$$f(1) = I_{fot} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{A * N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} = 0$$

$$f(2) = I_{fot} - I_s \left[ \exp \left( \frac{I_{sc} * R_s}{A * N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} * R_s}{R_p} - I_{sc} = 0$$

$$f(3) = I_{fot} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_m + (I_m * R_s)}{A * N_s * V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_m + (I_m * R_s)}{R_p} - I_m = 0$$

$$f(4) = \frac{I_m}{V_m} - I_s * \left[ \frac{1}{N_s * V_t} \left( 1 - \frac{I_m}{V_m} * R_s \right) \exp \left( \frac{V_m + I_m * R_s}{A * N_s * V_t} \right) \right] - \frac{1}{R_p} \left( 1 - \frac{I_m}{V_m} * R_s \right) = 0$$

$$f(5) = \frac{1}{R_p} - I_s * \left[ \frac{1}{N_s * V_t} * \left( 1 - \frac{1}{R_p} * R_s \right) * \exp \left( \frac{I_{sc} * R_s}{A * N_s * V_t} \right) \right] - \left( \frac{1}{R_p} \right) * \left( 1 - \frac{1}{R_p} R_s \right) = 0$$

Al aplicar el método de Newton Raphson al sistema de ecuaciones obtenida anteriormente se tendrá como resultado un vector con las siguientes variables: factor de idealidad del diodo ( $A$ ), la resistencia en serie ( $R_s$ ) y la resistencia en paralelo ( $R_p$ ), la corriente fotovoltaica ( $I_{fot}$ ) y la corriente de saturación de diodo ( $I_s$ ); sin embargo, estas dos últimas variables también pueden ser calculadas mediante expresiones ya descritas.

Para la resolución del sistema de ecuaciones mediante Newton Raphson, se ha utilizado el software de simulación “Matlab R2017a” para escribir el código de programación. Matlab es un software de programación usado en ingeniería, el cual se basa en un lenguaje de alto nivel y un entorno para el cálculo técnico, incluye funciones para desarrollar algoritmos, cálculo numérico, análisis de datos y visualización de resultados [63].

El código de programación del método Newton Raphson fue realizado en un script, el cual tiene variables de entrada como: el voltaje de máxima potencia ( $V_m$ ), corriente de máxima potencia ( $I_m$ ), voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), constantes ( $k, q, N_s$ ), la temperatura ( $T$ ) y la irradiancia ( $G$ ) que son valores proporcionados en las hojas de datos de los paneles fotovoltaicos. El código de programación se encuentra detallado en el [Anexo II]

### 3.3.2 Validación del modelo matemático del panel fotovoltaico

Es importante validar los resultados obtenidos en el numeral 2.3.1, para lo cual, es necesario graficar las curvas características del panel fotovoltaico (curvas I-V y P-V) y compararlas con las proporcionadas por los fabricantes. En algunos casos estas curvas no son proporcionadas, pero sí proporcionan los puntos por donde pasan las curvas características, por ejemplo: para la curva I-V se proporciona el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), el voltaje ( $V_m$ ), y la corriente ( $I_m$ ) a potencia máxima, y para la curva P-V proporcionan el valor de la potencia máxima ( $P_{max}$ ) del panel fotovoltaico en condiciones estándar (STC).

Se utiliza Matlab-Simulink para simular los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos, descritos en el punto 2.4; para lo cual, se simulan diagramas de bloques para entender el comportamiento del sistema por medio de una representación gráfica, en donde se tendrán señales de entrada como: el voltaje, la irradiancia y la temperatura y como señal de salida la corriente.

Simulink, es un entorno basado en diagramas de bloques, utilizado para el diseño de modelos y la simulación de sistemas. Simulink simula y analiza una variedad de sistemas que incluyen señales, controles, procesamiento de imágenes, sistemas físicos multi dominio y comunicaciones [63].

- **Modelos a simularse:**

Se simularán los modelos descritos en el numeral 2.4, sin embargo, se tomará en cuenta la variación de la temperatura para los modelos 2 y 3, cómo se describe en [4] y [6].

### 1. Modelo 1

Se tiene la ecuación de la corriente de salida del circuito equivalente simple (Ecuación 2.39):

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)$$

### 2. Modelo 2

Para el modelo 2 se tiene la ecuación 2.47.

$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{Isc}(T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

### 3. Modelo 3

Para el modelo 3 se tiene la ecuación 2.55.

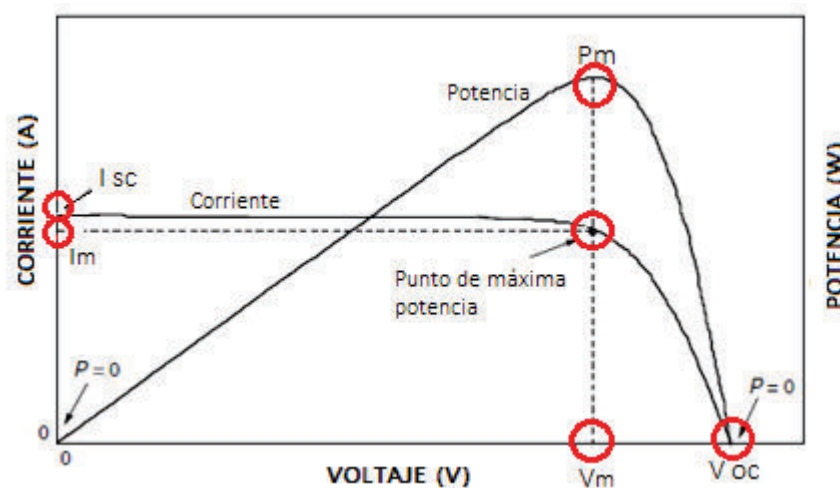
$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{Isc}(T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{p\ STC} * \frac{G_{STC}}{G}}$$

Al simular los modelos 2 y 3, son iguales cuando se trabaja en condiciones estándar de prueba. Para validar los resultados todo el análisis se hace en STC, ya que en estas condiciones el fabricante de paneles proporciona los datos de placa.

En el Anexo III, se presenta las simulaciones de los tres modelos presentados anteriormente.

Una vez obtenidas las curvas características de corriente y de potencia en función del voltaje de los diferentes paneles fotovoltaicos, se procede a analizar si estas curvas cruzan por los puntos dados por los fabricantes, o cuan alejados están de dichos puntos, para validar los resultados obtenidos.

Se analizan los puntos mencionados, debido a que para el caso de los cuatro paneles utilizados, el fabricante no proporciona las gráficas de las curvas características, sino solo los valores de voltaje, corriente y potencia.



**Figura 3.4.** Puntos de análisis de las curvas características. Elaboración propia.

### 3.3.3 Desarrollo de los modelos de estimación de irradiancia solar

Una vez validados los modelos matemáticos del panel fotovoltaico, se obtienen los modelos de estimación de irradiancia solar, estos modelos fueron descritos detalladamente en el numeral 2.4.

A continuación se presentan de manera resumida las expresiones para estimar la irradiancia solar de los 3 modelos, los cuales, se escribirán en un script de Matlab para su análisis:

## Modelo 1

Se presenta la ecuación 2.40; para estimar la irradiancia solar en condiciones bajo carga,

$$G = \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{I_{sc}} * G_{STC}$$

Donde:

$G$  es la irradiancia solar estimada bajo carga

$I$  es la corriente medida bajo carga

$V$  es el voltaje medido bajo carga

En condiciones de cortocircuito, el voltaje medido será cero ( $V = 0$ ), ecuación 2.41.

$$G = \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{(I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{I_{sc}} * G_{STC}$$

Donde:

$G$  es la irradiancia solar estimada en condiciones de corto circuito

$I$  es la corriente de cortocircuito medido del panel solar en condiciones de cortocircuito.

## Modelo 2

Se parte de la ecuación 2.47; para determinar la expresión que permita estimar la irradiancia solar, en [4] se estima la irradiancia solar bajo tres condiciones del panel fotovoltaico: bajo carga, circuito abierto y cortocircuito

### i. Bajo carga

La ecuación 2.48; permite estimar la irradiancia solar en condiciones bajo carga.

$$G = \frac{G_{STC}}{I_{fot\ STC} + \mu_{Isc} * (T_c - T_{c\ STC})} \left[ I + I_s * \left( \exp \left( \frac{V_{me} + (I_{me} * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) + \frac{V_{me} + I_{me} R_s}{R_p} \right]$$

Donde:

$G$  es la irradiancia solar estimada

$V_{me}$  es el voltaje medido del panel fotovoltaico bajo carga.

$I_{me}$  es la corriente medida del panel fotovoltaico bajo carga.

Sin embargo, para simplificar de la ecuación anterior, se puede forzar el punto de trabajo del panel fotovoltaico bajo las siguientes condiciones.

## ii. Circuito abierto

La ecuación 2.49; permite estimar la irradiancia solar en condiciones de circuito abierto.

$$G_{Voc} = G_{STC} * \exp \left( \frac{V_{oc\ m} - V_{oc} - \mu_{Voc} * (T_c - T_{c\ STC})}{N_s * A * V_t} \right)$$

Donde:

$G_{Voc}$  es la irradiancia solar estimada bajo condiciones de circuito abierto

$V_{oc\ m}$  es el voltaje medido del panel fotovoltaico en condiciones de circuito abierto

$\mu_{Voc}$  es el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto

## iii. Cortocircuito

La ecuación 2.50; permite estimar la irradiancia solar en condiciones de cortocircuito.

$$G_{Isc} = \frac{G_{stc}}{I_{scSTC} + \mu_{Isc} * (T_c - T_{c\ stc})} * (I_{sc\ m})$$

Donde:

$G_{Isc}$  es la irradiancia estimada bajo condiciones de cortocircuito

$I_{scm}$  es la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico en condiciones de cortocircuito

$\mu_{Isc}$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito

### Modelo 3

Finalmente el modelo 3, presenta la expresión para estimar la irradiancia solar a partir de la ecuación 2.55 (ecuación de la corriente) [6]; teniendo como resultado la siguiente expresión (ecuación 2.56):

$$G = G_{STC} * \frac{I + I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}{\left[ I_{fot STC} + \mu_{Isc} (T_C - T_{C STC}) \right] - \frac{V + IR_s}{R_{p STC}}}$$

Donde:

$G$  es la irradiancia estimada bajo condiciones de carga

$V$  es el voltaje medido del panel fotovoltaico en condiciones de carga

$I$  es la corriente medida del panel fotovoltaico en condiciones de carga

$\mu_{Isc}$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito

El coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito ( $\mu_{Isc}$ ) y el coeficiente de temperatura del voltaje de circuito abierto ( $\mu_{Voc}$ ), son proporcionadas en las hojas de datos de los paneles fotovoltaicos.

Los modelos de estimación de irradiancia solar descritos anteriormente están en función de tres variables: el voltaje, la corriente y la temperatura, bajo determinadas condiciones de conexión del panel fotovoltaico. Por esta razón, es necesario un instrumento capaz de medir estas variables y almacenarlas en una base de datos, para posteriormente ser tratadas y obtener los valores estimados de irradiancia solar.

Para la medición y almacenamiento de estas variables se diseñó e implementó un circuito electrónico basado en un microprocesador (Arduino Uno) que mida y almacene los valores de temperatura, voltaje y corriente en una base de datos de Excel, a su vez será capaz de cambiar el estado de conexión del panel fotovoltaico. El diseño y las características de funcionamiento del circuito electrónico se describirá más adelante en el numeral 3.4.

### 3.3.4 Validación del modelo de estimación de irradiancia solar

Para validar los modelos descritos se compararán los valores de irradiancia solar estimada con las mediciones de irradiancia solar obtenidos mediante un piranómetro, que es un instrumento de medida de irradiancia global.

- **Características del piranómetro utilizado**

El piranómetro, es de marca “LSI LASTEM”, clase 1, utilizado en estaciones meteorológicas, el cual tiene un rango de medida de 0 a 1500 W/m<sup>2</sup> [64], [65], el cual consta con su propio software para la lectura de la irradiancia solar “3DOM Datalogger Oriented Manager”.

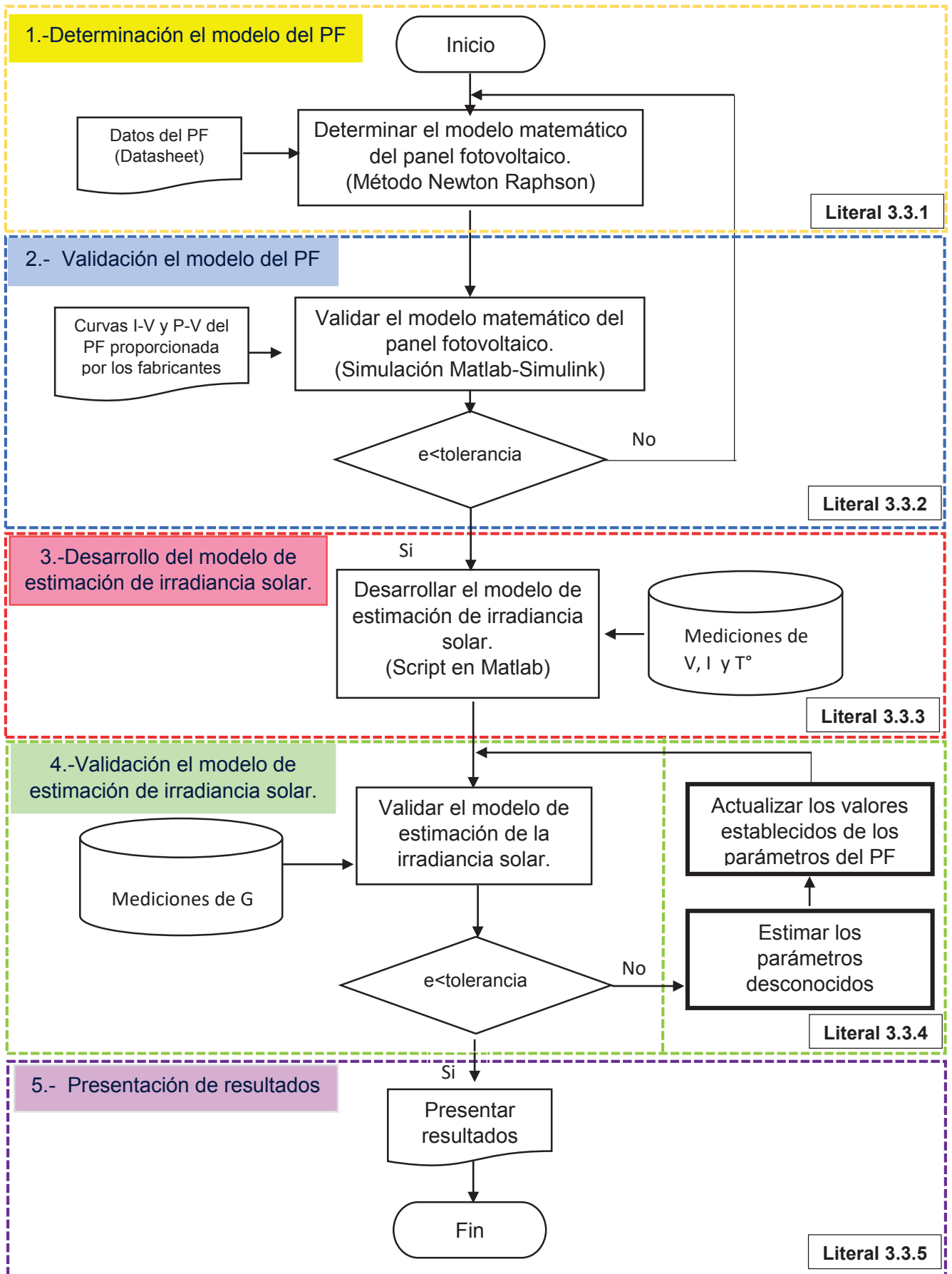
Al trabajar con paneles fotovoltaicos con varios años de vida útil, los valores de voltaje y corriente del PF medidos no serán los esperados debido a la degradación y operación en condiciones no estándar; por esta razón, existirá errores significativos al comparar los valores de irradiancia solar medida y estimada, ya que para el análisis de los modelos del panel fotovoltaico se consideró condiciones estándar, lo que representa un comportamiento ideal.

Una solución que se propone en este proyecto es estimar los parámetros desconocidos (factor de idealidad del diodo ( $A$ ), resistencia en serie ( $R_s$ ), resistencia en paralelo ( $R_p$ ), corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ )) del panel fotovoltaico en las condiciones actuales de operación mediante el uso de la herramienta “Estimador de parámetros” que proporciona Matlab-Simulink, para aproximar los valores estimados de irradiancia solar a los medidos, adicionando una etapa a la metodología propuesta anteriormente.

Esto proporcionará una base para estimar la degradación de los paneles fotovoltaicos, ya que al estimar estos parámetros, se puede graficar las curvas características de I-V y P-V utilizando mediciones reales de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia, lo cual, proporciona información de cuanta potencia el panel fotovoltaico puede entregar en condiciones reales de operación.



### 3.3.4.1 Metodología propuesta



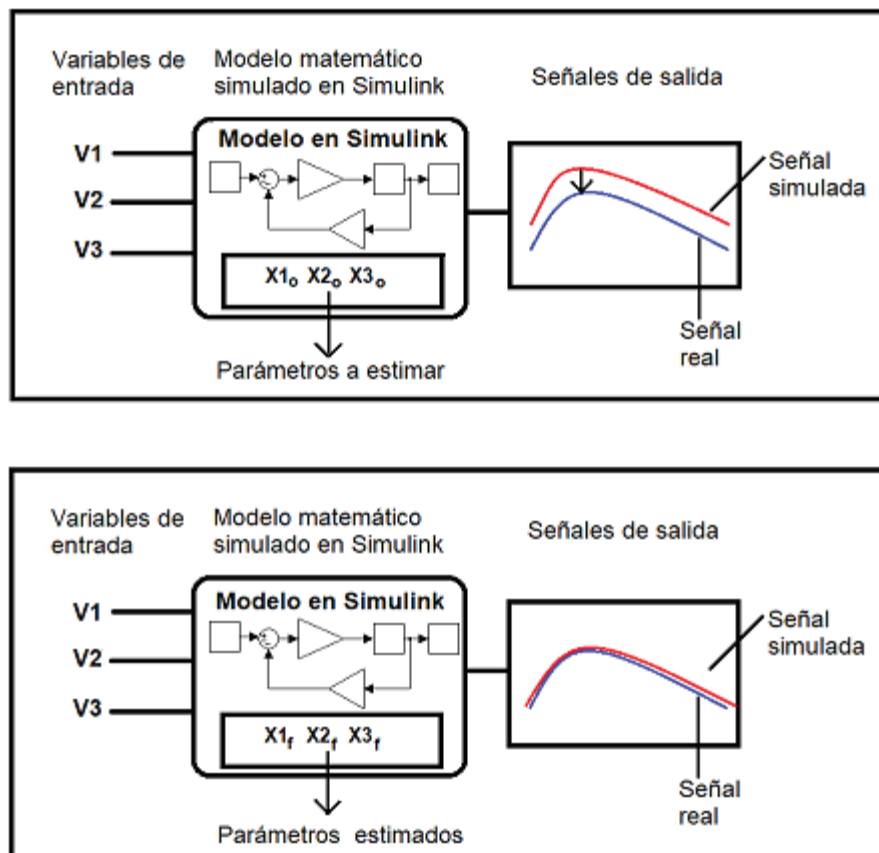
- **Descripción de la herramienta de Matlab “Estimador de parámetros” [66]**

La estimación de parámetros, es de mucha utilidad cuando se desea describir el comportamiento del sistema de una manera más precisa y real, a través de modelos matemáticos como: funciones de distribución de probabilidad estadística, modelos dinámicos paramétricos y modelos Simulink basados en datos [66].

Características del estimador los parámetros de los modelos de Simulink [66]:

- Importa y procesa los datos de prueba de entrada-salida, como por ejemplo las señales de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia solar.
- Especifica qué parámetros del modelo y las condiciones iniciales para estimar, como, por ejemplo: el factor de idealidad y las resistencias en serie y paralelo.
- Para mayor velocidad de solución, se impone límites superiores e inferiores a las variables a estimar para reducir el número de iteración y el tiempo de solución.

En la siguiente gráfica se describe el funcionamiento del estimador de parámetros:



**Figura 3.5.** Diagrama del funcionamiento del estimador de parámetros. Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 3.5, el estimador de parámetros tiene como entrada un determinado número de señales en función del tiempo ( $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ ), que a su vez son entradas del modelo matemático simulado mediante los diagramas de bloques en Simulink. Del modelo simulado, se deben seleccionar las variables que se desee estimar  $X_{1o}$ ,  $X_{2o}$  y  $X_{3o}$ , se selecciona los límites inferiores y superiores de las variables a ser estimadas, para un menor número de iteraciones al momento de la solución del sistema. El estimador de parámetros simula la señal de salida de acuerdo al modelo matemático y la compara con la señal real (medida) que se ingresa. El objetivo del estimador de parámetros es sobreponer la gráfica simulada a la señal real (medida), mediante algoritmos matemáticos propios, la herramienta irá variando el valor de los parámetros que se desee estimar; cuando los errores sean los mínimos, el estimador entrega las variables ya estimadas  $X_{1f}$ ,  $X_{2f}$  y  $X_{3f}$  [66].

En este proyecto se trabajará con los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos descritos en el numeral 3.3.2, de los cuales se estimarán: el factor de idealidad del diodo ( $A$ ), la resistencia en serie ( $R_s$ ), y la resistencia en paralelo ( $R_p$ ), para tener un modelo matemático más preciso del comportamiento de los paneles fotovoltaicos.

Una vez que se obtienen los valores de los parámetros estimados, se procede a actualizarlos en los modelos de estimación de irradiancia solar ya establecidos, y calcular los nuevos valores de irradiancia solar. Nuevamente se las compara con los valores de irradiancia medidos con el piranómetro, con este método se espera que los errores disminuyan y de esta manera validar los modelos de estimación de irradiancia solar.

### **3.3.5 Presentación de resultados**

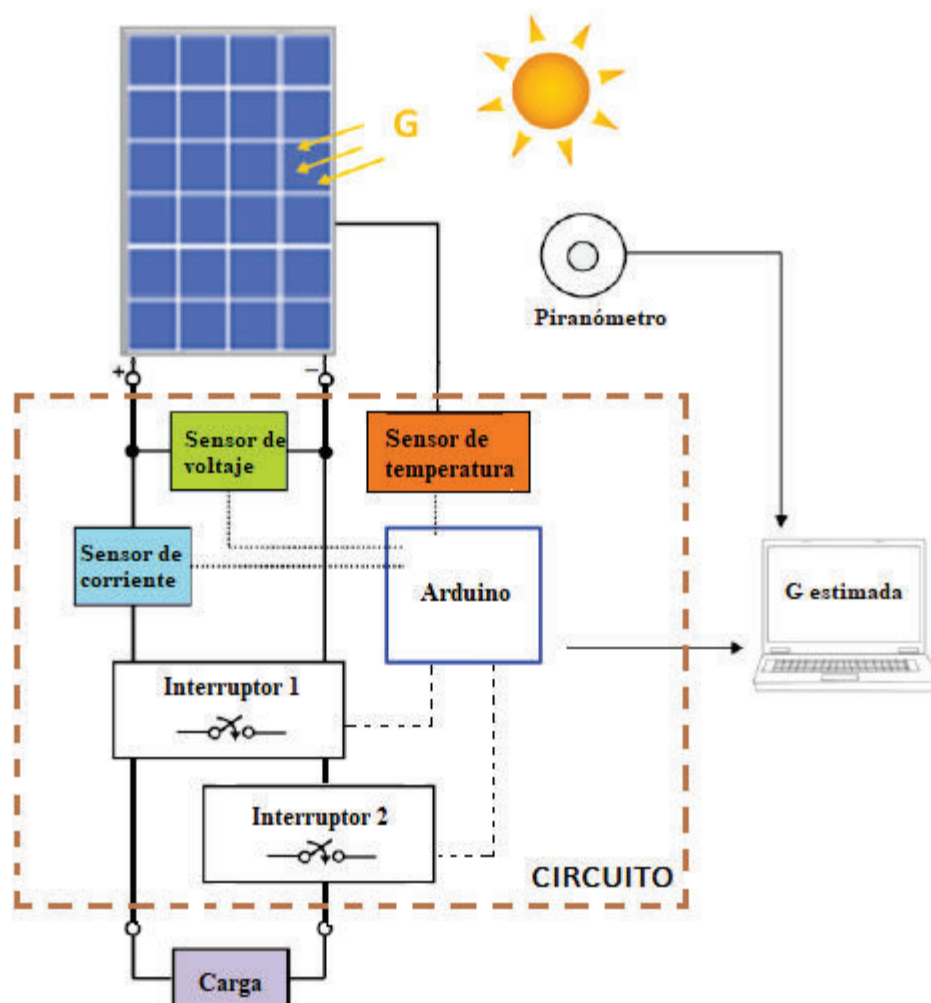
Finalmente, con los nuevos valores estimados de irradiancia solar, se realizará un análisis y una comparación entre todos los modelos bajo todas las condiciones de conexión del panel fotovoltaico para obtener y presentar el modelo que más se aproxime a los valores reales. De esta manera se validó todo el estudio realizado para estimar la irradiancia solar basada en modelos matemáticos y medidas de las variables ( $V$ ,  $I$  y  $^{\circ}T$ ) de los paneles fotovoltaicos.

### 3.4. Descripción y diseño del circuito electrónico a implementarse

#### 3.4.1 Descripción del funcionamiento y conexionado del circuito electrónico

Como se menciona en el numeral 3.3.3, los modelos matemáticos para estimar la irradiancia solar, se encuentran en función de tres variables: la temperatura, el voltaje y la corriente medidas del panel fotovoltaico bajo tres distintas condiciones: bajo carga, circuito abierto y cortocircuito.

Para describir el funcionamiento y conexión del circuito, se presenta a continuación el siguiente diagrama.



**Figura 3.6** Diagrama conexión y funcionamiento del circuito electrónico [4].

Como se puede visualizar en la figura anterior 3.6, el circuito electrónico consta de todos los elementos que se encuentran en el rectángulo de color café, un sensor temperatura, un sensor de corriente y un divisor de voltaje; además consta de dos interruptores (relés) los mismos que servirán para cambiar el estado de conexión de los paneles, los interruptores se abrirán o cerrarán para conectar la carga, dejar en circuito abierto o corto. Todos los elementos anteriores irán conectados a un micro controlador (Arduino Uno) que a su vez se colocarán en una placa electrónica, para facilidad de manejo y conexión.

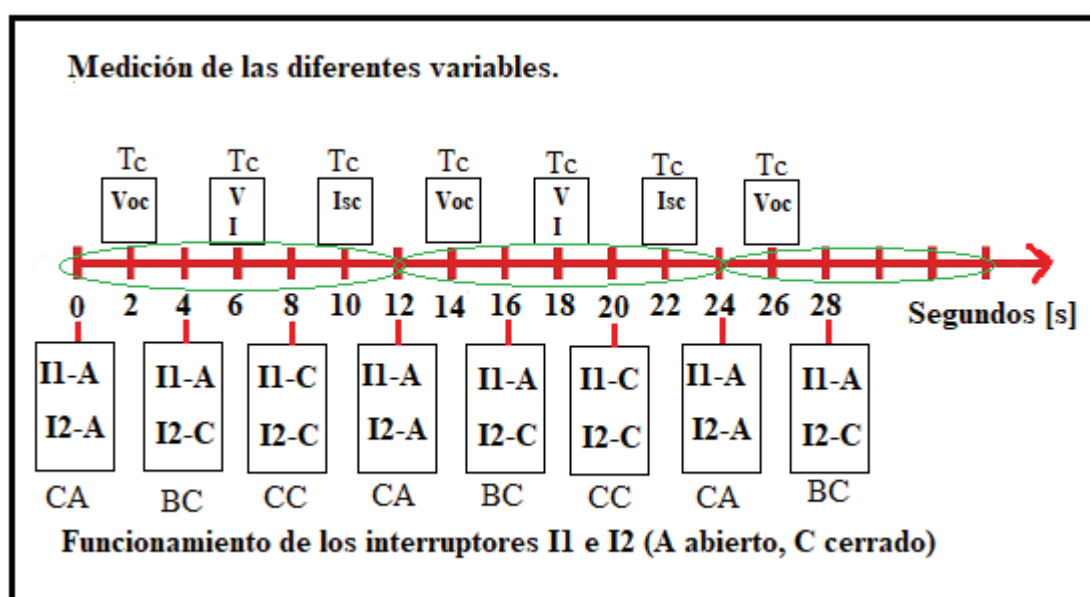
Todos los elementos serán descritos más adelante, el circuito se conectará al computador, en donde se almacenarán todas las variables: voltaje, corriente y temperatura, en un archivo Excel, que posteriormente será utilizado en el código de programación hecho en Matlab para el cálculo de la irradiancia solar usando los modelos matemáticos descritos y obtener los errores al comparar con los valores de irradiancia medidas con el piranómetro.

Se toma en cuenta dos metodologías de medición de las variables, la primera es utilizando los interruptores y la otra en base a mediciones continuas en cada condición de operación.

- **Primera metodología**

El objetivo de este primer método es que la medición del voltaje, corriente y temperatura sea automática y se logre medir las variables en los diferentes estados de conexión, sin la necesidad de hacer las conexiones manualmente.

Para comprender mejor los tiempos de actuación de los interruptores y como el circuito mide las variables dependiendo del estado del panel fotovoltaico.



**Figura 3.7.** Diagrama de tiempos de actuación de los interruptores. Elaboración propia.

Al inicio, en el segundo 0, los interruptores permanecerán abiertos, por lo que el panel fotovoltaico se encuentra en circuito abierto (CA), en el segundo 2 el circuito medirá el voltaje de circuito abierto, después en el segundo 4, el interruptor 2 se cerrará, poniendo al panel fotovoltaico en condición de bajo carga (BC), por lo que en el segundo 6 se medirá el voltaje y la corriente, después se cerrará el interruptor 1 en segundo 8, con el cual el panel fotovoltaico se encuentra en cortocircuito (CC) y el circuito medirá en el segundo 10 la corriente de cortocircuito, y finalmente en el segundo 12, se repite todo el proceso ya que se encuentra en un lazo repetitivo, lo que significa que el intervalo de tiempo de adquisición de datos para cada condición de conexión es de 12 segundos, la temperatura se medirá constantemente. Todas estas mediciones serán almacenadas en un archivo Excel.

- **Segunda metodología**

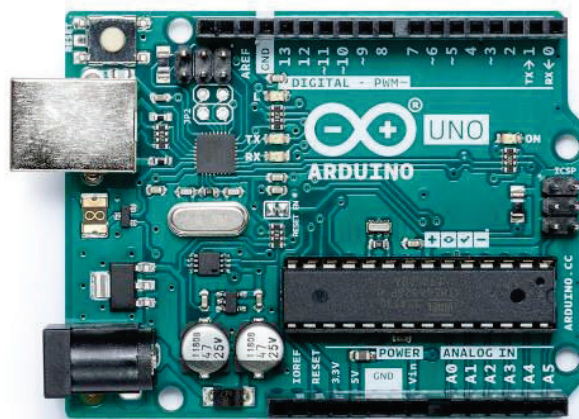
La segunda metodología propone hacer mediciones continuas (cada segundo), en una sola condición operativa, ya sea bajo carga, circuito abierto o cortocircuito. De esta manera obtener mediciones continuas de voltaje, corriente, y temperatura, para un mejor análisis al utilizar el estimador de parámetros de Matlab-Simulink.

Para realizar las pruebas en campo y medir las variables eléctricas de los paneles fotovoltaicos, se ha utilizado resistencias variables (reóstatos) como carga, el valor de la resistencia se calculará dividiendo el voltaje a potencia máxima para la corriente a potencia máxima de cada panel para tratar de trabajar el punto de potencia máxima.

### **3.4.2 Diseño del circuito electrónico y sus elementos**

Para el diseño e implementación del circuito se ha utilizado la placa de Arduino. Arduino es una compañía encargada de la creación y distribución de hardware y software basado en una placa con un micro controlador y un entorno de desarrollo para la placa, y de esta manera facilitar la programación y manejo de circuitos electrónicos [67].

En este proyecto se utiliza “Arduino UNO”, que es una placa que consta principalmente de un micro controlador ATmega328P, 14 pines digitales de entrada/salida (6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, una conexión USB, un conector de alimentación [67].



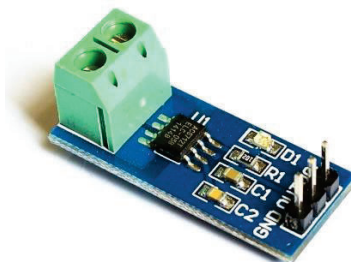
**Figura 3.8.** Placa Arduino UNO [67].

Para la medición de las variables, se usa diferentes sensores con los cuales se puede medir la corriente, la temperatura y el voltaje del panel fotovoltaico, los cuales envían una señal de voltaje (de 0 a 5V), a las entradas analógicas del Arduino, mediante la programación se transformará la señal de voltaje en las variables de corriente, voltaje y temperatura respectivamente, a su vez se almacenaran en una base de datos para posteriormente usarlas en los modelos de estimación de irradiancia solar.

### 3.4.2.1 Descripción de los sensores

- **Sensor de corriente**

Existen sensores de corriente diseñados para trabajar con Arduino, como es el caso del sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T, este sensor facilita la conexión, cuenta con una bornera para conectar la línea que se desea medir y cuenta con 3 pines, dos para la alimentación y un pin para la salida analógica que ira conectado al Arduino [68], este sensor permite medir corrientes hasta treinta amperios (30A).

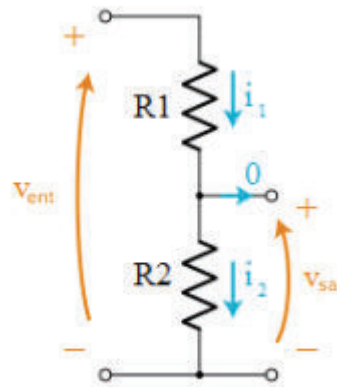


**Figura 3.9.** Sensor de corriente ACS712 [68].

- **Divisor de Voltaje**

Para medir el voltaje del panel fotovoltaico, se implementará un divisor de voltaje el cual se describe a continuación.

EL divisor de voltaje, es un circuito en el cual divide su voltaje de entrada entre sus impedancias, en este caso dos resistencias en serie [69], esto con el fin de reducir el voltaje medido de los paneles fotovoltaicos, a un nivel de voltaje de 0 a 5V.



**Figura 3.10** Circuito divisor de voltaje [69].

A continuación se presenta la expresión que relaciona el voltaje de entrada con el voltaje de salida:

$$V_{ent} = V_{sal} * \frac{R2}{R1 + R2}$$

**Ecuación 3.9.** Divisor de voltaje [69].

Se asume un voltaje de entrada de 40 V; que es el voltaje máximo que puede entregar el panel fotovoltaico de 250W, el voltaje de salida es de 5 V; voltaje máximo permitido en las entradas digitales del Arduino, se asume una resistencia R1 de 82 KΩ y se puede calcular la R2 con la ecuación 2.9; se tiene una resistencia R2 de 12 KΩ.

- **Sensor de temperatura**

Para el sensor de temperatura se ha seleccionado un PT100, que es una resistencia variable con la temperatura, que a cero grados centígrados (0°C) su resistencia es de cien ohmios (100Ω) y al aumentar la temperatura aumentará la resistencia proporcionalmente. Se ha seleccionado un TL4200, 4 hilos, RTD PT100 sensor de temperatura, por ser de clase A, ya que se tiene una mayor precisión al momento de medir la temperatura, este



sensor tiene un rango de medición de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ , tolerancia del PT100 para clase A:  $\pm 0.06 \Omega$  O  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$  [70].



**Figura 3.11** PT100 sensor de temperatura [70].

Para el sensor de temperatura, es necesario tener presente la variación de la resistencia del PT100 y la ecuación de la expansión lineal de un metal, para obtener la temperatura del panel solar, en [71] se explica de una forma detallada las características de un PT100 en función de la variación de la temperatura.

### 3.4.2.2 Descripción de los interruptores

- **Interruptores (Relés de 5V)**

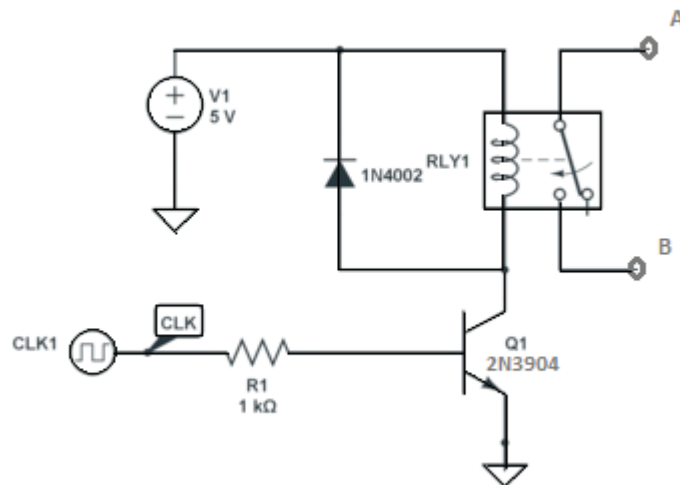
Estos interruptores servirán para cambiar el estado de los paneles fotovoltaicos y a su vez deben ser controlados por el Arduino, deben soportar la corriente de los paneles fotovoltaicos, por lo que se utilizan relés (Songle Relay) cuyo voltaje de alimentación es de 5 voltios y soportan una corriente de 10 amperios [72].



**Figura 3.12.** Relés Songle [72].

Para activar los relés es necesario un circuito adicional para acoplarlo con el Arduino, ya que el Arduino envía una señal de pulso, a continuación se describe el circuito:

El CLK es el pulso que entrega el Arduino en la salida digital el cual genera una pequeña señal que a través de una resistencia de  $1\text{ k}\Omega$  ingresa a la base del transistor (2N3904) el cual permitirá en paso de corriente por el emisor y colector del transistor, cerrando así el circuito que alimenta con  $5\text{ V}$  al relé. Y adicionalmente un diodo que se conecta en paralelo al relé conectando el ánodo del diodo al colector del transistor [73].



**Figura 3.13.** Circuito que controla el relé a través de un transistor [73].

### 3.4.2.3 Diagrama de conexión de los sensores e interruptores

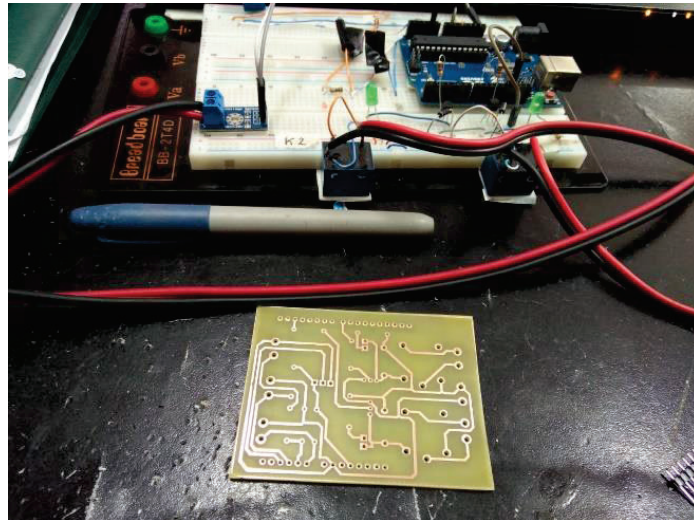
Para tener una idea del conexionado de los sensores e interruptores, se ha simulado en Proteus, que es un software que permite simular el comportamiento de circuitos electrónicos [74], para visualizar de mejor manera la disposición de cada elemento en el circuito revisar el Anexo IV.

Donde:

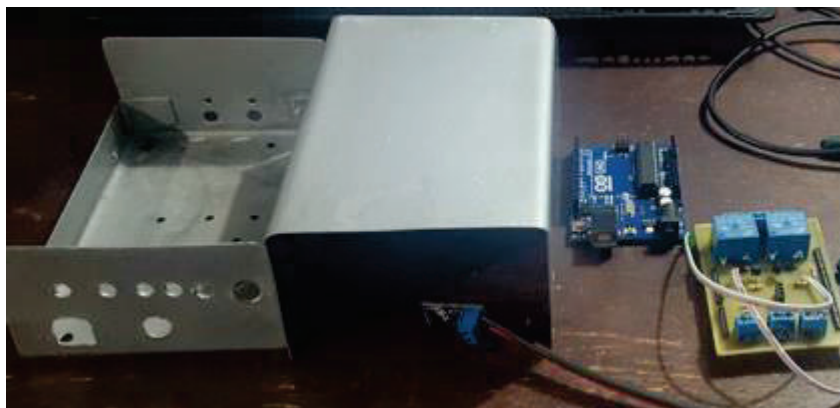
1. Terminal donde se conecta el PT100 (Sensor de temperatura).
2. Terminal donde se conecta las puntas del voltímetro.
3. Terminal donde se conecta el sensor de corriente que a su vez tiene una bornera para las puntas del amperímetro
4. Bornera para la conexión de los terminales del interruptor 1
5. Bornera para la conexión de los terminales del interruptor 2

### 3.4.1 Construcción y montaje del circuito electrónico

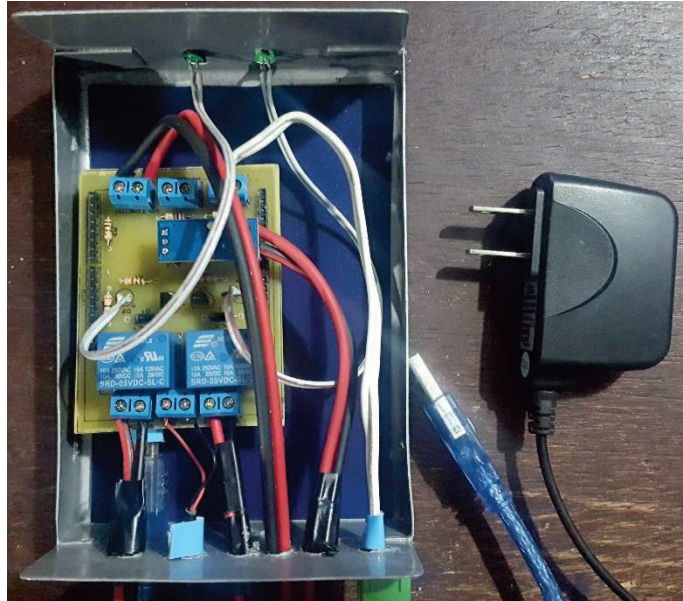
El circuito diseñado se implementa en una placa electrónica, en donde irán todos los sensores e interruptores para un mejor manejo del circuito y adicionalmente la placa irá en una caja metálica para una facilidad de conexión y transporte al momento de realizar las pruebas con los paneles fotovoltaicos.



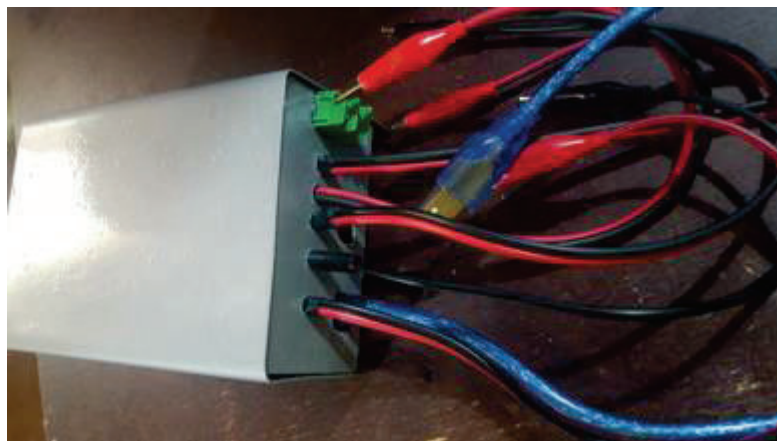
**Figura 3.14.** Circuito implementado en Protoboard y placa electrónica. Elaboración propia.



**Figura 3.15.** Caja metálica y placa electrónica. Elaboración propia.



**Figura 3.16.** Montaje de la placa en la caja metálica. Elaboración propia.



**Figura 3.17.** Circuito final. Elaboración propia.

### **3.4.2 Programación del circuito electrónico**

El código fue desarrollado en el lenguaje de programación del mismo ARDUINO, donde se controla el funcionamiento de los interruptores que permiten el cambio de estado de conexión de los paneles fotovoltaicos y sus tiempos de accionamiento, además los tiempos de almacenamiento de las medidas de las variables de temperatura, voltaje y corriente.

En el Anexo V se describe el código de programación implementado.



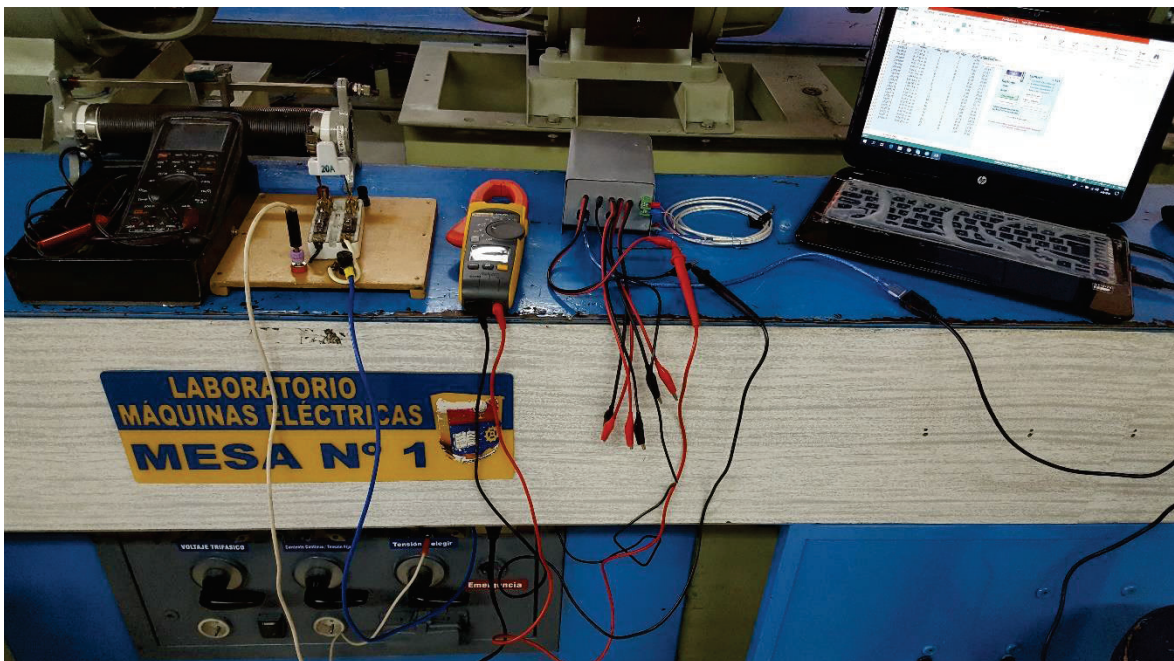
Las mediciones de las variables, deben ser almacenadas en una base de datos, por lo que se usa la herramienta PLX DAQ v2 que es un programa, que sirve para establecer una comunicación sencilla entre Microsoft Excel en un ordenador Windows y cualquier dispositivo compatible con el protocolo de puerto serie. Fue escrito intencionalmente para permitir la comunicación entre Arduino y Excel. En [75] se presenta un manual de usuario completo del manejo de este programa.



**Figura 3.18.** Software PLX-DAQ [75].

### 3.4.3 Pruebas y validación del circuito diseñado

Las pruebas del circuito diseñado, se realizaron en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional mediante el uso de una fuente variable de corriente continua; adicionalmente, como carga se utilizó un reóstato (resistencia variable), y como instrumentos de medidas se utilizó una pinza amperimétrica “FLUKE 376 FC”, y un multímetro digital “Protek 505” con los que se comparó las mediciones de voltaje y corriente obtenidas con el circuito diseñado.



**Figura 3.19.** Pruebas del circuito, en el laboratorio. Elaboración propia.

- **Errores de mediciones de voltaje y corriente**

Para el primer análisis se comparó con una pinza amperimétrica **Fluke 376**, donde el error promedio de las mediciones voltaje es 0,828% y el error promedio de las mediciones de corriente es 1,498%, para el segundo análisis se lo compara con un multímetro digital **Protek 505** en donde el error promedio de las mediciones de voltaje es 1,030% y el error promedio de mediciones de corriente es de 1,504%, por lo que se considera que el circuito implementado se puede utilizar como medidor de las variables del panel fotovoltaico.

Adicionalmente el sensor de temperatura fue calibrado con el sensor de temperatura que se encuentra en la subestación meteorológica del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica, ubicado en la terraza del edificio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este último capítulo se presentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la metodología propuesta, para cada panel fotovoltaico con los que se realizaron las pruebas en campo, teniendo en cuenta los tres diferentes métodos de estimación de irradiancia solar y las tres condiciones de conexión del panel fotovoltaico. A final se realiza una comparación y análisis de los resultados obtenidos con los diferentes modelos de estimación de irradiancia solar.

Para el desarrollo de este proyecto se trabaja con cuatro paneles fotovoltaicos, el primero es un panel fotovoltaico de una potencia nominal de 50W de marca “ZYTECH SOLAR” [76], el segundo de potencia de 250 W de marca “YINGLI SOLAR” [77], los cuales no han sido sometido a trabajos (prácticamente nuevos); los dos restantes son paneles fotovoltaicos de marca “EXMORK” con una potencia nominal de 80W cada uno [78], estos paneles tienen una vida útil de aproximadamente de 8 años.

Ciertos datos a utilizarse son proporcionados por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos en las hojas de datos, cabe mencionar que todos los datos están en condiciones estándar de prueba (STC). A continuación, se presentan los principales datos como: la potencia nominal, las corrientes, los voltajes, los coeficientes de temperatura entre otros, y que a su vez se utilizan para el estudio de los paneles fotovoltaicos. Las hojas de datos de los paneles fotovoltaicos se presentan en el Anexo I.

#### 4.1. Características de los paneles fotovoltaicos

- Panel fotovoltaico de 50W de marca “ZYTECH SOLAR” [76]

**Tabla 4.1.** Características del panel fotovoltaico de 50W “ZYTECH SOLAR”

Panel fotovoltaico 50W “ZYTECH SOLAR”		
Datos		Características
Tipo	-	Mono-Si
Número de celdas en serie	$N_s$	36

Potencia máxima	$P_{max}$	50 [W]
Tolerancia de la potencia	-	3 %
Voltaje a máxima potencia	$V_m$	18,61 [V]
Corriente a máxima potencia	$I_m$	2,69 [A]
Voltaje de circuito abierto	$V_{oc}$	22,43 [V]
Corriente de cortocircuito	$I_{sc}$	3,01 [A]
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito	$\mu_{Isc}$	+1,1 [mA/°C]
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	$\mu_{Voc}$	-2,3 [mV/°C]

- **Paneles fotovoltaicos de 80W de marca “EXMORK” [78]**

- **Tabla 4.2.** Características del paneles fotovoltaicos de 80W “EXMORK”

Panel fotovoltaico 80W “EXMORK”		
Datos		Características
Tipo	-	Poli-Si
Número de celdas en serie	$N_s$	36
Potencia máxima	$P_{max}$	80 [W]
Tolerancia de la potencia	-	3 %
Eficiencia del PF	-	15,75 %
Voltaje a máxima potencia	$V_m$	17,5 [V]
Corriente a máxima potencia	$I_m$	4,57 [A]
Voltaje de circuito abierto	$V_{oc}$	22 [V]
Corriente de cortocircuito	$I_{sc}$	4,91 [A]
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito	$\mu_{Isc}$	+0,05 [%/°C]= +2,455 [mA/°C]
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	$\mu_{Voc}$	-0,33 [%/°C]= -0,0726 [V/°C]



- **Panel fotovoltaico de 250W de marca “YINGLI SOLAR” [77]**
- **Tabla 4.3.** Características del panel fotovoltaico de 250W “YINGLI SOLAR”

Panel fotovoltaico 250W “YINGLI SOLAR”		
Datos		Características
Tipo	-	Poli-Si
Número de celdas en serie	$N_s$	60
Potencia máxima	$P_{max}$	250 [W]
Tolerancia de la potencia	$n$	3 %
Eficiencia del PF	-	15,3 %
Voltaje a máxima potencia	$V_m$	30,4 [V]
Corriente a máxima potencia	$I_m$	8,24 [A]
Voltaje de circuito abierto	$V_{oc}$	38,4 [V]
Corriente de cortocircuito	$I_{sc}$	8,79 [A]
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito	$\mu_{Isc}$	+0,06 [%/°C] = +5,274[mA/°C]
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	$\mu_{Voc}$	-0,33 [%/°C] = -0,12672 [mV/°C]

## 4.2. Determinación del modelo matemático del panel fotovoltaico

Con los datos de placa de los paneles fotovoltaicos descritos en las tres tablas anteriores, se procede a ejecutar el programa en Matlab [Anexo II], el cual resuelve el sistema de ecuaciones, mediante Newton Raphson, para la obtención de los parámetros desconocidos.

En donde se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Panel fotovoltaico de 50 W**

```
*****
Solucion encontrada
en la iteracion #
      8

Siendo: Ifot,   Is,   A,   Rs,   Rp
[ 3.01, 3.286e-8, 1.3282, 0.00032044, 94.952]
```

**Tabla 4.4.** Resultados del método de Newton Raphson panel de 50W.

Resultados		
N° de iteraciones	-	6
Corriente fotovoltaica	$I_{fot}$	3,01 [A]
Corriente de saturación del diodo	$I_s$	$3,286 \times 10^{-8}$ [A]
Factor de idealidad del diodo	$A$	1,3282
Resistencia en serie	$R_s$	0,00032044 [ $\Omega$ ]
Resistencia en paralelo	$R_p$	94,952 [ $\Omega$ ]

- Paneles fotovoltaicos de 80 W**

Se trabajó con dos paneles fotovoltaicos de 80W cada uno, con las mismas características eléctricas, por lo que, se presenta una tabla de resultados para los dos paneles fotovoltaicos, ya que en condiciones estándar de prueba (STC) ambos paneles tendrán los mismos parámetros.

```
*****
Solucion encontrada
en la iteracion #
      6

Siendo: Ifot,   Is,   A,   Rs,   Rp
[ 4.9112, 1.0994e-6, 1.5554, 0.040834, 172.93]
```

**Tabla 4.5.** Resultados del método de Newton Raphson paneles de 80W.

Resultados		
N° de iteraciones	-	6
Corriente fotovoltaica	$I_{fot}$	4,9112 [A]
Corriente de saturación del diodo	$I_s$	$1,0994 \times 10^{-6}$ [A]
Factor de idealidad del diodo	$A$	1,5554
Resistencia en serie	$R_s$	0,040834 [ $\Omega$ ]
Resistencia en paralelo	$R_p$	172,93 [ $\Omega$ ]

- **Panel fotovoltaico de 250 W**

```

*****
Solucion encontrada
en la iteracion #
    7

Siendo: Ifot,    Is,    A,    Rs,    Rp
[ 8.7925, 1.4916e-6, 1.5992, 0.065511, 231.61]

```

**Tabla 4.6.** Resultados del método de Newton Raphson panel de 250W.

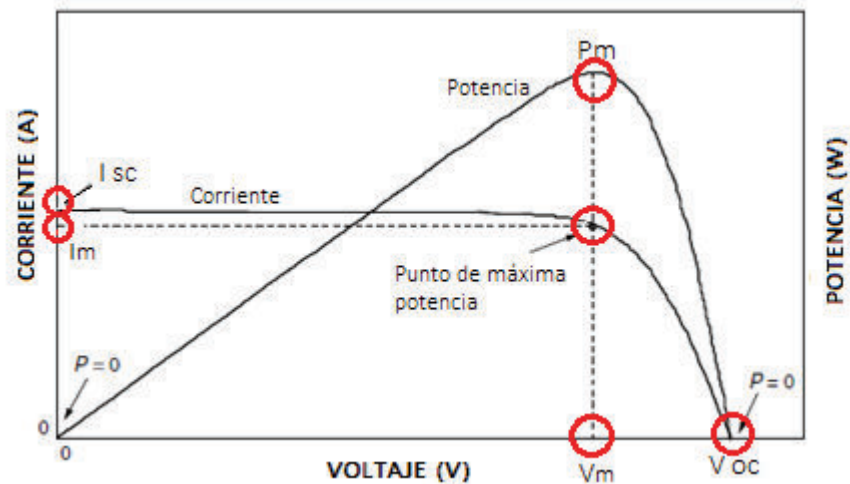
Resultados		
N° de iteraciones	-	7
Corriente fotovoltaica	$I_{fot}$	8,7925 [A]
Corriente de saturación del diodo	$I_s$	$1,4916 \times 10^{-6}$ [A]
Factor de idealidad del diodo	$A$	1,5992
Resistencia en serie	$R_s$	0,065511 [ $\Omega$ ]
Resistencia en paralelo	$R_p$	231,61 [ $\Omega$ ]

Como se pueden observar, en las tablas, 4.4, 4.5 y 4.6, los parámetros obtenidos están dentro de los rangos establecidos, ya que  $I_{fot}$  es igual a la corriente de cortocircuito en condiciones estándar ( $I_{sc\ STC}$ ), el factor de idealidad del diodo  $A$ , se encuentra entre 1 y 2, la  $R_s$  es de resistencia muy baja (mili ohmios) y la  $R_p$  está en un valor de centenas de ohmios, como lo establecen las diferentes fuentes bibliográficas [1], [18].

### 4.3. Validación del modelo matemático del panel fotovoltaico

Con los parámetros estimados en el punto anterior, es posible simular los modelos matemáticos descritos en el punto 3.3.2, para obtener las curvas características del panel fotovoltaico para cada modelo con la ayuda de Simulink, y compararlos con las curvas proporcionadas por los fabricantes. Sin embargo, en este caso las hojas de datos de los diferentes paneles fotovoltaicos solo proporcionan los puntos de las curvas como la potencia máxima, el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito, para tener una referencia de los puntos a ser analizados se presentan con una marca roja en la figura 4.1.

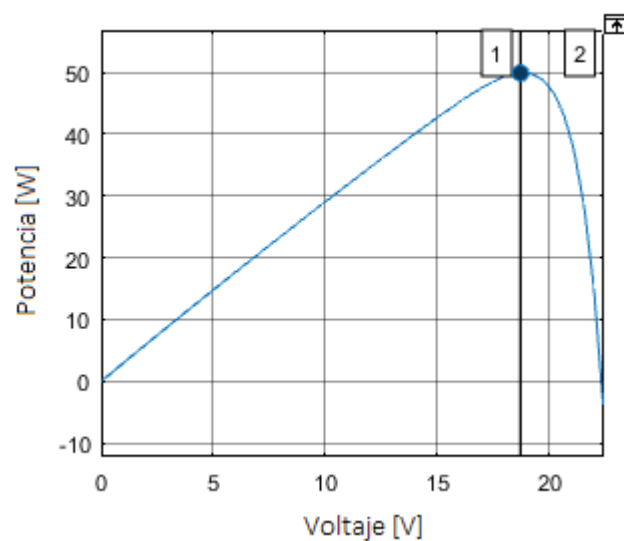
Se analiza si las curvas simuladas, cruzan por estos puntos establecidos por los fabricantes de los paneles fotovoltaicos y se calcula el error de cuan alejados están.



**Figura 4.1.** Puntos de análisis de las curvas características. Elaboración propia.

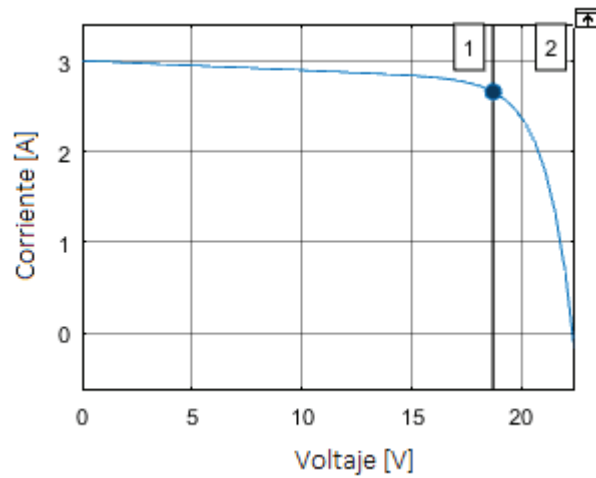
Se simulan los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos en Simulink y se obtienen las siguientes gráficas de las curvas características, como ejemplo se ha tomado los resultados del panel de 50W, utilizando el modelo 2 descrito en el punto 3.3.2.

- **Curva P-V**



**Figura 4.2.** Curva P-V panel 50W modelo 2. Elaboración propia.

- Curva I-V



**Figura 4.3.** Curva I-V panel 50W modelo 2. Elaboración propia.

Se presentan las tablas de los resultados y se comparan entre los 3 modelos utilizados.

- Panel fotovoltaico de 50 W

**Tabla 4.7.** Comparación entre los puntos de las curvas simuladas y proporcionadas, PF 50W.

	CURVA P-V				CURVA I-V		
	MODELO 1						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
Pm	50	53,65	7,30	Voc	22,43	22,43	0,00
Voc	22,43	22,43	0,00	Isc	3,01	3,01	0,00
Vm	18,61	18,865	1,37	Vm	18,61	18,865	1,37
				Im	2,69	2,844	5,72
	MODELO 2						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
Pm	50	49,86	0,28	Voc	22,43	22,43	0,00
Voc	22,43	22,43	0,00	Isc	3,01	3,01	0,00
Vm	18,61	18,71	0,54	Vm	18,61	18,71	0,54
				Im	2,69	2,665	0,93
	MODELO 3						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
Pm	50	49,86	0,28	Voc	22,43	22,43	0,00
Voc	22,43	22,43	0,00	Isc	3,01	3,01	0,00
Vm	18,61	18,71	0,54	Vm	18,61	18,71	0,54
				Im	2,69	2,665	0,93

- **Paneles fotovoltaicos de 80 W**

Se presenta una sola tabla para los dos paneles de 80W, ya que, al tener las mismas características eléctricas, sus parámetros en condiciones estándar de prueba (STC) serán iguales.

**Tabla 4.8.** Comparación entre los puntos de las curvas simuladas y proporcionadas, PF 80W.

	CURVA P-V					CURVA I-V		
	MODELO 1							
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]	
Pm	80	82,11	2,64	Voc	22	22	0,00	
Voc	22	22	0,00	Isc	4,91	4,91	0,00	
Vm	17,5	18	2,86	Vm	17,5	18	2,86	
				Im	4,57	4,562	0,18	
	MODELO 2							
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]	
Pm	80	80,05	0,06	Voc	22	22	0,00	
Voc	22	22	0,00	Isc	4,91	4,91	0,00	
Vm	17,5	17,7	1,14	Vm	17,5	17,7	1,14	
				Im	4,57	4,523	1,03	
	MODELO 3							
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]	
Pm	80	80,05	0,06	Voc	22	22	0,00	
Voc	22	22	0,00	Isc	4,91	4,91	0,00	
Vm	17,5	17,7	1,14	Vm	17,5	17,7	1,14	
				Im	4,57	4,523	1,03	

- **Panel fotovoltaico de 250 W**

**Tabla 4.9.** Comparación entre los puntos de las curvas simuladas y proporcionadas, PF 250W.

	CURVA P-V				CURVA I-V		
	MODELO 1						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
Pm	250	255,8	2,32	Voc	38,4	38,4	0,00
Voc	38,4	38,4	0,00	Isc	8,79	8,79	0,00
Vm	30,4	31,4	3,29	Vm	30,4	31,4	3,29
				Im	8.24	8.148	1.12

	MODELO 2						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
<b>Pm</b>	250	250,9	0,36	<b>Voc</b>	38,4	38,4	0,00
<b>Voc</b>	38,4	38,4	0,00	<b>Isc</b>	8,79	8,79	0,00
<b>Vm</b>	30,4	30,7	0,99	<b>Vm</b>	30,4	30,7	0,97
				<b>Im</b>	8,24	8,173	0,81
	MODELO 3						
	Datos	Simulados	Error [%]		Datos	Simulados	Error [%]
<b>Pm</b>	250	250,9	0,36	<b>Voc</b>	38,4	38,4	0,00
<b>Voc</b>	38,4	38,4	0,00	<b>Isc</b>	8,79	8,79	0,00
<b>Vm</b>	30,4	30,7	0,99	<b>Vm</b>	30,4	30,7	0,97
				<b>Im</b>	8,24	8,173	0,81

### Análisis:

#### Modelo 1:

Como se puede observar en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9, al utilizar el modelo del panel fotovoltaico el cual está basado en el circuito equivalente de un diodo y solo la resistencia en serie, los errores son altos, alrededor del 7,3%, para el panel de 50W, y un error aproximado de 3,6% para los demás paneles; por lo tanto este modelo no puede ser usado para un análisis exhaustivo de los paneles fotovoltaicos, sin embargo, se lo considera en este proyecto debido a que en [5], se usa este modelo para estimar la irradiancia solar.

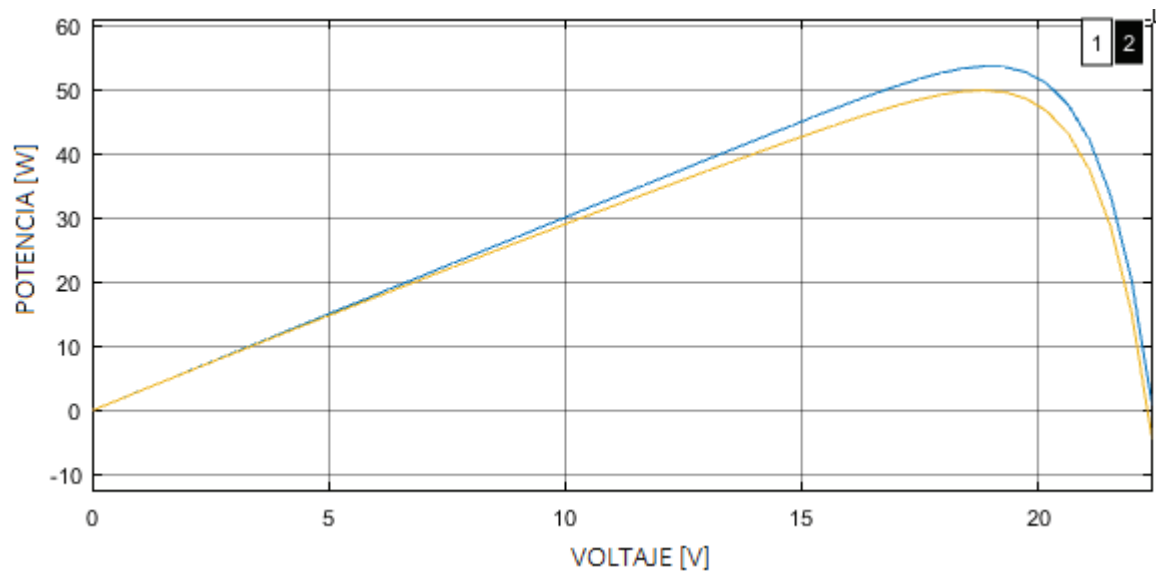
#### Modelo 2 y Modelo 3:

Se hace un análisis de los dos modelos ya que se obtuvieron los mismos resultados, debido a que en ambos casos se hizo el análisis bajo condiciones estándar (se basan en el mismo circuito equivalente) y las ecuaciones de la corriente son las mismas, sin embargo, se obtendrán resultados diferentes al variar la irradiancia solar y la temperatura.

Como se puede apreciar, en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9, para todos los paneles los errores no sobrepasan el 1,14%, y se puede determinar que estos modelos se aproximan más al comportamiento y funcionamiento ideal de un panel fotovoltaico en condiciones estándar, estos modelos pueden ser utilizados para estudios más profundos de paneles fotovoltaicos.

Para ver la diferencia entre los tres modelos a continuación se presenta la curva característica P-V del panel fotovoltaico de 50W, a condiciones estándar ( $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ ), a ( $500 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ ) y a ( $1000 \text{ W/m}^2$  y  $30^\circ\text{C}$ ) es decir con diferentes niveles de irradiancia y temperatura.

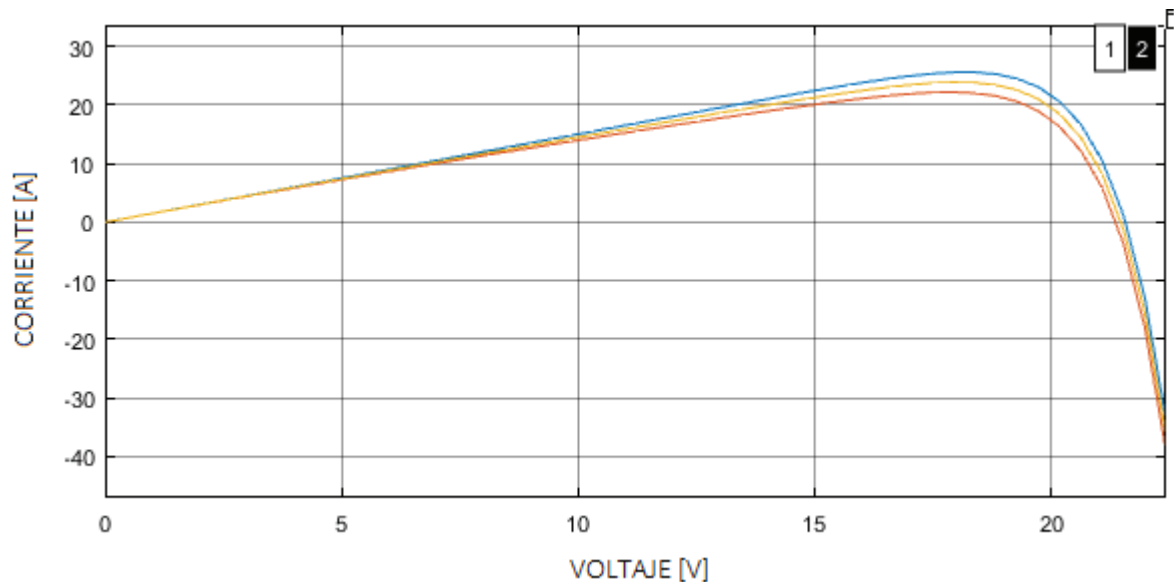
- Curva P-V del PF de 50W a  $1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$



**Figura 4.4.** Curva P-V panel 50W a  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ . Elaboración propia.

La curva de color azul es la curva obtenida con el modelo 1, mientras que la curva de color amarillo se obtuvo con el modelo 2 y 3 (las curvas están superpuestas).

- Curva PV del PF de 50W a  $500 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de  $25^\circ\text{C}$

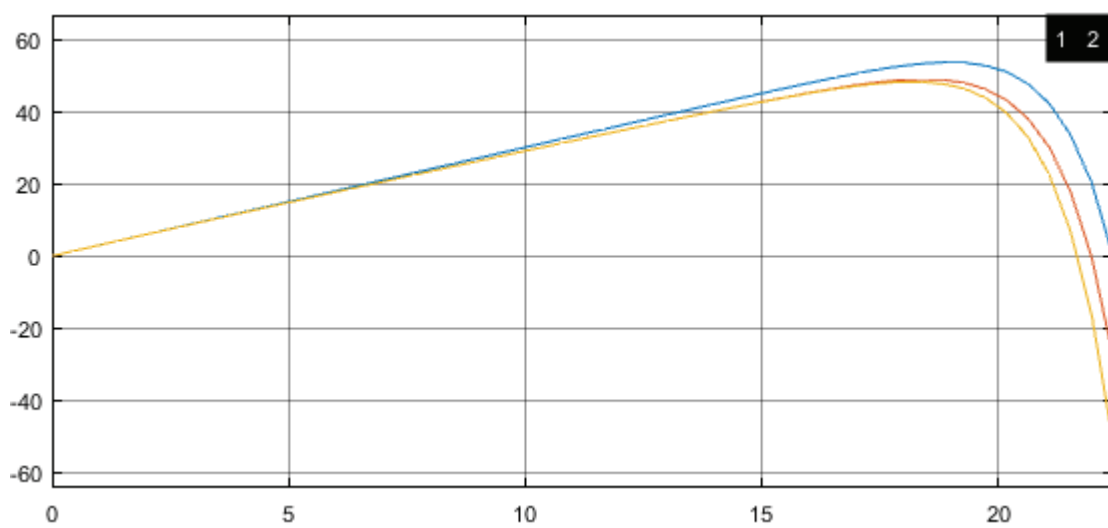


**Figura 4.5.** Curva P-V panel 50W a  $500 \text{ W/m}^2$   $30^\circ\text{C}$ . Elaboración propia.

La curva de color azul se obtiene con el modelo 1, la roja con el modelo 2 y la amarilla con el modelo 3, en esta figura si se puede apreciar la diferencia entre los 3 modelos presentados al variar la irradiancia solar.



- **Curva PV del PF de 50W a 1000 W/m<sup>2</sup> y una temperatura de 30°C**



**Figura 4.6.** Curva P-V panel 50W a 1000 W/m<sup>2</sup> y 30°C. Elaboración propia.

La curva de color azul se obtiene con el modelo 1, la roja con el modelo 2 y la amarilla con el modelo 3, se puede apreciar la diferencia entre los 3 modelos presentados al variar la temperatura.

#### **4.4. Cálculo y validación de la irradiancia solar estimada basada en los modelos matemáticos del panel fotovoltaico**

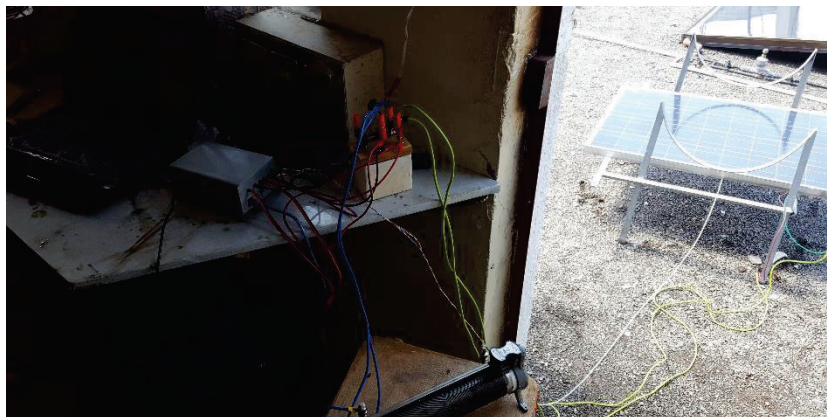
Las pruebas en campo, fueron realizadas con los diferentes paneles fotovoltaicos, utilizando el circuito electrónico diseñado para la medición de las variables: voltaje, corriente y temperatura. Estas pruebas se realizaron en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, debido a que ahí está ubicada la subestación meteorológica que pertenece al Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de Ingeniería Mecánica y se encuentra el piranómetro.



**Figura 4.7.** Pruebas con los paneles fotovoltaicos. Elaboración propia.

#### 4.4.1 Medición de las variables del panel fotovoltaico

La conexión del circuito para medir las variables, se presentó el diagrama de conexión en el punto 3.4.1, en la figura 3.6. Se hicieron mediciones de acuerdo a las dos metodologías presentadas en 3.4.1, en una primera instancia se realizaron mediciones utilizando los interruptores (relés), cada 12 segundos bajo las 3 condiciones de conexión y el segundo método, tomando medidas cada segundo, y solo bajo una condición de carga. Estas variables serán almacenadas en un archivo Excel.



**Figura 4.8.** Medición de las variables del PF. Elaboración propia.

FECHA	HORA	CONTADOR	VOLTAJE	CORRIENTE	TEMPERATURA
4/10/2018	12:01:04 p. m.	0	19,84	0	27,72
4/10/2018	12:01:06 p. m.	1	19,8	0	27,72
4/10/2018	12:01:08 p. m.	2	19,84	1,6	27,72
4/10/2018	12:01:10 p. m.	3	5,59	1,83	27,72
4/10/2018	12:01:12 p. m.	4	5,63	1,88	27,72
4/10/2018	12:01:14 p. m.	5	0,39	1,9	27,72
4/10/2018	12:01:16 p. m.	6	0,39	0,25	27,72
4/10/2018	12:01:18 p. m.	7	19,88	0	27,72
4/10/2018	12:01:20 p. m.	8	19,88	1,65	27,72
4/10/2018	12:01:22 p. m.	9	5,78	1,9	27,72
4/10/2018	12:01:24 p. m.	10	5,86	1,96	27,72
4/10/2018	12:01:26 p. m.	11	0,47	1,98	27,72
4/10/2018	12:01:28 p. m.	12	0,43	0,26	27,72

**Figura 4.9.** Almacenamiento de datos bajo las 3 conexiones cada 12 segundos.  
Elaboración propia.

FECHA	HORA	CONTADOR	VOLTAJE	CORRIENTE	TEMPERATURA
20/11/2018	12:02:58 p. m.	0	16,68	4,62	24,64
20/11/2018	12:02:59 p. m.	1	16,76	4,64	23,97
20/11/2018	12:03:00 p. m.	2	16,84	4,66	24,64
20/11/2018	12:03:01 p. m.	3	16,88	4,67	24,64
20/11/2018	12:03:02 p. m.	4	16,88	4,68	24,64
20/11/2018	12:03:03 p. m.	5	16,91	4,67	24,64
20/11/2018	12:03:04 p. m.	6	16,8	4,66	24,64
20/11/2018	12:03:05 p. m.	7	16,76	4,63	24,64
20/11/2018	12:03:06 p. m.	8	16,64	4,61	25,31
20/11/2018	12:03:07 p. m.	9	16,52	4,57	23,97
20/11/2018	12:03:08 p. m.	10	16,37	4,53	24,64
20/11/2018	12:03:09 p. m.	11	16,17	4,48	24,64

**Figura 4.10.** Almacenamiento de datos bajo 1 conexión cada segundo. Elaboración propia.

En la hoja de Excel, se registra la fecha, hora, un contador, las mediciones de voltaje, corriente y temperatura, esta base de datos será tratado mediante un script hecho en Matlab (Anexo VI), en el cual se obtendrán las estimaciones de irradiancia solar, mediante los tres modelos y bajo las 3 conexiones (bajo carga, circuito abierto y cortocircuito).

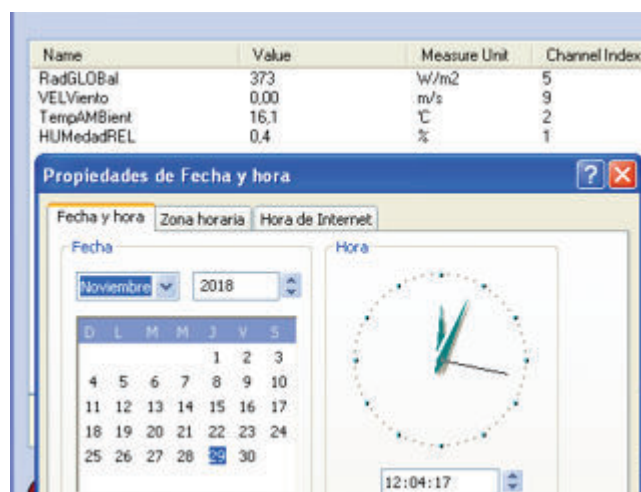
#### 4.4.2 Validación de los modelos matemáticos de estimación de irradiancia solar

Para validar los modelos matemáticos de estimación de irradiancia solar, se compara con los valores de irradiancia solar medidos mediante un piranómetro, que se encuentra ubicado en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica; este instrumento de medida es independiente al circuito diseñado, por lo que los valores de irradiancia solar fueron escritos de forma independiente. Para una mayor precisión entre los valores medidos con el piranómetro y los valores estimados de irradiancia, los paneles fotovoltaicos se ubicaron lo más cercano a la columna donde está instalado el piranómetro.



**Figura 4.11.** Piranómetro ubicado en la terraza de Ingeniería Mecánica. Elaboración propia.

El piranómetro, al ser un dispositivo independiente del circuito diseñado y al tener su propio software para las mediciones de irradiancia solar y su propio tiempo de almacenamiento de datos, presenta un desfase entre las señales medidas y las señales estimadas de irradiancia solar, por lo que se tuvo que hacer las respectivas correcciones previo a la etapa de análisis.



**Figura 4.12.** Mediciones de irradiancia solar. Elaboración propia.

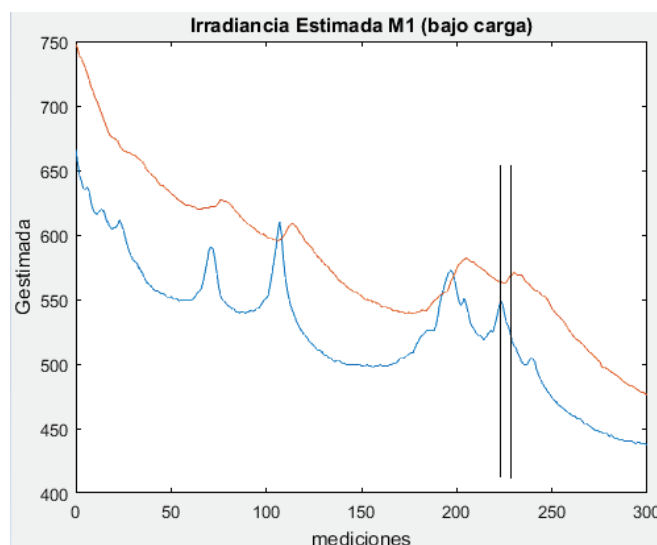
FECHA	HORA	CONTADOR	VOLTAJE	CORRIENTE	TEMPERATURA	IRRADIANCIA
20/11/2018	12:02:58 p. m.	0	16,68	4,62	24,64	1117
20/11/2018	12:02:59 p. m.	1	16,76	4,64	23,97	1116
20/11/2018	12:03:00 p. m.	2	16,84	4,66	24,64	1114
20/11/2018	12:03:01 p. m.	3	16,88	4,67	24,64	1111
20/11/2018	12:03:02 p. m.	4	16,88	4,68	24,64	1107
20/11/2018	12:03:03 p. m.	5	16,91	4,67	24,64	1102
20/11/2018	12:03:04 p. m.	6	16,8	4,66	24,64	1096
20/11/2018	12:03:05 p. m.	7	16,76	4,63	24,64	1092
20/11/2018	12:03:06 p. m.	8	16,64	4,61	25,31	1088
20/11/2018	12:03:07 p. m.	9	16,52	4,57	23,97	1086
20/11/2018	12:03:08 p. m.	10	16,37	4,53	24,64	1085
20/11/2018	12:03:09 p. m.	11	16,17	4,48	24,64	1083
20/11/2018	12:03:10 p. m.	12	16,02	4,43	24,64	1084
20/11/2018	12:03:11 p. m.	13	15,9	4,41	24,64	1085
20/11/2018	12:03:12 p. m.	14	15,98	4,42	24,64	1089

**Figura 4.13.** Almacenamiento de dato incluido los valores de irradiancia solar.

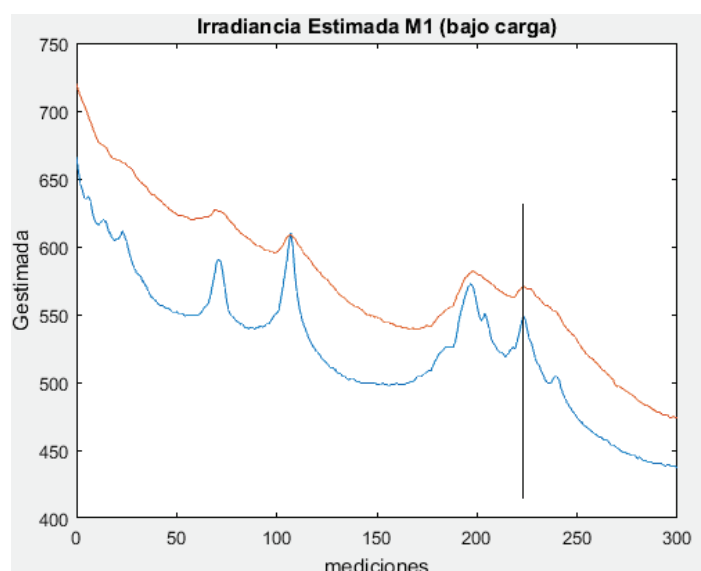
Elaboración propia.

En la figura 4.14, se puede apreciar el desfase de la señal medida (color naranja) y la señal estimada de irradiancia solar (color azul), la señal medida tiene un atraso de aproximadamente 7 segundos, lo cual se corrigió como se puede ver en la figura 4.15. Para el ejemplo se tomó las mediciones realizadas al panel fotovoltaico de 250W.





**Figura 4.14.** Señales desfasadas de irradiancia solar medida y estimada. Elaboración propia.



**Figura 4.15.** Señales en fase de irradiancia solar medida y estimada. Elaboración propia.

#### 4.4.3 Estimación de parámetros de los paneles fotovoltaicos mediante la herramienta “Estimador de parámetros” de Matlab-Simulink

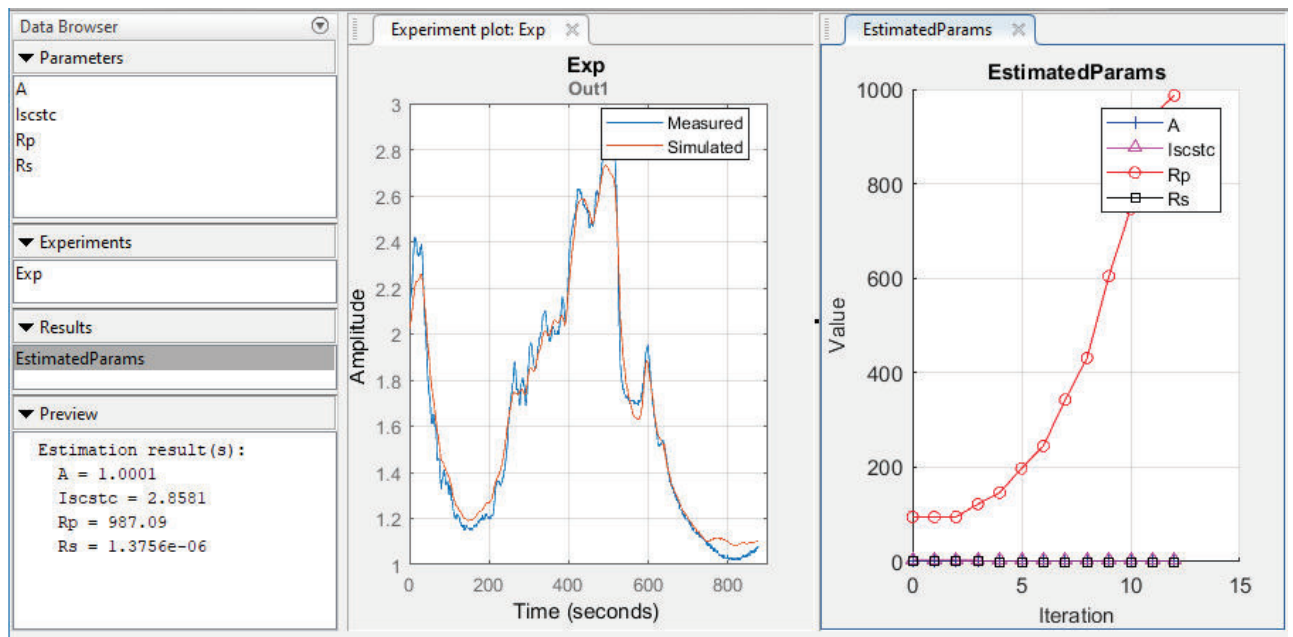
Al realizar las pruebas de campo con los paneles fotovoltaicos, se obtuvieron voltaje y corrientes menores a los nominales y esto se puede apreciar al graficar la señal de corriente medida y la señal de corriente simulada, lo que implica que los paneles fotovoltaicos

sufrieron un tipo de degradación, debido a los años de vida útil, especialmente los paneles de 80W.

En este proyecto de titulación se propone el uso del estimador de parámetros que es una herramienta de Matlab-Simulink, el cual, permite estimar los siguientes parámetros: factor de idealidad del diodo ( $A$ ), la resistencia en serie ( $R_s$ ), la resistencia en paralelo ( $R_p$ ) y la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) en condiciones estándar de prueba (STC) y de esta manera tener un modelo matemático más aproximado al funcionamiento real del panel fotovoltaico. Estos parámetros son los más relevantes al momento de obtener las curvas características de los paneles fotovoltaicos.

Para este análisis no se toma en cuenta el voltaje de circuito abierto, debido a que en estudios realizados sobre degradación de paneles fotovoltaicos, esta variable no sufre una variación significativa, no así, la corriente de cortocircuito la cual con el desgaste de los paneles fotovoltaicos no llega a los valores nominales (se reduce) [79],[80],[81],[82].

El estimador de parámetro presenta la siguiente ventana principal en la cual se puede visualizar la señal medida (azul) y simulada (naranja), el número de iteraciones y los parámetros estimados.



**Figura 4.16.** Ventana principal del estimador de parámetros. Elaboración propia.

A continuación se presentarán los parámetros estimados para cada panel fotovoltaico y para cada modelo matemático presentado.

- Panel fotovoltaico de 50W

**Tabla 4.10.** Parámetros estimados del PF 50W, bajo los 3 modelos.

VALORES SIMULADOS	VALORES ESTIMADOS		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
A = 1.3282;	A=1;	A = 1.0001;	A = 1.0003;
Iscstc= 3.01;	Isc=2.8407;	Iscstc = 2.8581;	Iscstc = 2.8533;
Rp = 94.953;		Rp = 987.09;	Rp = 997.19;
Rs = 0.00032044;	Rs=5.8994*10 <sup>-11</sup> ;	Rs = 1.3756e-06;	Rs = 7.5154e-07;
Vocstc=22.43;	Voc=22.43	Vocstc=22.43;	Vocstc=22.43;

- Panel fotovoltaico de 80W

Panel 1

**Tabla 4.11.** Parámetros estimados del PF1 de 80W, bajo los 3 modelos

VALORES SIMULADOS	VALORES ESTIMADOS		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
A = 1.5554;	A=1.0001;	A=1.0001;	A=1.0003;
Iscstc= 4.91;	Isc=3.9825;	Iscstc=4.0162;	Iscstc=4.0719;
Rp=172.93;		Rp=299.56;	Rp=99.511;
Rs = 0.040834;	Rs=0.63459;	Rs=0.53334;	Rs=0.45853;
Vocstc=22;	Voc=22;	Vocstc=22;	Vocstc=22;

Panel 2

**Tabla 4.12.** Parámetros estimados del PF2 de 80W, bajo los 3 modelos

VALORES SIMULADOS	VALORES ESTIMADOS		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
A = 1.5554;	A=1.0003;	A=1.0003;	A=1;
Iscstc= 4.91;	Isc=3.9015;	Iscstc=3.9124;	Iscstc=3.9128;
Rp=172.93;		Rp=997.83;	Rp=999.9;
Rs = 0.040834;	Rs=0.00012766;	Rs=0.00014061;	Rs=1.4992*10 <sup>-6</sup> ;
Vocstc=22;	Voc=22;	Vocstc=22;	Vocstc=22;



- Panel fotovoltaico de 250W

**Tabla 4.13.** Parámetros estimados del PF de 250W, bajo los 3 modelos

VALORES SIMULADOS	VALORES ESTIMADOS		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
A = 1.5992;	A=1.0004;	A=1;	A=1;
Iscstc= 8.79;	Isc=8.1298;	Iscstc=8.1612;	Iscstc=8.1529;
Rp=231.61;		Rs=2.7857*10 <sup>-5</sup> ;	Rs=4.6087*10 <sup>-6</sup> ;
Rs = 0.065511;	Rs=3.8845*10 <sup>-5</sup> ;	Rp=904.4;	Rp=999.74;
Vocstc=38.4;	Voc=38.4;	Vocstc=38.4;	Vocstc=38.4;

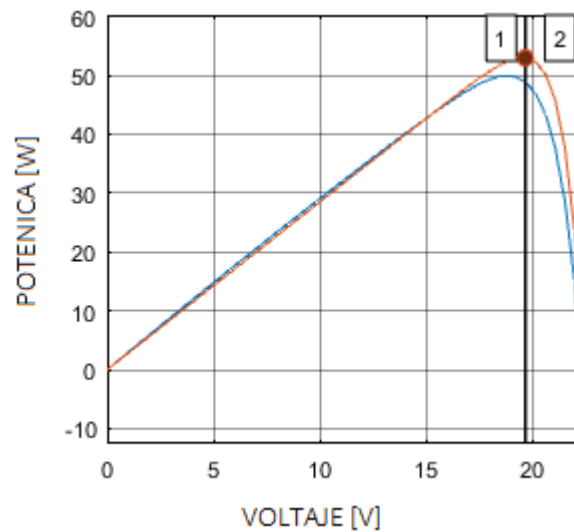
En las tablas anteriores (4.10 - 4.13), se puede apreciar como disminuye la corriente de cortocircuito, especialmente en los paneles de 80W, se puede apreciar una disminución del 19% aproximadamente, para los paneles de 50W y 250W, disminuyen un 5% y 7% respectivamente. Los otros parámetros se encuentran en los rangos establecidos, lo que significa, que se tiene un modelo matemático con los nuevos parámetros estimados, que representan mejor el comportamiento de los paneles fotovoltaicos.

#### 4.4.4 Análisis de degradación de los paneles fotovoltaicos mediante los parámetros estimados

Con los parámetros estimados, se puede graficar las curvas características, que muestra el comportamiento más preciso de los paneles fotovoltaicos, ya que el análisis se lo realiza con mediciones reales de voltaje, corriente y temperatura obtenidos mediante pruebas en campo.

Una aplicación, al análisis de la estimación de parámetros, es poder determinar la degradación de los paneles fotovoltaicos ya que se puede obtener la curva P-V, y de esa manera tener una idea de la potencia nominal que puede entregar el panel fotovoltaico en condiciones reales, como se muestra a continuación.

- **Panel fotovoltaico de 50W**

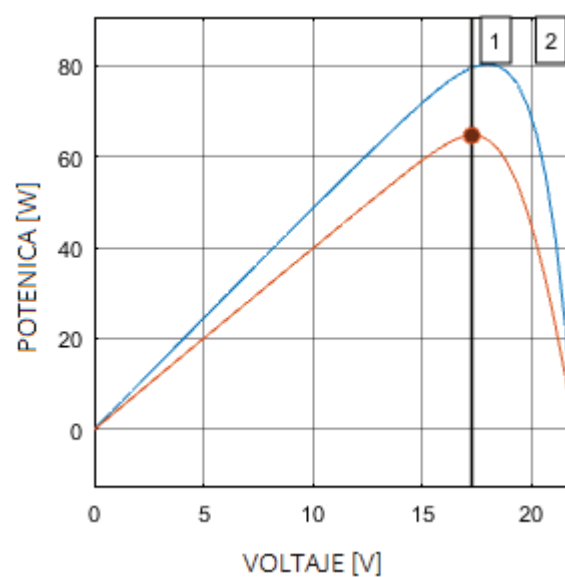


**Figura 4.17.** Potencias del PF de 50W. Elaboración propia.

La curva de color rojo, es la potencia simulada con los parámetros estimados, teniendo una potencia de 52,94 W, comparada con la potencia nominal del panel se tiene un aumento de 2,94 W que representa un 5,9%, este resultado tiene sentido ya que este panel fotovoltaico es relativamente nuevo.

- **Panel fotovoltaico de 80W**

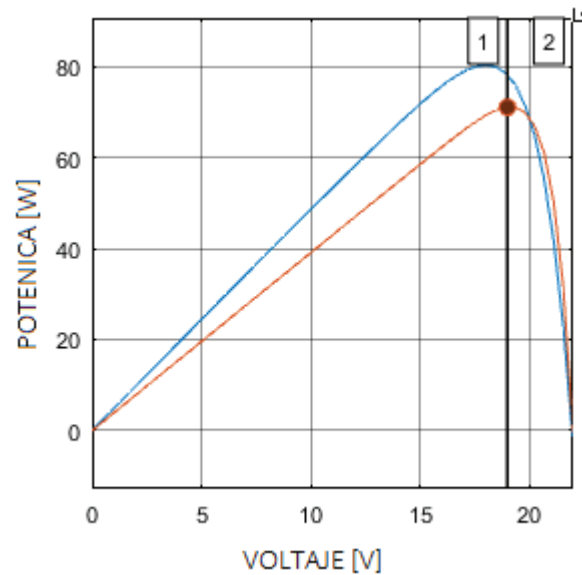
**Panel 1**



**Figura 4.18.** Potencias del PF1 de 80W. Elaboración propia.

La potencia simulada con los nuevos parámetros es de 64,67 W, que representa una disminución del 19,16%, lo que representa que el panel fotovoltaico se ha degradado, durante los años de vida útil.

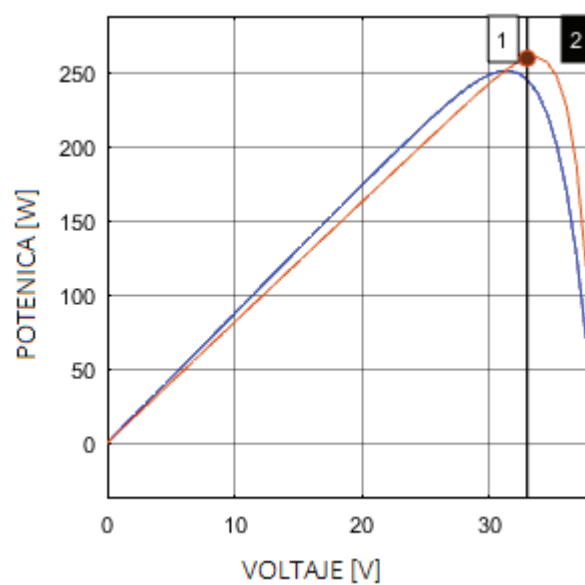
## Panel 2



**Figura 4.19.** Potencias del PF2 de 80W. Elaboración propia.

La potencia simulada con los nuevos parámetros es de 71 W, que representa una disminución del 11,25%, lo que representa que el panel fotovoltaico se ha degradado, durante los años de vida útil.

- **Panel fotovoltaico de 250W**



**Figura 4.20.** Potencias del PF de 250W. Elaboración propia.

La potencia simulada con los nuevos parámetros es de 260 W, que representa un aumento del 4%, este panel también es prácticamente nuevo, no ha sido sometido a trabajos de generación de energía eléctrica.

Como se pudo comprobar, los paneles de 80W que tienen varios años de vida útil, presentan una degradación, debido a esto su potencia nominal disminuye considerablemente, mientras que los paneles fotovoltaicos, de 50W y 250W, no varían mucho, debido a que, estos paneles son nuevos y no han sido sometidos a trabajos.

#### **4.5. Presentación de resultados de irradiancia solar estimada**

Las pruebas fueron realizadas en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en el Laboratorio de “Energías Alternativas y Eficiencia Energética”, durante varios días, y bajo diferentes condiciones climáticas en donde se tuvo diferentes niveles de irradiancia solar y diferentes temperaturas.

Se presentan cuatro tablas de resultados por cada panel, en la primera tabla se indica el número de pruebas, la fecha, el número de muestras, el intervalo de tiempo de adquisición de mediciones y bajo qué condiciones de conexión. En las siguientes tres tablas, se calculan los errores para los tres modelos de estimación de irradiancia solar presentados y bajo las tres condiciones de conexión: bajo carga, cortocircuito y circuito abierto. Como carga se conectó una resistencia variable de 4 ohmios para los paneles de 80W y 250W y una resistencia de 7 ohm para el panel de 50W, con el fin de que el panel fotovoltaico trabaje en el punto de máxima potencia o cercano.

Para los paneles de 80W, se trabajó en primera instancia con la primera metodología, de adquisición de datos, el cual consistía en medir las variables utilizando los interruptores, para conectar el panel fotovoltaico, bajo las tres condiciones de carga. Sin embargo, esta metodología presentó varios inconvenientes al momento de tratar las señales de irradiancia, ya que el intervalo de mediciones es de 12 segundos, lo cual dificultaba sincronizar entre el tiempo de adquisición del circuito y el tiempo de adquisición del piranómetro. Debido a esto, varias pruebas a los paneles de 80W y todas las pruebas a los paneles de 50W y 250W se las realizó bajo la segunda metodología de adquisición de datos (cada segundo y solo bajo una condición de carga).

### 4.5.1 Resultados del panel fotovoltaico de 50W

**Tabla 4.14.** Pruebas realizadas al panel fotovoltaico de 50W.

PANEL 50W					
	Fecha	Tiempo de adquisición de datos	# pruebas	Condiciones operativas	Archivos Excel
1	13_11_2018	Cada 1 seg	1 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
2	20_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CA (1)	En 1 archivo
3	22_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CA (1)	En 1 archivo
4	04_12_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CA (1)	En 1 archivo
5	13_12_2018	Cada 1 seg	2 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CC (1)	En 1 archivo
6	29_12_2018	Cada 1 seg	3 prueba	BC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CC (1)	En 1 archivo
		Cada 1 seg		CA (1)	En 1 archivo

**Tabla 4.15.** Errores en condiciones bajo carga del PF de 50W.

CONDICIONES BAJO CARGA									
# Pr.	Fecha	#Muest	G prom y °T	MODELO 1		MODELO 2		MODELO3	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.
1	13_11_2018	1506	768 (26,9°C) (picos)	1. 8,19% 2. 8,03% 3. 7,83%	1. 6,61% 2. 6,46% 3. 6,50%	1. 6,95% 2. 6,79% 3. 6,70%	1. 6,61% 2. 6,46% 3. 6,47%	1. 7,79% 2. 7,63% 3. 7,51%	1. 6,67% 2. 6,51% 3. 6,53%
2	20_11_2018	334	993 (27,4°C)	3,21%	4,83%	3,50%	4,55%	3,69%	4,70%
3	22_11_2018	299	1107 (28,9°C)	19,82%	16,32%	13,90%	16,21%	13,72%	16,09%
4	29_11_2018	435	403 (22°C)	8,09%	2,63%	2,88%	2,59%	6,06%	2,74%
5	04_12_2018	877	587 (22,8°C)	6,77%	3,18%	3,30%	3,18%	4,76%	3,26%
6	13_12_2018	475	1217-647 (25,1°C) 0-70_1347 71-200_980 201-476_643	8,54% 16,84% 14,92% 3,46%	6,90% 12,96% 10,51% 3,70%	6,65% 12,36% 10,56% 3,37%	6,88% 13,03% 10,56% 3,61%	6,23% 11,56% 11,14% 2,58%	6,83% 12,81% 10,50% 3,60%

**Tabla 4.16.** Errores en condiciones de cortocircuito del PF de 50W.

CONDICIONES DE CORTOCIRCUITO							
#	Fecha	#Muestras	G prom y °T	MODELO 1		MODELO 2	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.
2	20_11_2018	326	931 (26°C)	2,27%	7,49%	2,25%	6,79%
3	22_11_2018	197	1143 (30,3°C)	6,12%	12,44%	5,91%	11,53%
4	29_11_2018	250	385 (19,1°C)	3,56%	2,24%	3,35%	1,91%
5	04_12_2018	518	848-418 (23,9°C)	11,66%	10,54%	11,64%	10,63%
6	13_12_2018	393	537 ( 24,2°C) (1 pico)	6,50%	2,92%	6,47%	2,95%

**Tabla 4.17.** Errores en condiciones de circuito abierto del PF de 50W.

CONDICIONES DE CIRCUITO ABIERTO					
#	Fecha	#Muestras	G prom y °T	MODELO 2	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.
2	20_11_2018	344	1006 (27,3°C)	81,96%	89,69%
3	22_11_2018	188	1159 (32,2°C)	87,32%	93,24%
4	29_11_2018	224	389 (19,9°C)	39,62%	62,46%
5	04_12_2018	-	-	-	-
6	13_12_2018	119	483 ( 24,3°C)	63,14%	79,07%

- La estimación de parámetros utilizando la herramienta de Matlab-Simulink (Estimador de parámetros) se la hizo en base a la prueba 5 realizada el 04-12-2018.

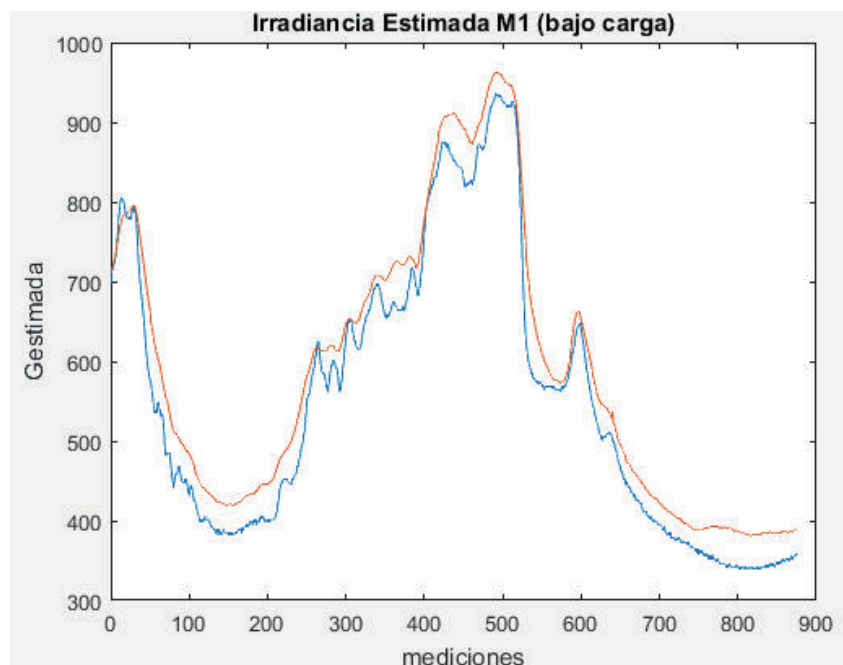
#### **Análisis.-**

Se puede determinar que los errores en condiciones de bajo carga, sin tomar en cuenta las estimaciones realizadas, son bajos; aproximadamente 10%. Una vez estimados los parámetros, de las tres condiciones de conexión operativa, cuando se trabaja en condiciones de carga, se tiene mejores resultados, ya que se obtuvieron errores menores

al 5%, lo que no sucede con las otras dos condiciones de: cortocircuito y circuito abierto y se tiene errores muy altos, cuando se trabaja en condiciones de cortocircuito la  $I_{sc}$  es variable, es decir, cuando se tiene valores bajos de irradiancia los valores estimados son menores a los simulados y al trabajar en condiciones de irradiancia altas (aproximadamente  $1050 \text{ W/m}^2$ ) los valores estimados son mayores a los simulados. En condiciones de circuito abierto se presentan errores muy altos esto debido a que el voltaje de circuito abierto no depende de la variación de la irradiancia sino de la temperatura, estos errores altos también se presenta en los demás paneles fotovoltaicos.

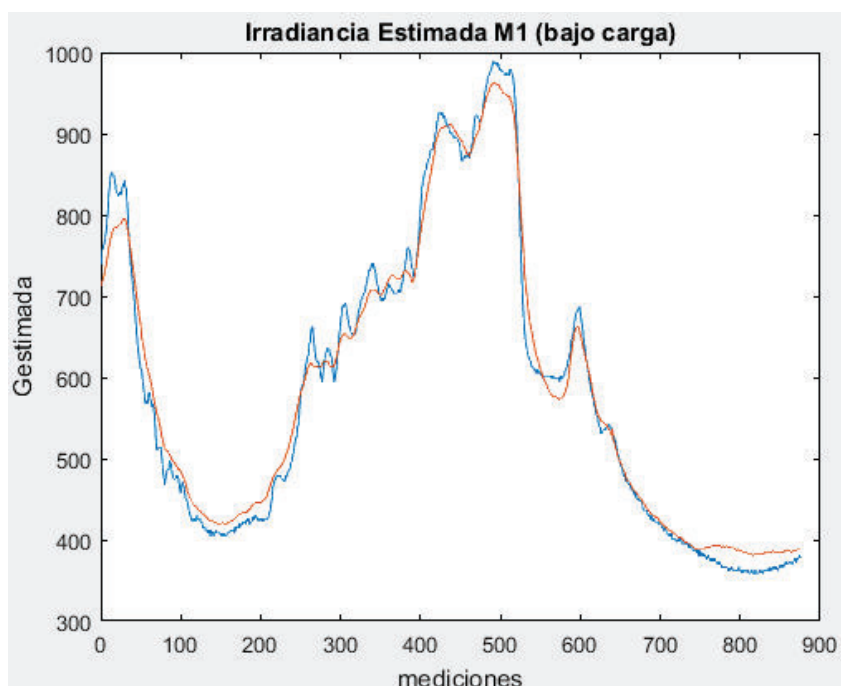
En la tabla 4.15, se puede apreciar en la prueba 3, que existen errores altos, esto se debe a que simplemente el panel fotovoltaico ya no puede entregar más potencia, por lo que llega a un punto de saturación, cuando opera a valores de irradiancia superiores a  $1100 \text{ W/m}^2$  (en el caso del panel de 50W). En la prueba 1, se tiene tres valores de errores ya que se aumentó el intervalo de tiempo de adquisición con el fin de reducir determinados picos que se presentan para minimizar aún más los errores.

Se presentan las gráficas de la irradiancia solar estimada (azul) y medida (naranja), para que se pueda apreciar, la diferencia entre los resultados teniendo en cuenta los parámetros ideales y los parámetros estimados y ver como el error disminuye. Como ejemplo se toma la prueba realizada el 04\_12\_2018, al panel de 50W, en condiciones bajo carga.



**Figura 4.21.** Irradiancia estimada y simulada del PF de 50W (sin estimaciones de parámetros). Elaboración propia.





**Figura 4.22.** Irradiancia estimada y simulada del PF de 50W (con estimaciones de parámetros). Elaboración propia.

#### 4.5.2 Resultados del panel fotovoltaico de 80W (Panel 1)

**Tabla 4.18.** Pruebas realizadas al panel fotovoltaico 1 de 80W.

PANEL 80W (Panel 1)							
	Fecha	Tiempo de adquisición de datos	# pruebas	Condiciones operativas			Archivos Excel
1	04_10_2018	Cada 12 seg	2 pruebas	BC (a)	CC	CA	En 1 archivo
2				BC (b)	CC	CA	En 1 archivo
3	11_10_2018	Cada 12 seg	2 pruebas	BC (a)	CC	CA	En 1 archivo
4				BC (b)	CC	CA	En 1 archivo
5	13_11_2018	Cada 1 seg	1 pruebas	BC			En 1 archivo
6	20_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC	CC	CA	En 3 archivos
7	22_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC	CC	CA	En 3 archivos

**Tabla 4.19.** Errores en condiciones bajo carga del PF1 de 80W.

CONDICIONES BAJO CARGA									
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 1		MODELO 2		MODELO3	
				Sin Esti.	Con Estim.	Sin Esti.	Con Estim.	Sin Esti.	Con Estim.
1	04_10_2018	78	641 cte (28,8°C)	17,44%	3,86%	16,01%	3,85%(4.0)	16,59%	4,05%
2	04_10_2018	40	247 cte (24,8°C)	17,32%	2,50%	15,90%	2,72%( 2.04)	17,02%	1,95%
3	11_10_2018	53	508 cte (22,7°C)	22,65%	4,82%	21,18%	4,44%(6.51)	22,01%	4,94%
4	11_10_2018	54	451 cte (23,9°C)	20,17%	1,79%	18,75%	1,62%	19,61%	2,24%
5	13_11_2018	745	707 cte (29,1°C)	18,72%	4,31%	17,15%	4,44%	17,51%	4,20%
6	20_11_2018	286	851 cte (25,4°C)	15,56%	4,14%	13,76%	4,54%	14,25%	4,94%
7	22_11_2018	295	1120 picos (31,4°C)	19,18%	1,70% 1,53%(5:5) 1,46%(10:10)	16,98%	1,88% 1,68% 1,60%	15,95%	2,52% 2,29% 2,12%

**Tabla 4.20.** Errores en condiciones de cortocircuito del PF1 de 80W.

CONDICIONES DE CORTO CIRCUITO							
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 1		MODELO 2	
				Sin Esti.	Con Estim.	Sin Etim.	Con. Estim.
1	04_10_2018	77	641 cte (28,8°C)	8,68%	14,14%	8,95%	12,76%
2	04_10_2018	40	247 cte (24,8°C)	7,44%	14,11%	7,39%	13,22%
3	11_10_2018 (a)	53	508 cte (22,7°C)	20,77%	3,08%	20,54%	3,35%
4	11_10_2018 (b)	53	451 cte (23,9°C)	18,79%	1,24%	18,67%	1,14%
6	20_11_2018	293	902 cte (28,8°C)	10,86%	9,90%	11,07%	8,72%
7	22_11_2018	174	964 irregular (29,7°C)	14,63%	11,97%	14,88%	11,45%

**Tabla 4.21.** Errores en condiciones de circuito abierto del PF1 de 80W.

CONDICIONES DE CIRCUITO ABIERTO					
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 2	
				Sin Esti.	Con Estim
1	04_10_2018	78	641 cte (28,8°C)	52,95%	77,06%
2		41	247 cte (24,8°C)	15,36%	64,52%
3	11_10_2018	53	508 cte (22,7°C)	40,13%	69,11%
4		54	451 cte (23,9°C)	40,29%	71,22%
6	20_11_2018	283	913 cte (28,5°C)	61,87%	78,76%
7	22_11_2018	180	398 cte (29,6°C)	58,33%	84,64%

**Análisis.-**

En este caso se han trabajado con las dos metodologías de adquisición de datos cada 12 segundos (pruebas de color verde) y cada segundo (color rojo). Como se puede apreciar en la tabla 4.19, donde se considera la condición bajo carga, los errores sin tomar en cuenta la estimación de parámetros es de aproximadamente 20%, y al estimar parámetros, los errores son menores al 5%, debido a que la irradiancia solar, ha sido constante (no se tuvieron variaciones bruscas de irradiancia solar al momento de realizar las pruebas), en las otras dos condiciones de conexión cortocircuito y circuito abierto se tienen errores muy altos debido a los aspectos explicados anteriormente.

### 4.5.3 Resultados del panel fotovoltaico de 80W (Panel 2)

**Tabla 4.22.** Pruebas realizadas al panel fotovoltaico 2 de 80W.

PANEL 80W (Panel 2)							
	Fecha	Tiempo de adquisición de datos	# pruebas	Condiciones operativas			Archivos Excel
1	10_07_2018	Cada 12 seg	1 pruebas	BC	CC	CA	En 1 archivo
2	26_07_2018	Cada 2 seg	2 pruebas	BC (a)			En 1 archivo
3		Cada 12 seg		BC (b)	CC	CA	En 1 archivo
4	04_10_2018	Cada 12 seg	1 pruebas	BC (a)	CC	CA	En 1 archivo
5	11_10_2018	Cada 12 seg	2 pruebas	BC (a)	CC	CA	En 1 archivo
6				BC (a)	CC	CA	En 1 archivo
7	06_11_2018	Cada 3 seg	1 pruebas	BC			En 1 archivo
8	13_11_2018	Cada 1 seg	1 pruebas	BC			En 1 archivo
9	20_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC	CC	CA	En 3 archivos
10	22_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC	CC	CA	En 3 archivos

**Tabla 4.23.** Errores en condiciones bajo carga del PF2 de 80W.

CONDICIONES BAJO CARGA									
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 1		MODELO 2		MODELO3	
				Sin Esti.	Con Estim.	Sin Esti.	Con Estim.	Sin Esti.	Con Estim.
1	26_07_2018	180	1133(31,3°C) cte	20,36%	1,33%	18,59%	1,41%	18,07%	1,39%
2	26_07_2018	30	1173(32,5°C)cte	22,92%	4,39%	20,88%	4,67%	19,80%	4,63%
3	04_10_2018	77	995(31,9°C)cte	20,04%	3,72%	18,59%	3,76%	18,27%	3,77%
4	11_10_2018	53	575(26,6)cte	21,34%	2,87%	19,99%	2,89%	20,76%	2,89%
5	11_10_2018	53	570(24,3°C)cte	17,96%	3,27%	16,46%	3,33%	17,24%	3,20%
6	06_11_2018	362	702(26,2°C)	20,04%	5,92%	18,51%	5,93%	19,12%	5,93%
7	13_11_2018	870 145 (6s) 96 (6s)	723(25,9°C) varios picos	1. 18,84% 2. 19,03% 3. 18,78%	1. 4,16% 2. 3,97% 3. 3,92%	1. 17,31% 2. 17,49% 3. 17,22%	1. 4,16% 2. 3,98% 3. 3,92%	1. 17,95% 2. 18,13% 3. 17,87%	1. 4,17% 2. 3,99% 3. 3,92%
8	20_11_2018	298	1095(26,9°C)cte	14,68%	5,07%	12,77%	5,07%	12,57%	5,12%
9	22_11_2018	236	194(24,8°C)cte	19,82%	1,27%	18,19%	1,33%	19,56%	1,16%

**Tabla 4.24.** Errores en condiciones de cortocircuito del PF2 de 80W.

CONDICIONES DE CORTO CIRCUITO							
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 1		MODELO 2	
				Sin Esti.	Con Estim.	Sin Etim.	Con. Estim.
3	26_07_2018 (b)	29	1173(32,5°C)cte	13,13%	9,39%	13,44%	8,79%
4	04_10_2018	76	995(31,9°C)cte	11,38%	13,92%	11,72%	13,28%
5	11_10_2018 (a)	53	575(26,6)cte	17,92%	3,45%	18,05%	3,11%
6	11_10_2018 (b)	53	570(24,3°C)cte	14,89%	7,11%	14,83%	6,88%
9	20_11_2018	259	839(27,9°C)cte	11,27%	11,66%	11,45%	11,13%
10	22_11_2018	190	278(23,1°C) cte	9,52%	13,87%	9,17%	13,99%

**Tabla 4.25.** Errores en condiciones de circuito abierto del PF2 de 80W.

CONDICIONES DE CIRCUITO ABIERTO					
#	Fecha	#Muestras	G (prom) y T°	MODELO 2	
				Sin Esti.	Con. Estim
3	26_07_2018 (b)	30	1173(32,5°C)cte	73,25%	85,95%
4	04_10_2018	77	995(31,9°C)cte	68,02%	83,79%
5	11_10_2018	53	575(26,6)cte	53,24%	77,69%
6		53	570(24,3°C)cte	46,78%	72,58%
9	20_11_2018	279	784(30,1°C)cte	66,47%	84,06%
10	22_11_2018	197	223(22,5°C)cte	27,95%	73,84%

- La estimación de parámetros utilizando la herramienta de Matlab-Simulink (Estimador de parámetros) se la hizo en base a la prueba 6 realizada el 06-11-2018.

#### **Análisis.-**

Los resultados obtenidos con el segundo panel de 80W, son muy parecidos al primero, los mejores resultados se obtienen al trabajar en condiciones bajo carga teniendo errores menores al 5% (una vez que se estimaron los parámetros), en las otras condiciones de operación se tienen errores muy elevados

### **4.5.4 Resultados panel fotovoltaico de 250W**

**Tabla 4.26.** Pruebas realizadas al panel fotovoltaico de 250W.

PANEL 250W					
	Fecha	Tiempo de adquisición de datos	# pruebas	Condiciones operativas	Archivos Excel
1	08_11_2018	Cada 1 seg	2 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
2		Cada 1 seg		BC (b)	En 1 archivo
3	22_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
				CC (1)	En 1 archivo
				CA (1)	En 1 archivo
4	29_11_2018	Cada 1 seg	3 pruebas	BC (1)	En 1 archivo
				CC (1)	En 1 archivo
				CA (1)	En 1 archivo
5	13_12_2018	Cada 1 seg	1 prueba	BC	En 1 archivo

**Tabla 4.27.** Errores en condiciones bajo carga del PF de 250W.

CONDICIONES BAJO CARGA									
#	Fecha	#Muestras	G prom y °T	MODELO 1		MODELO 2		MODELO3	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.
1	08_11_2018	1452	571 cte (24,6 °C)	8,60%	1. 2,98% 2. 2,95% 3. 2,88%	7,15%	1. 2,97% 2. 2,94% 3. 2,86%	7,83%	1. 3,04% 2. 3,01% 3. 2,92%
2	08_11_2018	863	488 con picos (23,6 °C)	10,75%	1. 3,89% 2. 3,88% 3. 3,88%	9,21%	1. 3,79% 2. 3,81% 3. 3,77%	10,03%	1. 3,90% 2. 3,89% 3. 3,84%
3	22_11_2018	259	1063 cte (26,2 °C)	5,91%	0,95%	4,59%	0,91%	4,47%	0,93%
4	29_11_2018	585	473 cte (21,9°C)	10,29%	3,01%	8,62%	2,78%	9,48%	2,93%
5	13_12_2018	561	706 varios picos (26,7°C)	12,22%	1. 6,72% 2. 6,67% 3. 6,13%	11,03%	1. 6,78% 2. 6,74% 3. 6,18%	11,47%	1. 6,83% 2. 6,77% 3. 6,19%



**Tabla 4.28.** Errores en condiciones de cortocircuito del PF de 250W.

CONDICIONES DE CORTO CIRCUITO							
#	Fecha	#Muestras	G prom y °T	MODELO 1		MODELO 2	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.	Sin Estim.	Con Estim.
3	22_11_2018	198	1107 (27,5°C)	1,15%	7,58%	1,18%	6,99%
4	29_11_2018	306	444 (23 °C)	8,93%	1,54%	8,82%	1,79%

**Tabla 4.29.** Errores en condiciones de circuito abierto del PF de 250W.

CONDICIONES DE CIRCUITO ABIERTO					
#	Fecha	#Muestras	G prom	MODELO 2	
			W/m <sup>2</sup>	Sin Estim.	Con Estim.
2	22_11_2018	194	1087 cte (30°C)	79,64%	91,74%
3	29_11_2018	357	475 cte (22,5°C)	48,94 %	78,16%

- La estimación de parámetros utilizando la herramienta de Matlab-Simulink (Estimador de parámetros) se la hizo en base a la prueba 1 realizada el 08-11-2018.

#### **Análisis.-**

El intervalo de tiempo en la adquisición de datos es de 1 segundo, similar al panel de 50W. Al igual que con los otros paneles, los mejores resultados se obtienen cuando se trabaja en condiciones bajo carga, teniendo errores menores al 5% (una vez estimados los parámetros), con excepción de la prueba 5 debido a que hubo variaciones bruscas de irradiancia solar al momento de realizar la prueba, lo que representan transitorios, por lo que el error es mayor, en las otras condiciones de operación (cortocircuito y circuito abierto) se tienen errores altos.

- **Análisis general de los resultados obtenidos**

Como se puede observar en las tablas en condiciones bajo carga, para los paneles fotovoltaicos de 50W y 250W, el error promedio de la irradiancia solar estimada en condiciones de parámetros simulados es menor al 10%; para los otros dos paneles de 80W, es aproximadamente el 20%. Sin embargo, estos errores se reducen considerablemente al utilizar el estimador de parámetros obteniendo errores promedios menores al 5%. En condiciones de carga se obtienen los mejores resultados, ya que su comportamiento es más estable y predecible, esto cuando se trabaja en el punto de potencia máxima, lo que se logra con los inversores en los sistemas fotovoltaicos.

Para el modelo de estimación solar basado en medidas de la corriente de cortocircuito, no se logra alcanzar errores menores al 5%, por lo contrario, se tiene valores elevados, y esto se debe a que la corriente de cortocircuito tiene un comportamiento distinto a diferentes niveles de irradiancia solar a los que está sometido el panel fotovoltaico. A niveles altos, los valores estimados de irradiancia solar son muy cercanos a los valores medidos con el piranómetro; cuando el nivel de irradiancia solar disminuye, los valores estimados de irradiancia solar disminuyen y se alejan de las mediciones reales. Los modelos 1 y 2 de estimación de irradiancia, que están basados en la medición de la corriente de cortocircuito hacen que el modelo inicial se simplifica lo que significa que hay ciertos parámetros que no se toman en cuenta.

El modelo de estimación de irradiancia solar basado en mediciones de voltaje de circuito abierto presenta errores demasiado elevados, esto se debe el voltaje de circuito abierto no es directamente proporcional a la variación de la irradiancia solar, como lo es la corriente de cortocircuito; el voltaje de circuito abierto es más dependiente de la variación de temperatura del panel fotovoltaico. Por lo tanto, al tener una variación de irradiancia solar, la variación del voltaje de circuito abierto será despreciable. Para tener una idea, se presenta un ejemplo utilizando la simulación del modelo de estimación solar basada en las mediciones de circuito abierto se tiene que: a una temperatura de 25°C y un voltaje de 22V para el caso del PF de 80W, la irradiancia solar estimada será de 1000W/m<sup>2</sup>; en las mismas condiciones de temperatura con un voltaje de 21,7V la irradiancia será de 811W/m<sup>2</sup>, lo que significa que al disminuir el voltaje un 1,36%, implica una reducción de la irradiancia de 18,9%. Debido a esto el modelo que considera las mediciones de voltaje de circuito abierto presenta errores muy elevados y es un modelo que no se puede utilizar para estimar la irradiancia solar.

Haciendo un análisis entre los tres modelos de estimación de irradiancia solar en condiciones bajo carga, sin tomar en cuenta la estimación de parámetros, el modelo que menor error presenta es el modelo 2, sin embargo, cuando se realiza la estimación de parámetros utilizando el “Estimador de Parámetros” de Matlab-Simulink, no existe una diferencia significativa, entre los tres modelos, sin embargo, los modelos 2 y 3 presentan mejores resultados, esto dependerá de cómo se realiza la estimación de parámetros en Matlab-Simulink.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Se presentan diferentes modelos matemáticos para estimar la irradiancia solar que son obtenidos a partir de la ecuación de la corriente de salida del panel fotovoltaico considerando determinados circuitos equivalentes del panel y bajo diferentes condiciones de operación (bajo carga, cortocircuito y circuito abierto) en función de mediciones de voltaje, corriente y temperatura. Estos modelos se han validado mediante la comparación de los valores estimados de irradiancia solar y valores medidos con un piranómetro, mediante pruebas bajo condiciones reales de operación teniendo resultados óptimos al trabajar en condiciones bajo carga.
- Un estudio y análisis de los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos a través de los diferentes circuitos equivalentes, en condiciones estándar de prueba (STC), no es el más apropiado para determinar el comportamiento preciso de los paneles fotovoltaicos, debido a que se obtienen las curvas características en un condiciones estándar, lo que, representa un comportamiento ideal, y su comportamiento en condiciones reales será distinto. El estimador de parámetros de Matlab/Simulink permite estimar un modelo matemático del panel fotovoltaico más preciso ya que este estimador trabaja directamente con valores reales medidos de voltaje, corriente y temperatura obtenidos mediante pruebas de campo.
- Un modelo más preciso del panel fotovoltaico que represente un comportamiento más real se lo puede obtener por dos métodos: el primer método es obtener las curvas características de potencia y corriente en función del voltaje bajo condiciones de irradiancia y temperatura constantes, lo cual se consigue en un laboratorio o se lo puede hacer mediante pruebas de campo, pero tener un nivel constante de irradiancia solar es muy complicado ya que depende de las condiciones atmosféricas. El segundo método se lo puede realizar utilizando un estimador de parámetros como se lo hizo en este trabajo de titulación, con el cual se obtuvo los parámetros del modelo y de esta manera obtener las curvas características del panel fotovoltaico en condiciones reales de trabajo.
- De los tres modelos de estimación de irradiancia presentados, los modelos 2 y 3 en condiciones bajo carga se aproximaron muy bien a los valores reales medidos mediante un piranómetro, teniendo un promedio de error menor al 5%, por lo que

estos modelos de estimadores pueden ser aplicables a sistemas fotovoltaicos, para monitorear la irradiancia solar o para estudios de diseños de arquitecturas de conversión. Con lo cual, será posible utilizar los paneles fotovoltaicos como instrumentos de medida de la irradiancia solar.

- Al estimar los nuevos parámetros del panel fotovoltaico en condiciones reales de operación, y obtener la curva de la potencia en función del voltaje en la cual se puede apreciar cual es la máxima potencia que puede entregar el panel fotovoltaico, si esta potencia es menor a la potencia nominal del panel (indicada en los datos de placa), se puede determinar que los paneles fotovoltaicos han sufrido una degradación debido al trabajo de generación de energía eléctrica a los que son sometidos, ya que los valores medidos de voltaje y corriente son menores a los nominales.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda hacer un análisis más profundo del funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, para simular un comportamiento más preciso del panel fotovoltaico el circuito equivalente expandido-modelo de un diodo, presenta mejores resultados ya que es un modelo que considera casi todos los parámetros reales del panel fotovoltaico.
- Para mejorar los resultados de las estimaciones de irradiancia solar, se recomienda trabajar con un piranómetro que esté integrado al circuito electrónico que mide y almacena las variables eléctricas del panel fotovoltaico, ya que se puede controlar los tiempos de adquisición, y tener señales más continuas de irradiancia solar, con las que se puedan hacer mejores análisis y tener mejores resultados.
- Para estimar la irradiancia solar se recomienda utilizar un modelo que considera la medición de temperatura, voltaje y corriente bajo carga del panel fotovoltaico, ya que se obtuvieron mejores resultados. Y no sería apropiado aplicar los modelos de estimación que consideran corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto por dos razones: presentan errores muy elevados y no se aprovecharía la potencia del panel fotovoltaico si se encontrara en cortocircuito o circuito abierto.
- Para estudios futuros se recomienda partir de los modelos 2 o 3, ya sea para mejorarlos o para utilizar la información de la irradiancia solar estimada, en estudios de eficiencia y rendimiento en sistemas fotovoltaicos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. N. Tiwari, A. Tiwari, y Shyam, "*Handbook of Solar Energy*". Singapore: Springer Singapore, 2016.
- [2] F. Blaabjerg y D. M. Ionel, "*Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®*", 1.<sup>a</sup> ed. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2017.
- [3] F. Vignola, J. Michalsky, y T. Stoffel, "*Solar and Infrared Radiation Measurements*". CRC Press, 2012.
- [4] V. Vigni *et al.*, "Proof of Concept of an Irradiance Estimation System for Reconfigurable Photovoltaic Arrays", *Energies*, vol. 8, n.º 7, pp. 6641-6657, jun. 2015.
- [5] R. H. G. Tan, P. L. J. Tai, y V. H. Mok, "Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement", en *2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 1-4.
- [6] A. Laudani, F. R. Fulginei, A. Salvini, M. Carrasco, y F. Mancilla-David, "A fast and effective procedure for sensing solar irradiance in photovoltaic arrays", en *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy, 2016, pp. 1-4.
- [7] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, y P. Surekha, "*Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*". Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [8] V. Quaschnig, "*Understanding renewable energy systems*", Revised edition. London ; New York: Routledge, Taylor & Francis Group, Earthscan from Routledge, 2016.
- [9] E. Universitat Politècnica de València, "Universitat Politècnica de València", *Ing. Agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014.
- [10] D. Myers, *Solar Radiation: "Practical Modeling for Renewable Energy Applications"* Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2017.
- [11] L. Dunn, M. Gostein, y K. Emery, "Comparison of pyranometers vs. PV reference cells for evaluation of PV array performance", en *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, TX, USA, 2012, pp. 002899-002904.
- [12] C. B. Yahya, "Performance monitoring of solar photovoltaic systems using reference cells", en *2008 International Conference on Microelectronics*, Sharjah, United Arab Emirates, 2008, pp. 445-449.
- [13] R. Benghanem y A. Maafi, "Measurement system for solar radiation", en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Sensing, Processing, Networking. IMTC Proceedings*, Ottawa, Ont., Canada, 1997, vol. 2, pp. 932-935.
- [14] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, y T. Ajzoul, "New model to estimate and evaluate the solar radiation", *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 3, n.º 2, pp. 225-234, dic. 2014.
- [15] D. F. A. Riza, S. I. ul H. Gilani, y M. S. Aris, "Hourly Solar Radiation Estimation Using Ambient Temperature and Relative Humidity Data", *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, pp. 188-193, 2011.
- [16] H. Al-Taani y S. Arabasi, "Solar Irradiance Measurements Using Smart Devices: A Cost-Effective Technique for Estimation of Solar Irradiance for Sustainable Energy Systems", *Sustainability*, vol. 10, n.º 2, p. 508, feb. 2018.
- [17] J. Meydbray y P. E. Labs, "Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?: Preprint", p. 7.
- [18] G. M. Masters, "Renewable and Efficient Electric Power Systems", p. 676.
- [19] «9722 0081 METEODATA 3000C SOLAR-es.pdf». .
- [20] N. S. Husain, N. A. Zainal, B. S. Mahinder Singh, N. M. Mohamed, y N. Mohd Nor, "Integrated PV based solar insolation measurement and performance monitoring

- system", en *2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering*, Penang, Malaysia, 2011, pp. 710-715.
- [21] M.-S. Kang, H. Kang, y E.-C. Choi, "Monitoring technology available for measuring multiple-photovoltaic panel arrays", en *IEEE 2013 Tencon - Spring*, Sydney, Australia, 2013, pp. 460-464.
  - [22] A. Rivai y N. A. Rahim, "A low-cost photovoltaic (PV) array monitoring system", en *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, Lankgwari, Malaysia, 2013, pp. 169-174.
  - [23] B. Patnaik, J. D. Mohod, y S. P. Duttgupta, "Distributed multi-sensor network for real time monitoring of illumination states for a reconfigurable solar photovoltaic array", en *2012 1st International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS-1)*, Pune, India, 2012, pp. 106-109.
  - [24] A. Tahri, T. Oozeki, y A. Draou, "Monitoring and Evaluation of Photovoltaic System", *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 456-464, 2013.
  - [25] R. A. Rahman, S. I. Sulaiman, A. M. Omar, Z. M. Zain, y S. Shaari, "Performance analysis of 45.36 kWp grid-connected photovoltaic systems at Malaysia Green Technology Corporation", en *2011 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment (ISESEE)*, Malacca, Malaysia, 2011, pp. 1-3.
  - [26] H. Liu *et al.*, "The Impact of Haze on Performance Ratio and Short-Circuit Current of PV Systems in Singapore", *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, n.º 6, pp. 1585-1592, nov. 2014.
  - [27] E. Ghiani, F. Pilo, y S. Cossu, "On the performance ratio of photovoltaic installations", en *2013 IEEE Grenoble Conference*, Grenoble, France, 2013, pp. 1-6.
  - [28] J. F. Ferichola, "Caracterización de módulos fotovoltaicos", p. 153.
  - [29] D. La Manna, V. Li Vigni, E. Riva Sanseverino, V. Di Dio, y P. Romano, "Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 412-426, may 2014.
  - [30] C. A. Ramos-Paja, J. D. Bastidas, A. J. Saavedra-Montes, F. Guinjoan-Gispert, y M. Goetz, "Mathematical model of total cross-tied photovoltaic arrays in mismatching conditions", en *2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, Barranquilla, Colombia, 2012, pp. 1-6.
  - [31] L. F. L. Villa, D. Picault, B. Raison, S. Bacha, y A. Labonne, "Maximizing the Power Output of Partially Shaded Photovoltaic Plants Through Optimization of the Interconnections Among Its Modules", *IEEE J. Photovolt.*, vol. 2, n.º 2, pp. 154-163, abr. 2012.
  - [32] K. A. Kim, S. Lertburapa, Chenyang Xu, y P. T. Krein, "Efficiency and cost trade-offs for designing module integrated converter photovoltaic systems", en *2012 IEEE Power and Energy Conference at Illinois*, Champaign, IL, USA, 2012, pp. 1-7.
  - [33] A. Elasser, M. Agamy, J. Sabate, R. Steigerwald, R. Fisher, y M. Harfman-Todorovic, "A comparative study of central and distributed MPPT architectures for megawatt utility and large scale commercial photovoltaic plants", en *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA, 2010, pp. 2753-2758.
  - [34] Z. Zhang, M. Chen, W. Chen, y Z. Qian, "Design and Analysis of the synchronization control method for BCM/DCM current-mode flyback micro-inverter", en *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 2013, pp. 68-75.
  - [35] Y.-J. Wang y P.-C. Hsu, "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells", *Energy*, vol. 36, n.º 5, pp. 3069-3078, may 2011.
  - [36] D. Nguyen y B. Lehman, "An Adaptive Solar Photovoltaic Array Using Model-Based Reconfiguration Algorithm", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n.º 7, pp. 2644-2654, jul. 2008.



- [37] M. Alahmad, M. A. Chaaban, S. Kit Lau, J. Shi, y J. Neal, "An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time", *Sol. Energy*, vol. 86, n.º 3, pp. 951-963, mar. 2012.
- [38] J. Sierra, "Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones", p. 10.
- [39] C. Magistris, "Producción de Módulos Fotovoltaicos TRINA SOLAR", p. 67.
- [40] "Científicos chinos crean paneles solares que funcionan con lluvia o niebla", *www.efe.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.efe.com/efe/america/tecnologia/cientificos-chinos-crean-paneles-solares-que-funcionan-con-lluvia-o-niebla/20000036-3226823>. [Accedido: 17-oct-2018].
- [41] Y. Liu *et al.*, "Integrating a Silicon Solar Cell with a Triboelectric Nanogenerator via a Mutual Electrode for Harvesting Energy from Sunlight and Raindrops", *ACS Nano*, vol. 12, n.º 3, pp. 2893-2899, mar. 2018.
- [42] "KC120-1.pdf". [En línea]. Disponible en: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC120-1.pdf>
- [43] "How a Photovoltaic System Produces Electricity". [En línea]. Disponible en: <https://blog.aurorasolar.com/how-a-photovoltaic-system-produces-electricity/>. [Accedido: 17-oct-2018].
- [44] M. Tech Scholar, KIIT University, Bhubaneswar (Odisha), S. Shubhra, y D. C. K. P. Dr. C.K. Panigrahi, "Studies on the Effect of Shadows at the Output of PV modules", *Indian J. Appl. Res.*, vol. 4, n.º 2, pp. 7-9, oct. 2011.
- [45] "Gestión de la sombra - Funcionamiento eficiente de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas con OptiTrac Global Peak", p. 6.
- [46] A. Wagner, *Photovoltaik Engineering: die Methode der effektiven Solarzellen-Kennlinie*. Berlin ; New York: Springer, 1999.
- [47] S. Said, A. Massoud, M. Benammar, y S. Ahmed, "A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox", p. 11.
- [48] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, y Y.-J. Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK", p. 7, 2008.
- [49] H. Yatimi, E. Aroudam, y M. Louzazni, "Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK", *MATEC Web Conf.*, vol. 11, p. 03018, 2014.
- [50] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, y E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, n.º 5, pp. 1198-1208, may 2009.
- [51] M. A.-E.-H. Mohamed, "Solar Irradiance Estimation of Photovoltaic Module based on Thevenin Equivalent Circuit Model", p. 7, 2015.
- [52] S. Kittisontirak, A. Bupi, P. Chinnavornrungssee, K. Sriprapha, P. Thajchayapong, y W. Titiroongruang, "An Improved PV Output Forecasting Model by Using Weight Function: A Case Study in Cambodia", *Int. J. Photoenergy*, vol. 2016, pp. 1-10, 2016.
- [53] L. R. D. Reis, R. J. Camacho, y D. F. Novacki, "The Newton Raphson Method in the Extraction of Parameters of PV Modules", *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, n.º 15, pp. 634-639, abr. 2017.
- [54] H. Ibrahim y N. Anani, "Variations of PV module parameters with irradiance and temperature", *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 276-285, oct. 2017.
- [55] A. Yahfddhou, A. K. Mahmoud, y I. Youm, "Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method", p. 12.
- [56] J. A. Gow y C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies", *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 146, n.º 2, p. 193, 1999.
- [57] D. Bonkougou, Z. Koalaga, y D. Njomo, "Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB", vol. 3, n.º 3, p. 10, 2013.







- [58] U. P. Pagrut y A. S. Sindekar, "Parameter Calculation of PV Module by Simulation and Computation", vol. 5, n.º 4, p. 9.
- [59] N. M. Shannan, N. Z. Yahaya, y B. Singh, "Two diode model for parameters extraction of PV module", en *2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Johor Bahru, Malaysia, 2014, pp. 260-264.
- [60] K. Ishaque, Z. Salam, y Syafaruddin, "A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model", *Sol. Energy*, vol. 85, n.º 9, pp. 2217-2227, sep. 2011.
- [61] A. A. Elbaset, H. Ali, y M. A.-E. Sattar, "Modeling of Photovoltaic Module Based on Two-Diode Model", p. 9, 2015.
- [62] A. H. ALQahtani, "A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using matlab", en *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, China, 2012, pp. 1748-1753.
- [63] "MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink". [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/>. [Accedido: 21-sep-2018].
- [64] "DISACC\_00965\_DPA154.pdf". .
- [65] "Piranometro classe 1, uscita diretta". [En línea]. Disponible en: <http://www.lsi-lastem.it/it/componenti/sensori-per-misure-meteorologiche/radiazione-solare/radiazione-solare-irradianza-globale/radiometro-in-classe-1-iso9060/piranometro-classe-1-uscita-diretta>. [Accedido: 02-ene-2019].
- [66] "Parameter Estimation". [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/discovery/parameter-estimation.html>. [Accedido: 24-oct-2018].
- [67] "Arduino - Home". [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/>. [Accedido: 21-sep-2018].
- [68] "Tutorial sensor de corriente ACS712". [En línea]. Disponible en: [https://naylampmechatronics.com/blog/48\\_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html](https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html). [Accedido: 26-sep-2018].
- [69] "Divisor de voltaje", *Khan Academy*. [En línea]. Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/a/ee-voltage-divider>. [Accedido: 27-sep-2018].
- [70] "Amazon.com: Perfect-Prime TL4200, 4 Wires Class A RTD PT100 Temperature Sensor/Probe, -200~200°C/-328~392°F, 2 Meter Long: Kitchen & Dining". [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/Perfect-Prime-TL4200-Temperature-200-200%C2%B0C-328-392%C2%B0F/dp/B075QC4KMF/ref=sr\\_1\\_1?ie=UTF8&qid=1529935499&sr=8-1&keywords=perfect-prime%20tl4200%2C%204%20cables%20Class%20A](https://www.amazon.com/Perfect-Prime-TL4200-Temperature-200-200%C2%B0C-328-392%C2%B0F/dp/B075QC4KMF/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1529935499&sr=8-1&keywords=perfect-prime%20tl4200%2C%204%20cables%20Class%20A). [Accedido: 27-sep-2018].
- [71] "Temperature Measurement Using RTDs", p. 22. [En línea]. Disponible en: [https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD\\_Temperature\\_Measurement\\_917A.pdf](https://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf)
- [72] "SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf". [En línea]. Disponible en: [http://www.ekt2.com/pdf/42\\_WHITE\\_\\_5V\\_1K\\_PM.pdf](http://www.ekt2.com/pdf/42_WHITE__5V_1K_PM.pdf)
- [73] "Como controlar un relé con un transistor | INVENTABLE.EU", *Inventable*. [En línea]. Disponible en: <https://www.inventable.eu/controlar-rele-con-transistor/>
- [74] "Proteus 8.6 Free Download". [En línea]. Disponible en: <https://proteus.soft112.com/>. [Accedido: 02-ene-2019].
- [75] M. Miñano, «Beginners Guide to PLX DAQ v2 by Net^Devil».
- [76] "Catálogos Paneles Solares", *Zytech Solar - Energía Solar FV*. [En línea]. Disponible en: <http://zytech.es/catalogos/>
- [77] "YGE\_60\_Cell\_Series\_EN.pdf". [En línea]. Disponible en: [http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE\\_60\\_Cell\\_Series\\_EN.pdf](http://www.yinglisolar.com/assets/uploads/products/downloads/YGE_60_Cell_Series_EN.pdf)

- [78]"SOLAR PANEL EXMORK 80P.pdf". [En línea]. Disponible en: <http://proviento.com.ec/SOLAR%20PANEL%20EXMORK%2080P.pdf>
- [79]M. T. M. Larocca y C. A. Cadena, "MODELO DE ENVEJECIMIENTO DE UN MÓDULO FV. ESTUDIO PRELIMINAR", p. 9.
- [80]M. Sidrach-de-Cardona, P. Sánchez-Friera, M. Piliouge, J. Pelaez, y J. Carretero, "DEGRADACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO TRAS 12 AÑOS DE OPERACIÓN EN ESPAÑA", p. 9.
- [81]J. Y. Ye, T. Reindl, A. G. Aberle, y T. M. Walsh, "Performance Degradation of Various PV Module Technologies in Tropical Singapore", *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, n.º 5, pp. 1288-1294, sep. 2014.
- [82]D. Quansah, M. Adaramola, G. Takyi, y I. Edwin, "Reliability and Degradation of Solar PV Modules—Case Study of 19-Year-Old Polycrystalline Modules in Ghana", *Technologies*, vol. 5, n.º 2, p. 22, may 2017.

## 7. ANEXOS

### ANEXO I. Hoja de datos proporcionado por los fabricantes

- Panel fotovoltaico de 50 W de marca “ZYTECH SOLAR” [76]

 <a href="http://www.zytech.es">www.zytech.es</a>	
Model	ZT50s
Maximum Power(P <sub>m</sub> )	50 W
Power tolerance	± 3%
Open-circuit voltage(V <sub>oc</sub> )	22.43 V
Short-circuit current(I <sub>sc</sub> )	3.01 A
Voltage at P <sub>max</sub> (V <sub>mp</sub> )	18.61 V
Current at P <sub>max</sub> (I <sub>mp</sub> )	2.69 A
Weight	6.0kg
Module dimension	740 × 545 × 35 mm
Fuse rating	10A
Maximum system voltage	600 V
Temp coefficient of V <sub>oc</sub>	- 2.3 mV / °C
Temp coefficient of I <sub>sc</sub>	+1.1mA / °C
Temp coefficient of Power	- 0.48 %/°C
All technical data at Standard test condition: AM=1.5 E=1000W/m² T <sub>p</sub> =25°C	
   IEC61215	

Panel fotovoltaico 50W “ZYTECH SOLAR”		
Datos		Características
Tipo	-	Mono-Si
Número de celdas en serie	$N_s$	36
Potencia máxima	$P_{max}$	50 [W]
Tolerancia de la potencia	-	3 %
Voltaje a máxima potencia	$V_m$	18,61 [V]
Corriente a máxima potencia	$I_m$	2,69 [A]
Voltaje de circuito abierto	$V_{oc}$	22,43 [V]
Corriente de cortocircuito	$I_{sc}$	3,01 [A]
Coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito	$\mu_{Isc}$	+1,1 [mA/°C]
Coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	$\mu_{Voc}$	-2,3 [mV/°C]
Dimensiones		740x545x35 mm

- Paneles fotovoltaicos de 80 W de marca “EXMORCK” [78]

**EXMORK**

艾莫克新能源

POLYCRYSTALLINE SOLAR PANEL  
EXMORK 80 W<sub>p</sub>/12VDC



**Specifications:**

Type: Polycrystalline PV Module 12V  
Model: 80P  
Maximum Power: 80 W<sub>p</sub> ±3%  
Open Circuit Voltage: 22VDC  
Maximum Power Voltage: 17.5 VDC  
Short Circuit Current: 4.91 A  
Maximum Power Current: 4.57 A  
Dimensions: 920 x 670 x 35 mm  
Junction Box with 2 Bypass Diodes



**WARRANTY:**

Technical defects: 2 years  
Power degradation: 10 year 90%, 25 years 80%



For over 10 years we have been specializing in wind and water power products. We service everything we sell. Scores of companies come and go, but we have consistently been in the market to take care of our customers. We use high quality cells from SunTech: Good quality, low-priced: -renewable power need not cost the earth!

## TEST REPORT OF EX 80P

TEST CONDITION :1000w/m2, AM1.5, 25°C

Parameters	type	EX-80P
		Poly-crystalline silicon
Maximum power (watt)	W	80
Production tolerance		+3% /-3%
Maximum power voltage	V	17.6V
Maximum power current	A	4.57A
Open circuit voltage	V	22.0V
Short circuit current	A	4.91A
Size of module (wide and high)		920*670*35mm
Frame(type, material and thickness)		Anodized Alum. Alloy 35mm thickness
Number of cells		36pcs, 156*96 poly
By pass Schottky diode(2pcs)		10A
Type of junction box		TUV certified junction box
Certificates		CE, ROHS
Cable type and length, connector type		-
Maximum system voltage		600V
Temperature coefficient of Isc		±0.05%
Temperature coefficient of Voc		-0.33%
Temperature coefficient of power		-0.23%
Temperature coefficient of Imp		+0.08%
Temperature coefficient of Vm		-0.33%
NOCT(nominal operating cell temperature)		45 (± )
Insulation		100MOhm
Voltage standoff		AC2000V, DC 3000V
Wind bearing		60m/s(200kg/sq.m)
Impact resistance hail impact test		227g steel ball fall down from 1m height
Encapsulated with toughened glass		Low iron tempered glass with thickness of 3.2mm,light transmittance above91%
Superstrate in front		Hi-sheet RC 02B (0.45mm thick)/Japan
Backside foil		PTL3-38/75(0.17mm thick),Krempel/Germany
Conversion efficiency		Cell conversion efficiency 15.75%
Container		20'(256pcs) 40'(512pcs)
Quality guarantee		2years product warranty,10years 90% and 25yesr 80% of the power



- Panel fotovoltaico de 250 W de marca “YINGLI SOLAR” [77]

## YGE 60 Cell 40mm SERIES

Powered by **YINGLI**

YL260P-29b  
YL255P-29b  
YL250P-29b  
YL245P-29b  
YL240P-29b  
YL235P-29b  
YL230P-29b



### ABOUT YINGLI GREEN ENERGY

Yingli Green Energy Holding Company Limited (NYSE: YGE) is one of the world's largest fully vertically integrated PV manufacturers, which markets its products under the brand "Yingli Solar". With over 4.5GW of modules installed globally, we are a leading solar energy company built upon proven product reliability and sustainable performance. We are the first renewable energy company and the first Chinese company to sponsor the FIFA World Cup™.

### PERFORMANCE

- High efficiency, multicrystalline silicon solar cells with high transmission and textured glass deliver a module efficiency of up to 16.2%, minimizing installation costs and maximizing the kWh output of your system per unit area.
- Tight positive power tolerance of 0W to +5W ensures you receive modules at or above nameplate power and contributes to minimizing module mismatch losses leading to improved system yield.
- Top ranking in the "TÜV Rheinland Energy Yield Test" and the "PHOTON Test" demonstrates high performance and annual energy production.

### RELIABILITY

- Tests by independent laboratories prove that Yingli Solar modules:
  - ✓ Fully conform to certification and regulatory standards.
  - ✓ Withstand wind loads of up to 2.4kPa and snow loads of up to 5.4kPa, confirming mechanical stability.
  - ✓ Successfully endure ammonia and salt-mist exposure at the highest severity level, ensuring their performance in adverse conditions.
- Manufacturing facility certified by TÜV Rheinland to ISO 9001:2008, ISO 14001:2004 and BS OHSAS 18001:2007.



### WARRANTIES

- 10-year limited product warranty<sup>1</sup>.
- Limited power warranty<sup>1</sup>: 10 years at 91.2% of the minimal rated power output, 25 years at 80.7% of the minimal rated power output.

<sup>1</sup>In compliance with our Warranty Terms and Conditions.

### QUALIFICATIONS & CERTIFICATES

IEC 61215, IEC 61730, MCS, CE, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, BS OHSAS 18001:2007, SA 8000, PV Cycle



[YINGLISOLAR.COM](http://YINGLISOLAR.COM)

# YGE 60 Cell 40mm SERIES

## ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module type			YLxxxP-29b (xxx=P <sub>max</sub> )						
Power output	P <sub>max</sub>	W	260	255	250	245	240	235	230
Power output tolerances	ΔP <sub>max</sub>	W	0 / 5						
Module efficiency	η <sub>m</sub>	%	15.9	15.6	15.3	15.0	14.7	14.4	14.1
Voltage at P <sub>max</sub>	V <sub>mpp</sub>	V	30.9	30.6	30.4	30.2	29.5	29.5	29.5
Current at P <sub>max</sub>	I <sub>mp</sub>	A	8.41	8.32	8.24	8.11	8.14	7.97	7.80
Open-circuit voltage	V <sub>oc</sub>	V	38.9	38.7	38.4	37.8	37.5	37.0	37.0
Short-circuit current	I <sub>sc</sub>	A	8.98	8.88	8.79	8.63	8.65	8.54	8.40

STC: 1000W/m<sup>2</sup> irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.  
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	P <sub>max</sub>	W	188.3	184.7	181.1	177.9	174.3	170.7	167.0
Voltage at P <sub>max</sub>	V <sub>mpp</sub>	V	28.1	27.9	27.6	27.2	26.6	26.6	26.6
Current at P <sub>max</sub>	I <sub>mp</sub>	A	6.70	6.63	6.56	6.54	6.56	6.42	6.29
Open-circuit voltage	V <sub>oc</sub>	V	35.9	35.7	35.4	34.5	34.2	33.8	33.8
Short-circuit current	I <sub>sc</sub>	A	7.27	7.19	7.12	6.99	7.01	6.92	6.81

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m<sup>2</sup> irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

## THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 ± 2
Temperature coefficient of P <sub>max</sub>	γ	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of V <sub>oc</sub>	β <sub>Voc</sub>	%/°C	-0.33
Temperature coefficient of I <sub>sc</sub>	α <sub>Isc</sub>	%/°C	0.06
Temperature coefficient of V <sub>mpp</sub>	β <sub>Vmpp</sub>	%/°C	-0.45

## OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000V <sub>DC</sub>
Max. series fuse rating	15A
Limiting reverse current	15A
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	5400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

## CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions / number of busbars)	60 / multicrystalline silicon / 156mm x 156mm / 2 or 3
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color / edge sealing)	anodized aluminum alloy / silver / clear / silicone or tape
Junction box (protection degree)	≥ IP65
Cable (length / cross-sectional area)	1100mm / 4mm <sup>2</sup>
Plug connector (type / protection degree)	MC4 / IP67 or YT08-1 / IP67 or Amphenol H4 / IP68

- Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
- The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.

service@yinglisolar.com

Tel: 0086-312-8929802

**YINGLISOLAR.COM**

© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | DS\_YGE60Cell-29b\_40mm\_EU\_EN\_201211\_v02.20

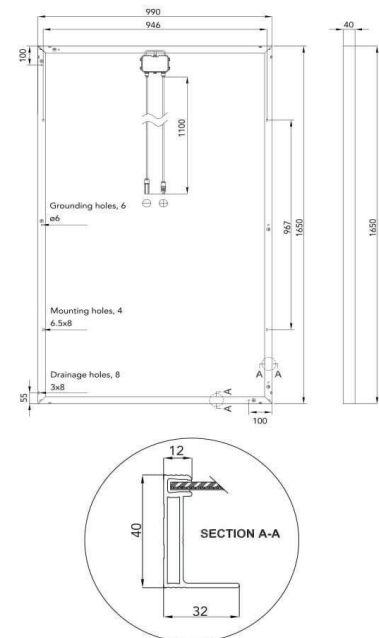
## GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1650mm / 990mm / 40mm
Weight	19.1kg

## PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	26
Number of pallets per 40' container	28
Packaging box dimensions (L / W / H)	1700mm / 1150mm / 1190mm
Box weight	534kg

Unit: mm



**Warning:** Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Our Partners:



## ANEXO II. Código de programación Newton Raphson

A continuación se describirá las partes principales del código del método de Newton Raphson para la solución del sistema de ecuaciones, realizado en Matlab. Toda la metodología está basada en la descrita en el punto 3.3.1.2.

- Se presenta el encabezado del código donde la principal función es el limpiar la pantalla de trabajo cada vez que se ejecute el código.

```
clc;
clear;
disp('      Escuela Politécnica Nacional      ')
disp('              TESIS              ')
disp('NOMBRE: CUSHICÓNDOR C SANTIAGO')
disp('TEMA:OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DESCONOCIDOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO')
disp('MEDIANTE N. RAPHSO')
fprintf('\n\n')
```

- Se declara y da valores a todos los parámetros a utilizarse, que proporciona el fabricante del panel fotovoltaico en las hojas de datos.

```
%%
% SE DECLARA LAS VARIABLES CONOCIDAS OBTENIDAS DEL DATASHEET (HOJA DE DATOS)

% DATOS DE PLACA DEL PANEL FOTOVOLTAICO
% PARÁMETROS EN STC (STANDAR TEST CONDITION)

Pm=80;           % potencia maxima experimental
Vmstc=17.5;      % Voltaje a potencia maxima [V] en STC
Imstc=4.57;      % corriente a potencia maxima [A] en STC
Vocstc=22;       % Voltaje de circuito abierto en STC
Iscstc=4.91;     % Corriente de cortocircuito en STC

k=1.38*10^-23;   % constante de Boltzmann
q=1.6*10^-19;    % carga del electrón
Ns=36;           % número de celdas conectadas en serie

% OTROS PARÁMETROS
Tc= (25)+273;    % temperatura medida de la celda [°K]
G=1000;          % Irradiacion solar medida [W/m^2]
Vt=Tc*k/q;       % Voltaje termico
```



- Se declara las variables que se van a calcular (los parámetros desconocidos), mediante la función “syms”, que permite designar las variables que serán incógnitas, en el sistema de ecuaciones.

```
%%
% SE DEFINE LAS VARIABLES QUE SE OBTENDRÁN COMO SOLUCIÓN

syms Ifot Is A Rs Rp % declaro las variables que utilizare en el programa

%DONDE:
% Ifot -corrinete fotovoltaica del panel fotovoltaico [A]
% Is -corriente inversa de saturación del diodo en STC [A]
% Rs -resistencia en serie [ohm]
% Rp -resistencia en paralelo [ohm]
% A -factor de idealidad del diodo
```

- Se define las cinco funciones que forman parte del sistema de ecuaciones, las cuales de describieron anteriormente, en el punto 1.3.3.3 de cómo obtenerlas.

```
% SE DEFINE LAS 5 FUNCIONES:
% FUNCIONES OBTENIDAS DE 5 CARACTERÍSTICAS DE LA CURVA I-V
% DEL PANEL FOTOVOLTAICO

%F1; representa un punto, en condición de circuito abierto
F1=Ifot-(Is*(exp(Vocstc/(A*Ns*Vt))-1))-(Vocstc/Rp);

%F2; representa un punto, en condición de corto circuito
F2=Ifot-(Is*(exp((Iscstc*Rs)/(A*Ns*Vt))-1))-((Iscstc*Rs)/Rp)-Iscstc;

%F3; representa un punto en condición de máxima potencia
F3=Ifot-(Is*(exp((Vmstc+(Imstc*Rs))/(A*Ns*Vt))-1))-...
    ((Vmstc+(Imstc*Rs))/Rp)-Imstc;

% %F4 representa, la derivada dP/dV = 0 en el MPP
F4=(Imstc/Vmstc)-((Is)*((1/(Vt*Ns))*(1-(Imstc*Rs/Vmstc))*(exp((Vmstc+...
    (Imstc*Rs)/(A*Vt*Ns)))))-(1/Rp)*(1-(Imstc*Rs/Vmstc))));

% %F5 el reciproco de la pendiente de la curva I-V en el punto de
% cortocircuito
F5=(1/Rp)-(Is*((1/(Vt*Ns))*(1-(Rs/Rp))*(exp((Iscstc*Rs)/(A*Ns*Vt)))))-...
    ((1/Rp)*(1-(Rs/Rp))));
```

- Se define la matriz de las funciones, y determino el Jacobiano de dicha matriz, para lo cual se usa la función "diff" que proporciona Matlab, para el cálculo de las derivadas parciales de las funciones.

```
F=[F1;F2;F3;F4;F5];
% DETERMINAR EL GRADIENTE
%diff(F,variable)==> Funcion diff me entrega la derivada de una funcion con
%respecto a una variable asignada (derivada parcial)

Jac=[diff(F1,Ifot),diff(F1,Is),diff(F1,A),diff(F1,Rs),diff(F1,Rp);
diff(F2,Ifot),diff(F2,Is),diff(F2,A),diff(F2,Rs),diff(F2,Rp);
diff(F3,Ifot),diff(F3,Is),diff(F3,A),diff(F3,Rs),diff(F3,Rp);
diff(F4,Ifot),diff(F4,Is),diff(F4,A),diff(F4,Rs),diff(F4,Rp);
diff(F5,Ifot),diff(F5,Is),diff(F5,A),diff(F5,Rs),diff(F5,Rp)];
```

- Se asigna valores iniciales coherentes a las variables desconocidas, para iniciar el proceso de iteración, estos valores deben ser cercanos a los esperados, para que la convergencia del sistema sea más rápida y sea menor el tiempo de compilación. Y además se define la tolerancia del sistema, generalmente es de un valor muy pequeño, mientras menor sea la tolerancia el resultado esperado será mejor.

```
%% INICIALIZACIÓN DE LAS VARIABLES DESCONOCIDAS
% Se asigna valores coherentes a las variables para la primera iteración
%      Ifot      Is      A      Rs      Rp
ini=[ 4.91      (7*10^-7)      1.5      0.01      100];

% HALLAR LOS VALLORES DEL VECTOR "Delta X" QUE SEAN MENOR A LA TOLERANCIA
% Se define la tolerancia
tol = 10^-6;
iter = 1; % se inicializa le número de iteraciones en 1
% se define el número maximo de iteraciones
itermax = 50;
```

- Se presenta el lazo, en el cual se realizan las iteraciones, basado en el método de Newton Raphson, para obtener la solución del sistema de ecuaciones.

```

while iter<itermax
    % Se obtiene el Jacobiano de la matriz con los valores iniciales
    Jacx=subs(Jac,[Ifot Is      A      Rs      Rp],ini);

    % Se obtiene la matriz de las funciones con los valores iniciales
    Fx=subs(F,      [Ifot Is      A      Rs      Rp],ini);
    % Se obtiene la matriz de variaciones
    delta=-inv(Jacx)*Fx;
    % Se obtiene valores con 6 digitos de la matriz de variaciones
    p=vpa(delta,6);

    Z=abs(p); % Se obtiene el valor absoluto de la matriz de variaciones

    if Z(1)>tol || Z(2)>tol|| Z(3)>tol||Z(4)>tol || Z(5)>tol
        %Se obtiene los valores de la nueva iteración
        inix=ini'+delta;
        % Se obtiene los valores con 5 digitos decimales
        x=vpa(inix,5);
        % Se inicializa los valores de entrada para una nueva iteración
        ini=x';
        iter=iter+1;

    else

        fprintf('\n\n')
        disp('***** ')
        disp('Solucion encontrada ')
        disp('en la iteracion #')
        disp(iter)

        break

    end

    if iter > itermax
        disp('Diverged')
        break
    end
end
end

```

- Si se cumple con las condiciones del lazo anterior, se manda a imprimir el vector de las variables desconocidas a la ventana de comandos.

```
disp('Siendo: Ifot,    Is,    A,    Rs,    Rp')
solucion=vpa(ini,5);%se obtiene los valores finales con 5 dígitos decimales
disp(solucion)% imprime la solucion del sistema de ecuaciones
```

- Finalmente se imprime la solución del sistema de ecuaciones.

(Como ejemplo de tiene los parámetros del panel fotovoltaico de 80W)

```
Escuela Politécnica Nacional
      TESIS
NOMBRE: CUSHICÓNDOR C SANTIAGO
TEMA:OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DESCONOCIDOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO
MEDIANTE N. RAPHSON
```

```
*****
```

```
Solucion encontrada
en la iteracion #
      6
```

```
Siendo: Ifot,    Is,    A,    Rs,    Rp
[ 4.9112, 1.0994e-6, 1.5554, 0.040834, 172.93]
```

## ANEXO III. Simulaciones en Simulink de los modelos matemáticos del panel fotovoltaico en base a los métodos de estimación de irradiancia solar

A continuación se presentan las simulaciones de los 3 modelos:

### 1. Modelo 1

$$I = \left( I_{sc} * \frac{G}{G_{STC}} \right) - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)$$

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\left( \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right)}$$

### 2. Modelo 2

$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{Isc} (T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

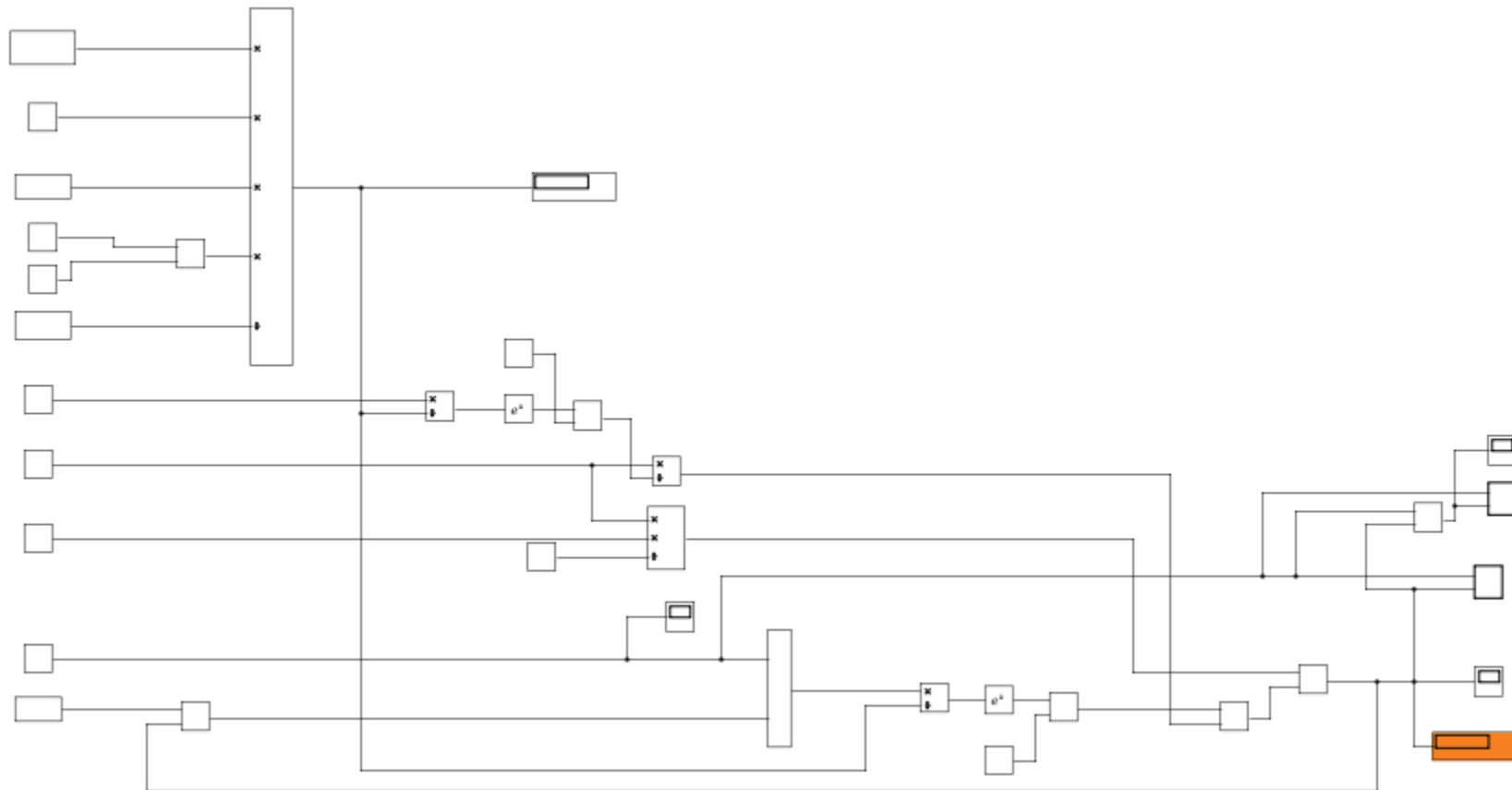
$$I_s = I_{s\ STC} \left( \frac{T_C}{T_{C\ STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q E_g}{A k} \left( \frac{1}{T_{C\ STC}} - \frac{1}{T_C} \right) \right]$$

### 3. Modelo 3

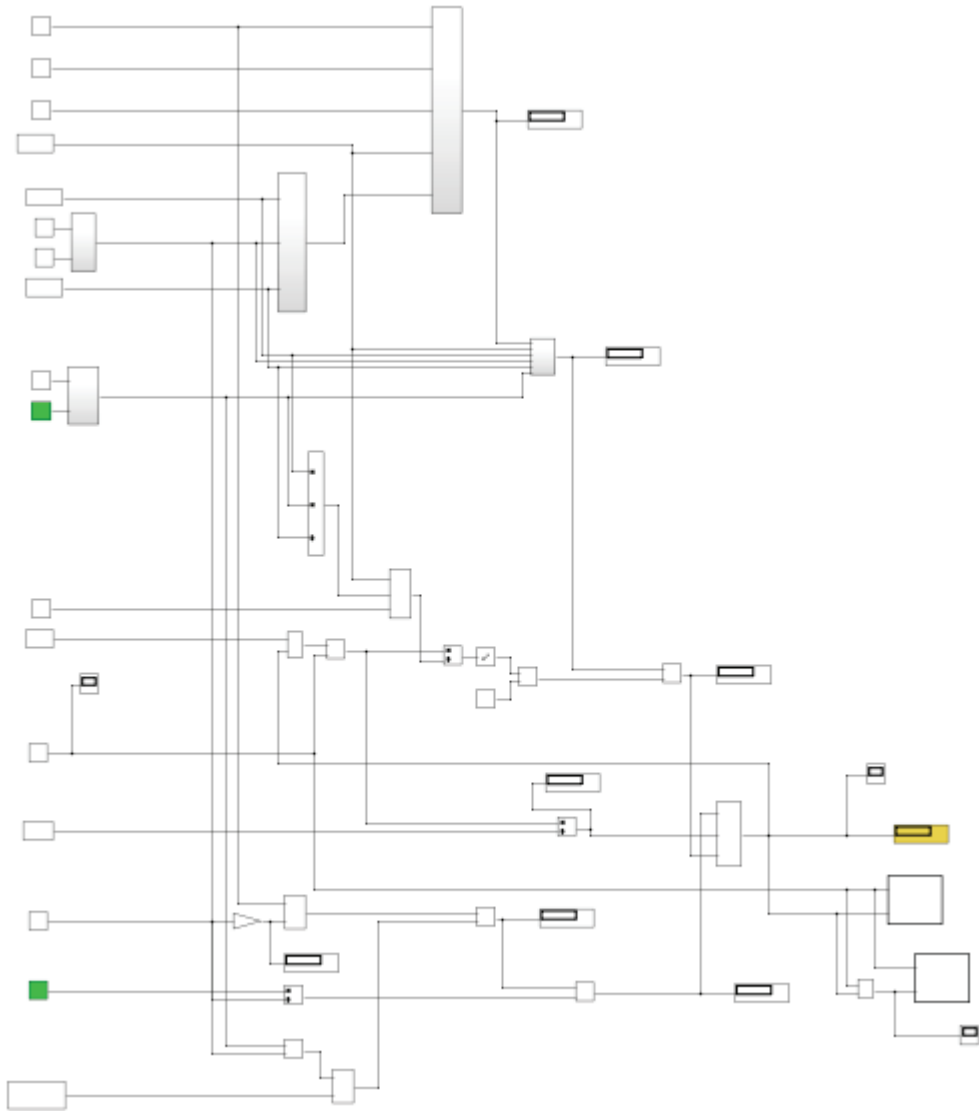
$$I = \left\{ \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) [I_{fot\ STC} + \mu_{Isc} (T_C - T_{C\ STC})] \right\} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + (I * R_s)}{N_s * A * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{p\ STC} * \frac{G_{STC}}{G}}$$

$$I_s = I_{s\ STC} * \left( \frac{T_C}{T_{C\ STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q}{A * K} * \left( \frac{E_{g\ STC}}{T_{C\ STC}} - \frac{E_g}{T_C} \right) \right]$$

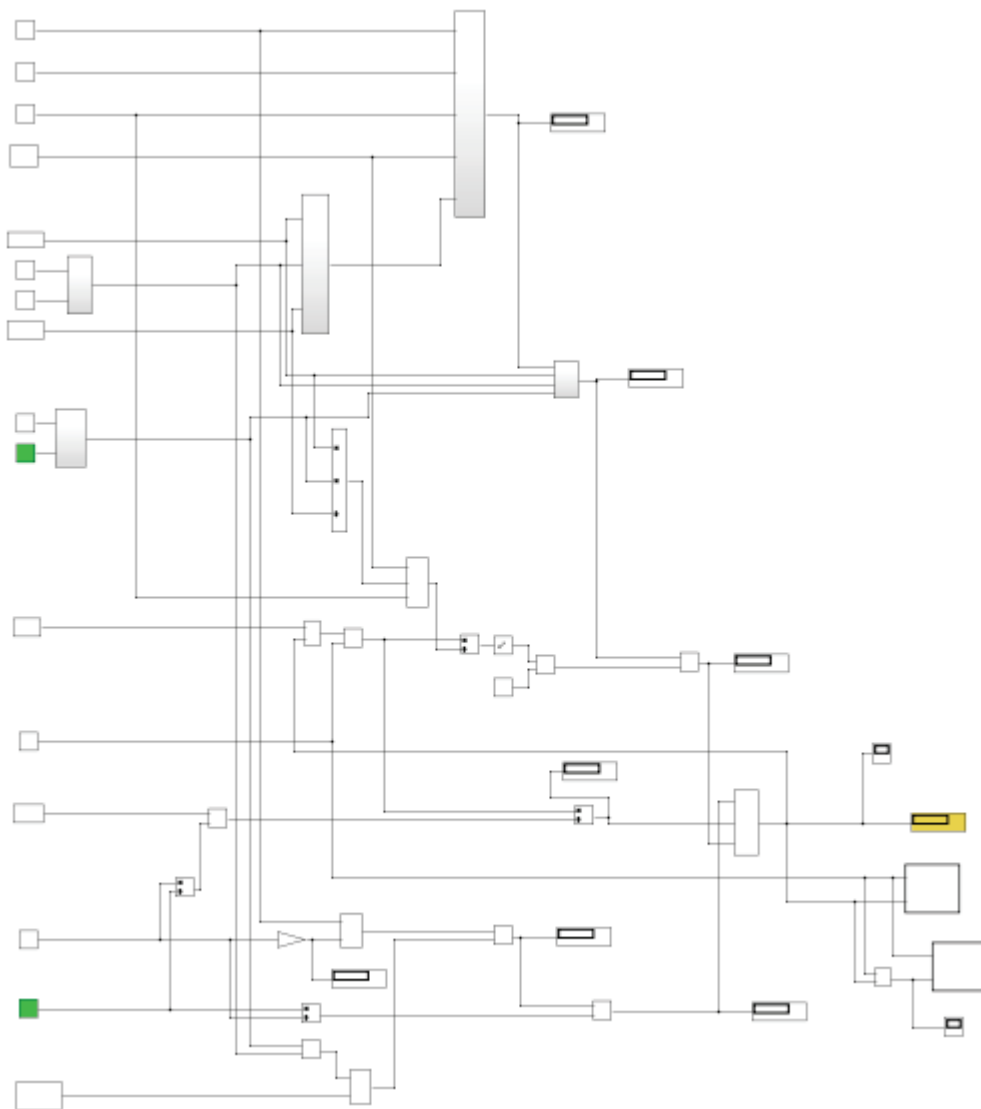
- Modelo 1



- Modelo 2

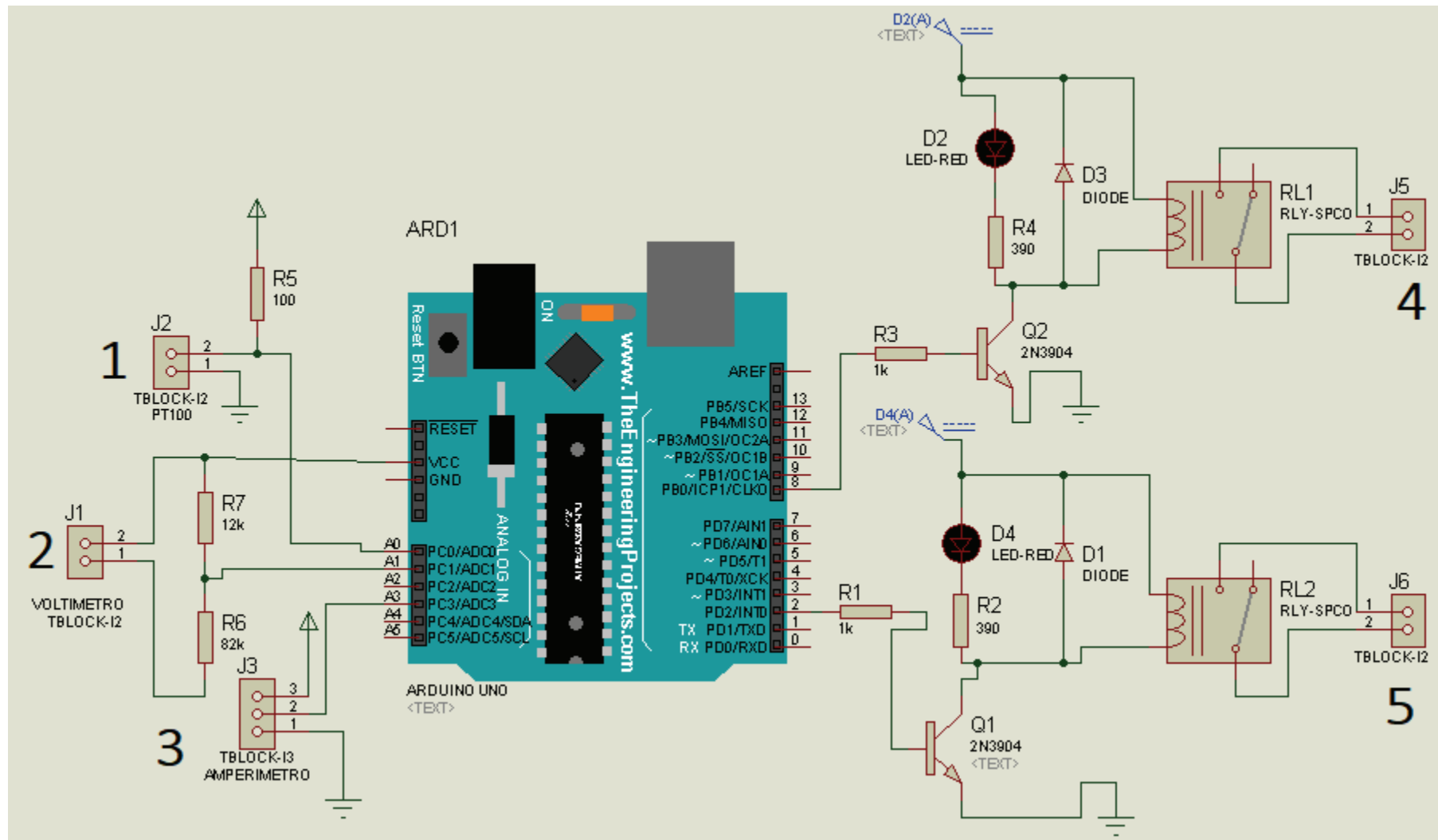


- Modelo 3





## ANEXO IV Circuito electrónico simulado en Proteus



## ANEXO V Código de programación del circuito electrónico en Arduino

A continuación se presenta el código de programación del circuito electrónico en Arduino capaz de medir las variables como: corriente, voltaje y temperatura para almacenarlas en un documento Excel, y a su vez que permita cambiar de estado al panel fotovoltaico a través de los relés.

- Primero se designan las variables, que se va a utilizar, como contadores, variables donde se va almacenar la señal de entrada y variables de salida [67].

```
//ASIGNACION DE VARIABLES GENERALES.
int i = 0; // Asigno una variable (i) para usarla como contador

// ASIGNACIÓN DE VARIABLES PARA LA PROGRAMACION DE LOS SWITCH'S
int INTE2 = 2;
int INTE1 = 8;

int ii=0;
int j=2;
int k=4;
int l=6;

//ASIGNACION DE VARIABLES PARA EL SENSOR DE VOLTAJE
int PinVoltaje= A1; // seleccionar la entrada análoga para el sensor de voltaje
int valorSensorVoltaje; // variable que almacena el valor (0 a 1023)
float voltaje; //variable de la salida de voltaje final---el voltaje (0.0 a 40.0V)

//ASIGNACION DE VARIABLES PARA EL SENSOR DE CORRIENTE
float Sensibilidad=0.066; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 20A

//ASIGNACION DE VARIABLES PARA EL SENSOR DE TEMPERATURA
float temperatura; //variable de la salida de temperatura final
float res,vin;
```

- Se realiza la configuración inicial, donde se realiza la conexión serial del Arduino, y la conexión serial para la comunicación con Excel, además de definir los puertos como salidas, para los relés [67].

```
void setup() {

    // abrir la conexion serial
    Serial.begin(9600);

    Serial.println("CLEARDATA"); // elimina todos los datos a partir de la fila 2
    //(LABEL)_ palabra clave para asignar los titulos en la fila 1
    // a partir de eso se nombra a cada columna separado de una coma. (",")
    Serial.println("LABEL,FECHA,HORA,CONTADOR,VOLTAJE,CORRIENTE,TEMPERATURA");

    //***** Swuitch's
    pinMode(INTE2, OUTPUT); //definir pin 2 como salida ()
    pinMode(INTE1, OUTPUT); //definir pin 8 como salida ()
}
```

- Se inicia definiendo el lazo repetitivo con la función (void loop), a partir del cual de programa la operación de los relés, el cual permite que se activen o desactiven cada cierto tiempo.

```
void loop() {

    // ***** Sintaxis para la operacion de los relés *****
    /**
    if(ii==j)
    {
        digitalWrite(INTE2, HIGH);
        j=j+6;
    }

    if(ii==k)
    {
        digitalWrite(INTE1, HIGH);
        k=k+6;
    }

    if(ii==l)
    {
        digitalWrite(INTE2, LOW);
        digitalWrite(INTE1, LOW);
        l=l+6;
    }
    /**/
    // *****
}
```

- Para el sensor de voltaje, el código es sencillo ya que el voltaje de entrada es proporcional al voltaje de ingreso al el Arduino (0 a 5V), en su entrada analógica y no es necesario realizar ninguna transformación adicional [67].

```
// **** Sintaxis para el sensor de voltaje ****

valorSensorVoltaje = analogRead(PinVoltaje); // realizar la lectura
voltaje = valorSensorVoltaje*40.0/1024.0; // cambiar escala a (0.0 - 40.0)

//*****
```

- Para el sensor de temperatura, es necesario tener presente la variación de la resistencia del PT100 y la ecuación de la expansión lineal de un metal, para obtener la temperatura del panel solar, en [71] se explica de una forma detallada las características de un PT100 en función de la variación de la temperatura.

```
// **** Sintaxis del PT100 sensor de temperatura ****
vin=0.0048875*analogRead(A0);
res=(vin*96.8)/(5-vin);
temperatura=((res/100)-1)*(1/(0.00385*1.8));
```

- Para la programación del sensor de corriente, es necesario obtener un promedio de una cantidad de medidas de corriente para reducir el ruido que presenta el sensor de corriente [68].

```
// **** Sintaxis del sensor de corriente ****

float corrientes=get_corriente(200);
//obtenemos la corriente promedio de 200 muestras

//*****
```

- Y finalmente se programa le código para enviar las mediciones a un archivo Excel [75], y se asigna el intervalo de tiempo para realizar cada acción (2 segundos).

```
// SINTAXIS PARA EL ENVIO DE INFORMACION DEL ARDUINO AL EXCEL

Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME," + i++ + "," + voltaje + "," + corrientes + "," + temperatura);
// Se usa ("String") para poder enviar al excel en forma de caracter

ii=ii+1;
// tiempo de retardo para que se ejecute cada acción
delay(2000); // retardo de 1000 [ms] (un segundo)
}
```

- El código de programación para el sensor se debe tomar en cuenta, la sensibilidad y las características del sensor que proporcionan los fabricantes [68].

```
// funcion de promedio de medidas para reducir el ruido del sensor de corriente
float get_corriente(int n_muestras)
{
    float valorSensorCorriente;
    float corriente=0;
    for(int i=0;i<n_muestras;i++)
    {
        valorSensorCorriente = analogRead(A3) * (5.0 / 1024.0);
        //Serial.print("SALIDA: ");
        //Serial.println(valorSensorCorriente);
        ////lectura del sensor
        corriente=corriente+(valorSensorCorriente-2.5)/Sensibilidad;
        //Ecuación para obtener la corriente
        // se le resta 2,5 ya que el sensor tiene los rangos de 0-2,5(I negativas)
        // & 2,5-5 (I positivas)
    }

    corriente=corriente/n_muestras;
    return(corriente+0.16);
}
```

## ANEXO VI Script realizado en Matlab para estimar la irradiancia solar

Como ejemplo se tiene el script para estimar la irradiancia solar utilizando el modelo 2 y en condiciones bajo carga.

- En primera instancia inicializan las variables

```
%% ESTIMADOR DE IRRADIANCIA MODELO 2 (BAJO CARGA)
% DATOS DE PLACA DEL PANEL FOTOVOLTAICO
Pm=50;           % potencia maxima experimental
Vmstc=18.61;     % Voltaje a potencia maxima [V] en STC
Imstc=2.69;      % corriente a potencia maxima [A] en STC
Uisc=1.1*10^-3;  % Coeficiente de temperatura de la Iscstc [A/°C]
Uvoc=-2.3*10^-3; % Coeficiente de temperatura del Vocstc [V/°C]
% EN ESTE CASO NO USO EN COEFICIENTE DE Voc (Porque estoy bajo carga)
%%
% PARÁMETROS EN STC (STANDAR TEST CONDITION)

Tcstc= 25+273;   % temperatura en condiciones estandar
k=1.38*10^-23;   % constante de Boltzmann
q=1.6*10^-19;    % carga del electrón
Ns=36;           % numero de celdas conectadas en serie
Gstc=1000;       % Irradiacion solar STC [W/m^2]

%%
% VARIABLES DE LA SOLUCIÓN DEL NEWTON RAPHSON

A = 1.3282;
Rp = 94.953;
Rs = 0.00032044;
Vocstc=22.43;
Iscstc= 3.01;

%%
% VOLTAJE TERMICO EN STC
Vtstc=Tcstc*k/q;      % Voltaje termico STC

%%
%PARÁMETROS MEDIDOS ADICIONAL
Ifotstc=Iscstc;
```

- Hace el llamado al archivo Excel para obtener las variables medidas.

```
%% BASE DE DATOS DE MATLAB:

%llamado de datos del excel al matlab
datos=xlsread('p50_13_12_1.xlsx','C201:G476');
% obtencion de las variables
Idato=datos(:,3);
Vdato=datos(:,2);
Tdato=datos(:,4);
indi=datos(:,1);
Irra=datos(:,5);

%***** CORRIENTE y VOLTAJE DE CIRCUITO- BAJO CARGA
cj=1; % contador j
% ci=4 en el vector de matlab (=3 en el indicador excel)
for(ci=1:1:length(Vdato))
    nmedidas1(cj)=cj;
    cj=cj+1;
end
```

- Ecuación para estimar la irradiancia solar en condiciones bajo carga

```
%% BASE DE DATOS DE MATLAB:

%llamado de datos del excel al matlab
datos=xlsread('p50_13_12_1.xlsx','C201:G476');
% obtencion de las variables
Idato=datos(:,3);
Vdato=datos(:,2);
Tdato=datos(:,4);
indi=datos(:,1);
Irra=datos(:,5);

%***** CORRIENTE y VOLTAJE DE CIRCUITO- BAJO CARGA
cj=1; % contador j
% ci=4 en el vector de matlab (=3 en el indicador excel)
for(ci=1:1:length(Vdato))
    nmedidas1(cj)=cj;
    cj=cj+1;
end
```

- Imprime los resultados

```

irradianciabc=Giv';
Irral;
errorl=((irradianciabc-Irral)./Irral)*100);

eabs=abs(errorl);
Gbajocarga=[Irral,irradianciabc,errorl,eabs]
e=mean(eabs)

figure(1)
plot(nmedidasl,irradianciabc,nmedidasl,Irral)
ylabel('Gestimada');
xlabel('mediciones');
title('Irradiancia Estimada M2 (bajo carga)');
%%
%% Siento Voco VOLTAJE MEDIDO EN CIRCUITO ABIERTO

%% ENVIO A EXCEL
xlswrite('errores_m2.xlsx',Gbajocarga,'Hojal','A2');
```



# ORDEN DE EMPASTADO



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
"CAMPUS POLITÉCNICO JOSÉ RUBÉN ORELLANA RICAURTE"

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

## ORDEN DE EMPASTADO

*De acuerdo con lo estipulado en el Art. 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por Consejo Politécnico en sesión extraordinaria del 29 de abril de 2015 y por delegación del Decano, una vez verificado el cumplimiento de formato de presentación establecido, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por:*

**SANTIAGO CUSHICONDOR COLLAGUAZO**

*Fecha de autorización: 15 de abril de 2019*



Paola P