

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PANELES SOLARES
POLICRISTALINOS EN FUNCIÓN DE HUMEDAD, IRRADIANCIA,
TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA DEL PANEL EN LA CIUDAD
DE POPAYÁN**



FABIÁN ANDRÉS PAREDES BUSTAMANTE

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO FÍSICO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2022**

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE PANELES SOLARES
POLICRISTALINOS EN FUNCIÓN DE HUMEDAD, IRRADIANCIA,
TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA DEL PANEL EN LA CIUDAD
DE POPAYÁN**



FABIÁN ANDRÉS PAREDES BUSTAMANTE

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO FÍSICO**

**DIRECTOR PhD. WILLFRAND PÉREZ URBANO
CODIRECTOR MSC. RODRIGO MONTAÑO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2022**

Nota de aceptación

Los directores y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación de este por el autor y lo encuentran satisfactorio.

Willfrand Pérez Urbano
Director

Rodrigo Montaña Fuentes
Codirector

Jurado

Jurado

ÍNDICE

ÍNDICE	ii
LISTA DE TABLAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE ANEXOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
CAPÍTULO 1	5
Fundamentos físicos y técnicos de los paneles fotovoltaicos.....	5
1. Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos	5
1.1. Efecto fotoeléctrico	5
1.2. Modelo de una celda solar fotovoltaica.....	6
2. Parámetros de medición en paneles solares fotovoltaicos	6
2.1. Eficiencia de un panel.....	7
2.2. Factor de forma	7
3. Otros parámetros.....	7
3.1. Parámetros a temperatura de celda constante e irradiancia variable..	7
4. Parámetros con temperatura de celda variable e irradiancia constante	8
5. Definiciones	9
5.1. Masas de aire	9
5.2. Radiación global	9
5.3. Irradiancia.....	9
5.4. Irradiación.....	9
CAPÍTULO 2	10
Procedimiento metodológico para estudiar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos policristalinos en condiciones reales de trabajo.	10
6. Localización.....	10
7. Diseño y construcción del sistema de medición:	10
7.1. Materiales.....	10
7.2. Programación Arduino	14
8. Caracterización de la generación eléctrica fotovoltaica.	15
8.1. Herramientas:.....	15
9. Sugerencia de fórmulas:.....	16

10. Otros procedimientos:.....	16
CAPÍTULO 3	17
Comportamiento de paneles solares fotovoltaicos policristalinos bajo condiciones reales de trabajo.....	17
11. Sistema de medición.....	17
12. Influencia de las variables climatológicas en la generación de energía eléctrica fotovoltaica.....	20
13. Construcción de modelos.	28
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA	32

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Características eléctricas y mecánicas panel 75Wp.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2 Características eléctricas y mecánicas panel 150Wp.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 3. Variación de la energía teórica respecto de la real obtenida para cada hora del día.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4. Valores estadístico P y t-student de las variables de estudio.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5 Comparación de los errores de algunos modelos estudiados.....</i>	<i>29</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 Sensor de radiación solar Davis 6450.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 a) Sensor de Corriente ACS712, b) Sensor de voltaje FZ0430.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4 Sensor de temperatura y humedad AM2301.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5 Arduino Mega2560.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6 a) Reloj RTC 1307, b) Modulo microSD, c) Relés opto-acoplados</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7 Diagrama de flujo para la programación Arduino.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8 Relación entre sensor Voltaje e instrumento patrón.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 Relación entre sensor Corriente e instrumento patrón.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10 Relación entre sensor de Humedad e instrumento patrón</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11 Relación entre sensor de Temperatura e instrumento patrón</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12 Distribución de los dispositivos, sin conexiones.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13 Tarjeta de alimentación y acondicionamiento de la señal</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14 Ejemplo de dos días de generación eléctrica.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 15 Ejemplo de potencia fotovoltaica e irradiancia en el transcurso del día.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 16. Ejemplo de potencia fotovoltaica y humedad en el transcurso del día.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 17 Curva característica de generación de corriente y potencia de un panel solar fotovoltaico.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18 Relación entre la corriente - humedad y corriente - temperatura panel.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 19 Relación entre la corriente - humedad y corriente - temperatura panel.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 20 Cambio de la humedad relativa en la ciudad de Popayán Fuente: Propia</i>	<i>25</i>
<i>Figura 21 Relación entre energía eléctrica fotovoltaica e irradiancia por día. Fuente: Propia.....</i>	<i>25</i>

<i>Figura 22 Relación entre la energía eléctrica fotovoltaica y la temperatura ambiente</i>	
.....	26
<i>Figura 23 Relación entre la energía eléctrica fotovoltaica y la humedad.</i>	26
<i>Figura 24 Relación entre la energía teórica y la energía real generada.</i>	27
<i>Figura 25 Gráfica de energía eléctrica fotovoltaica contra irradiación solar diaria</i>	30

LISTA DE ANEXOS

Dada la longitud de los anexos estos se condensan en el CD adjunto

1. Potencia, irradiancia, Hora	1
2. Corriente, temperatura ambiente, Hora	44
3. Corriente, irradiancia, hora	80
4. Humedad, corriente, voltaje, potencia, Hora	116
5. Corriente, Humedad, Hora	159
6. Corriente, Temperatura, Hora	195
7. Voltaje, Humedad, Hora	231
8. Voltaje, Irradiancia, Hora	267
9. Temperatura ambiente, Irradiancia, Humedad, Potencia	310
10. Temperatura ambiente, Corriente, Voltaje, Potencia Hora	353
11. Voltaje, Temperatura ambiente, Hora	388
12. Comparación entre variable climatológicas	424
13. Potencia, Temperatura ambiente, Hora	467
14. Temperatura ambiente, irradiancia, humedad, voltaje, Hora	503
15. Corriente, Irradiancia, Hora	546
16. Voltaje, Humedad, Hora	589
17. Potencia, Irradiancia, Humedad, Temperatura ambiente, Hora	632
18. Potencia, Irradiancia, Hora	667
19. Temperatura ambiente, irradiancia, humedad, Voltaje.....	703
20. Temperatura ambiente, irradiancia, humedad, corriente	746
21. Corriente, Irradiancia, Humedad, Temperatura ambiente, Hora	789
22. Voltaje, Temperatura ambiente, Hora	824
23. Potencia, Humedad, Hora	831
24. Temperatura ambiente, irradiancia, humedad Potencia	867
25. Voltaje, Irradiancia, Hora	910
26. Potencia, Humedad, Hora	946
27. Corriente, Temperatura ambiente, irradiancia, humedad, Hora	989
28. Voltaje, Irradiancia, Humedad, Temperatura ambiente, Hora	1032
29. Irradiancia, Corriente, Voltaje, Potencia, Hora	1067

30. Potencia, Temperatura, Hora	1110
31. Corriente, Humedad, Hora	1146
32. Potencia, Temperatura ambiente, Hora	1189
33. Voltaje, Temperatura, Hora	1196
34. Corriente, Temperatura ambiente, Hora	1232
35. Temperatura ambiente, Corriente, Voltaje, Potencia, Hora	1239
36. Curvas características de corriente y potencia	1282
37. Energía durante las horas del día	1310

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es la principal fuente de energía en la mayoría de las interacciones entre la superficie y la atmósfera, que impulsan casi todos los procesos físicos, químicos y biológicos en los sistemas atmosférico y oceánico de la Tierra [1]. La luz solar es la fuente de energía solar considerada como una fuente de energía alternativa junto con otras fuentes de energía renovable como el hidrógeno y el viento. La energía solar es de vital importancia ya que es una energía amigable con el medio ambiente, además, es una energía más flexible, rentable y comercialmente extendida. Por lo tanto, se usa ampliamente hoy en día en muchas aplicaciones, como sistemas de calentamiento de agua, sistemas de energía satelital y generación de energía eléctrica, entre otros [2]. De este modo, la energía solar es considerada uno de los recursos fundamentales de la naturaleza debido a su fácil acceso; además de ser limpia, económica y su aprovechamiento se puede realizar a través de celdas fotovoltaicas, que generan energía a partir de la irradiación del sol sobre su superficie, en consecuencia, la generación de energía de las celdas fotovoltaicas depende fuertemente de las características ambientales a las cuales se someten [3], por ello, obtener una estimación real de la cantidad de energía eléctrica fotovoltaica que se podría generar es incierta.

Debido a la importancia que tiene el sol como fuente energía y el trabajo que hacen los paneles solares para convertirla en energía eléctrica se presenta a continuación el planteamiento del problema y los objetivos planteados para este trabajo de investigación.

Planteamiento problema y motivación. Desconocer la cantidad de energía que se generará por paneles fotovoltaicos sin tener en cuenta el impacto de factores climatológicos sobre estos, puede acarrear problemas como los siguientes. En primer lugar, el dimensionado insuficiente de la instalación, esto se debe a que solo se tiene en cuenta la información suministrada por el fabricante, sin tener en cuenta información del lugar; como la irradiancia, la humedad y la temperatura; con el tiempo la instalación fotovoltaica no cubrirá la demanda requerida por el consumidor y se verá en la necesidad de rediseñar y aumentar costos para alcanzar a cubrir la necesidad del interesado. Por otro lado, el caso contrario es en el cual se sobre dimensiona la instalación y se genere energía de más, esta energía se perderá ya que no se utilizará, el usuario habrá pagado por un bien que no utilizara o no le sacara ningún provecho. Por lo anterior, esta situación crearía predisposición en la comunidad debido a su difícil adquisición por los costos tan elevados. Otra consecuencia que posiblemente conllevaría es la desconfianza que generaría en la comunidad respecto del uso de este tipo de tecnologías, imponiendo el paradigma de que estas no son útiles. Por todas estas razones, los diseñadores de instalaciones de este tipo de tecnologías tienen que lidiar con la calidad del servicio prestado y con la confiabilidad de la comunidad en los paneles solares como una fuente energía segura.

Por lo casos anteriormente mencionados se deben a que en la industria fotovoltaica se han establecido algunos parámetros para medir el rendimiento máximo de los paneles solares; cada panel solar se fabrica con base a especificaciones estándar

de medición. No obstante, estas condiciones no se encuentran o son raras de encontrar en la naturaleza. Por consiguiente es probable que no se logre obtener la energía requerida, ya sea por falta o exceso de paneles necesarios. Con base en la anterior descripción, se identifica la necesidad de realizar estudios del comportamiento de la potencia proporcionada por el panel bajo condiciones reales. Esta información es absolutamente necesaria para el diseño de instalación de paneles solares.

Objetivo general. El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento de la energía producida por paneles solares policristalinos bajo condiciones ambientales reales de humedad, temperatura ambiente, temperatura de celda e irradiancia en la ciudad de Popayán, con el fin de brindar información acerca del cambio que sufre la energía eléctrica fotovoltaica, puesto que los diseñadores de instalaciones de este tipo de tecnología, se enfrentan con el gran compromiso de garantizar la mínima energía requerida para el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.

Objetivos específicos. Para alcanzar el objetivo principal se propusieron tres hitos, que son, 1) diseñar e implementar un sistema que permita la toma de datos de voltajes, corrientes, humedad relativa del aire, temperatura ambiente, temperatura del panel e irradiancia en tiempo real; 2) caracterizar la producción de energía frente a cada una de las variables climatológicas y 3) sugerir modelos que permitan establecer el comportamiento de generación de energía eléctrica fotovoltaica frente a cada una de las variables de estudio.

Contribución del trabajo. Con la colaboración del laboratorio de energías renovables del CTPI SENA, se desarrolló el instrumento de medición que permite la recolección de datos en tiempo real, además, vimos la necesidad de escoger muestras aleatorias de 20 a 30 días tomadas durante dos meses y medio, estos datos fueron verificados con la información recolectada durante el resto del año en el laboratorio de energías renovables. Esta verificación se hace con el fin de que la caracterización y la posterior propuesta de modelos permitiera hacer una extrapolación de la energía generada en el resto de año. De la misma manera, se encontró que la energía real de los paneles fotovoltaicos puede variar entre el 6% y 15% de lo que se esperaría que genere según su fabricante.

ANTECEDENTES

A continuación se nombran algunos antecedentes donde se estudia el comportamiento de los paneles solares fotovoltaicos bajo condiciones controladas.

Diversos proyectos basan su investigación en observar cambios en los parámetros internos de las celdas fotovoltaicas debido a distintos factores, por ejemplo, en [4] midieron el efecto del cambio de temperatura de la celda sobre la potencia producida por esta, donde la temperatura ambiental de medición fue de 25°C y se estableció una irradiancia de 0.35 W/m², dando como resultado un aumento de la corriente de corte de la fotocelda, no obstante, hubo una disminución en el voltaje, lo que llevó a una reducción de la potencia de salida; este resultado muestra que, con la misma irradiancia, la eficiencia de la celda depende fuertemente de la temperatura en la celda. Un resultado similar se presenta en [5] donde se estudia la eficiencia en un rango de temperatura e intensidades de radiación constante; como resultado se muestra una fuerte dependencia de la temperatura, ya que afecta los parámetros de la celda fotovoltaica, la calidad y su eficiencia.

En [6] se presenta la influencia que tiene el nivel de iluminación en los parámetros de una celda solar de silicio policristalina, las medidas fueron tomadas a temperatura ambiente y fue modelado usando un modelo de diodo simple, los resultados mostraron que la fotocorriente y la corriente de corte tienen un incremento lineal con el nivel de radiación, mientras que el voltaje y la eficiencia tienen un crecimiento logarítmico.

Por otro lado, para examinar el comportamiento de las celdas sin tener en cuenta sus parámetros internos, se ha observado su comportamiento en entornos controlados o expuestos a las condiciones reales del medio ambiente. En [7] se estudia la eficiencia de una celda fotovoltaica operando bajo condiciones reales, centrándose en el efecto que tiene la temperatura ambiental y de la celda, la masa del aire (AM) y la radiación sobre la celda. Como resultado se obtuvo un modelo experimental de la energía generada, la cual dependía de las variables antes mencionadas con la eficiencia lineal decreciendo en términos de temperatura de celda y masas del aire, relación que se ve en la siguiente ecuación:

$$n_{mod} = p \left[q \frac{G_i}{G_0} + \left(\frac{G_i}{G_0} \right)^m \right] \left[1 + r \frac{\theta}{\theta_0} + s \frac{AM}{AM_0} \right] \quad (1)$$

Donde $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$, $AM_0 = 1.5$ y los parámetros (p , q , m , r , s) son parámetros propios determinados por el modelo bajo condiciones climatológicas reales.

En [8] muestran el efecto que tiene la humedad relativa sobre la potencia generada de una celda fotovoltaica. Los datos recolectados fueron tomados a condiciones ambientales, por lo que también se presentó una relación entre humedad-temperatura, humedad-velocidad de viento y humedad-radiación solar. Como resultado, se obtuvo una relación inversa entre la humedad y la potencia generada, es decir, a mayor humedad relativa menor es la potencia de salida.

En [9], a diferencia del anterior, los datos se recolectaron en un ambiente controlado, donde a medida que se variaba la humedad relativa se observaba su efecto en la eficiencia y potencia de la celda, de este modo, se obtuvo una relación inversa y a medida que la humedad relativa aumentaba la potencia disminuía, es decir, la humedad ocasionaba pérdidas en la energía generada por la celda.

En la ciudad de Popayán se han presentado diversos trabajos en los cuales se estudia la generación eléctrica fotovoltaica algunos ejemplos se describen a continuación:

En [10] se presenta un método de modelado, simulación e implementación de un sistema fotovoltaico autónomo, en el cual se tienen en cuenta parámetros medioambientales como lo son la radiación solar, velocidad de viento y temperatura ambiente. Como resultado se recomienda utilizar un modelo que permite hallar el cálculo de la potencia el cual depende directamente de los factores medioambientales y características propias de los módulos fotovoltaicos que se desean implementar. Este modelo muestra un aumento de la potencia del 30% cuando se integra la velocidad de viento y los resultados de desempeño simulado mostraron un aumento del 37% si se considera la velocidad de viento.

En [11] se diseña un equipo prototipo de funcionamiento autónomo de seguimiento solar, para caracterizar la producción de energía solar fotovoltaica a partir del censado de variables climatológicas y radiación solar, como resultado se obtuvo que la temperatura ambiente y la humedad relativa afectan la producción en potencia, además se encontró que la producción de potencia es mayor para un sistema móvil que para un sistema fijo.

CAPÍTULO 1

Fundamentos físicos y técnicos de los paneles fotovoltaicos.

1. Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico está conformado por varias células idénticas interconectadas eléctricamente en serie y/o en paralelo, de forma que el valor de la tensión y de la corriente suministrada por esta configuración se ajuste al valor deseado. En la mayoría de configuraciones de los paneles fotovoltaicos se suele situar en serie las células hasta alcanzar la tensión deseada; y, posteriormente se colocan en paralelo las celdas que están formadas en serie para alcanzar el nivel de corriente necesario [12].

A continuación, se nombran leyes y características propias de los paneles fotovoltaicos que describen su comportamiento.

1.1. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la teoría física detrás del funcionamiento de un panel fotovoltaico. En [13] indican que el efecto fotoeléctrico fue elucidado por primera vez por Einstein en 1905, adoptando la hipótesis cuántica de Planck, en la cual se postula que “la luz incidente es compuesta por cuantos de energía”. Einstein propuso que la radiación no solamente es absorbida y emitida en cuantos, sino que también se propaga por sí misma; así, un rayo de luz puede ser considerado como una cadena de partículas, cuantos de luz o fotones, cada uno con energía (*Ecuación 2*):

$$E_{foton} = hf \quad (2)$$

Donde f es la frecuencia de la luz. Los fotones se mueven a través del espacio en líneas rectas y a la velocidad de la luz. La intensidad de la luz decae a medida que la luz se aleja de una fuente de luz debido a que los fotones emitidos son esparcidos a lo largo de una gran área de superficie esférica. Sin embargo, la energía de cada uno de los fotones permanece inmutable.

Un fotón incide en la superficie del metal entregando toda su energía al electrón en el metal. El electrón primero utiliza esta energía para romper la banda de valencia que lo mantiene unido y la energía sobrante aparece como energía cinética. Einstein resumió estas ideas en una simple relación llamada “*Ecuación de Einstein*” (*Ecuación 3*):

$$K_{Electron} = E_{fotón} - W \quad (3)$$

Donde W es el trabajo hecho para liberar el electrón del metal. El mínimo trabajo (W_{min}) requerido para liberar un electrón del metal es llamado *función de trabajo*; es característico del metal.

Los fotones en un rayo de radiación intenso no poseen más energía individual que la que posee un rayo débil de la misma radiación; los rayos más intensos solo tienen mayor cantidad de fotones; por eso un rayo intenso puede liberar una mayor cantidad de electrones. Los fotoelectrones con energía cinética muy grande son los que han sido liberados de la superficie del metal sin usar no más que la función de trabajo del metal (Ecuación 4).

$$K_{max} = hf - W_{min} \quad (4)$$

1.2. Modelo de una celda solar fotovoltaica

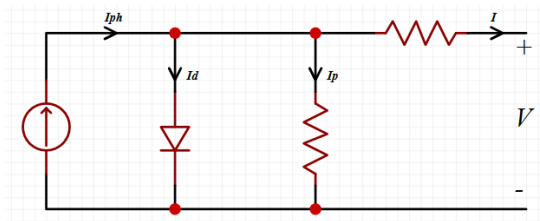


Figura 1 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

En la Figura 1 se muestra el circuito equivalente de una celda fotovoltaica, donde $I_{ph} = \eta q \Phi$ es la fotocorriente y es la máxima corriente que puede generar una celda (η : Eficiencia cuantica, Φ : Flujo de fotones), I_d representa la corriente del diodo y es proporcional a la corriente de saturación, I_p representa la corriente por pérdida debido a la no idealidad de la unión p-n y las impurezas en la celda. Las características I-V totales del dispositivo son la suma total de las corrientes (Ecuación 5).

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{KT}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (5)$$

Donde q representa la carga del electrón, R_s la resistencia del volumen del material y de contactos, K constante de Boltzmann, R_p resistencia de shunt y T la temperatura de la celda [14], [15].

2. Parámetros de medición en paneles solares fotovoltaicos

A continuación, se indican los parámetros que sirven para describir el comportamiento de los paneles solares fotovoltaicos bajo condiciones preestablecidas de funcionamiento [3], [16], [17].

2.1. Eficiencia de un panel

La eficiencia de un panel solar fotovoltaico viene dada por la relación entre la energía máxima producida por el panel y la cantidad de energía recibida sobre este (Ecuación 6), es decir:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{NG_iA} \quad (6)$$

Donde P_{mpp} es la potencia máxima de la celda, G_i es la irradiancia del sol determinada como la energía incidente por unidad de área por tiempo, N el número de celdas y A es el área de las celdas.

2.2. Factor de forma

El factor de forma se define como el cociente entre la potencia máxima P_{mpp} que puede entregar una celda solar en condiciones óptimas de operación y el producto entre la corriente de corto circuito I_{sc} y el voltaje en circuito abierto V_{oc} (Ecuación 7), es decir:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (7)$$

Donde la potencia máxima también es igual a $P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$ siendo V_{mpp} el voltaje en el punto de máxima potencia e I_{mpp} la corriente en el punto de máxima potencia [15].

3. Otros parámetros

Los siguientes parámetros permiten tener una noción del comportamiento de los paneles solares bajo distintas condiciones de funcionamiento [2], [18]–[20].

3.1. Parámetros a temperatura de celda constante e irradiancia variable

Con respecto a la relación que tiene la corriente máxima y la potencia con el cambio de irradiancia, bajo condiciones de 1.5 masas de aire y con temperatura constante de celda a 25°C, está dada por (Ecuación 8):

$$I_{scG_i} = I_{scSTC} \cdot \frac{G_i}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (8)$$

Así como en el ítem anterior, se muestra la corriente en corto circuito, la potencia máxima de operación también se ve afectada (Ecuación 9) y viene dada por:

$$P_{mppG_i} = P_{mppSTC} \cdot \frac{G_i}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (9)$$

Donde I_{scSTC} y P_{mppSTC} es la corriente en corto circuito y la potencia máxima de operación, respectivamente, a condiciones de medición estándar (STC) y G_i es la irradiancia que llega al panel.

En estas mediciones donde solo tiene en cuenta el cambio de irradiancia, el voltaje en circuito abierto se mantiene constante, para el resto de las condiciones STC $V_{ocG_i} = V_{ocSTC}$.

STC: *Standard Test Condition*, son las condiciones a las que se someten los paneles solares para extraer su máxima potencia, estas condiciones vienen dadas de la siguiente manera: temperatura panel 25°C, masas de aire 1.5, irradiancia 1000 W/m².

4. Parámetros con temperatura de celda variable e irradiancia constante

En esta sección se muestra la variación de los parámetros de los paneles solares cuando la temperatura de la celda cambia, pero la irradiancia se mantiene constante.

• Temperatura de celda

$$T_{celda} = T_{amb} + (TONC - 20) \frac{G_i}{800 \text{ W/m}^2} \quad (10)$$

• Corriente Corto circuito

$$I_{scT_{celda}} = I_{scSTC} + \alpha(T_{celda} - 25) \quad (11)$$

• Voltaje en circuito abierto

$$V_{ocT_{celda}} = V_{ocSTC} + \beta(T_{celda} - 25) \quad (12)$$

• Potencia máxima de operación

$$P_{mppT_{celda}} = P_{mppSTC} + \gamma(T_{celda} - 25) \quad (13)$$

Donde:

- *TONC: Temperatura de operación nominal de las celdas*, definida como la temperatura que alcanzan las celdas solares cuando se somete al módulo a una irradiancia de 800 W/m², masas de aire 1.5, temperatura ambiente de 20°C y una velocidad de viento constante de 1 m/s.

- α , β , γ son coeficientes de temperatura del módulo y sus unidades de media son $\frac{A}{^\circ C}$, $\frac{V}{^\circ C}$, $\frac{W}{^\circ C}$ respectivamente.

5. Definiciones

Las siguiente definiciones se encuentran en [21]–[23], donde se explica con mayor detalle cada una de las características que las describen.

5.1. Masas de aire

Las masas de aire son la proporción de masa de atmosfera que debe atravesar un rayo de radiación para llegar a la superficie de la tierra.

5.2. Radiación global

La radiación global es la suma de la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es la radiación que se recibe desde el sol sin haber sido dispersa por la atmosfera; por el contrario, la radiación difusa es la radiación recibida desde el sol después de haber sido esparcida por la atmosfera.

5.3. Irradiancia

La irradiancia es la tasa de energía incidente en una superficie por unidad de área de superficie usualmente se utiliza el W/m^2 como su unidad de medida.

5.4. Irradiación

La irradiación es la energía incidente por unidad de área sobre una superficie y se encuentra mediante la integración de la irradiancia sobre un periodo de tiempo especificado.

CAPÍTULO 2

Procedimiento metodológico para estudiar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos policristalinos en condiciones reales de trabajo.

A continuación se realizará la descripción de la localización, materiales y métodos utilizados para la realización del proyecto.

6. Localización

Laboratorio de Energías Renovables del CTPI perteneciente al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Sede Alto Cauca, en la ciudad de Popayán, quien suministró los sensores y herramientas para diseñar e implementar un dispositivo capaz de medir cada una de las variables climáticas y de respuesta en tiempo real, además de ser el lugar donde se tomaron los datos.

7. Diseño y construcción del sistema de medición:

Para el diseño se tuvo en cuenta la necesidad de conocer como varían los parámetros del clima; como la temperatura ambiente, la humedad y la irradiancia del sol; para esto el laboratorio de energías renovables suministró los sensores AM2301, el cual mide temperatura y humedad relativa ambiente, y el Davis 6450 que fue utilizado para medir la irradiancia solar.

Se dispuso de dos paneles fotovoltaicos de $75 W_p$ conectados en paralelo, junto al sensor ACS712 que fue el encargado de medir la corriente continua en corto circuito generada por los paneles fotovoltaicos. En cuanto al voltaje, se utilizó el sensor FZ0430 que midió el voltaje en circuito abierto. Para tomar las medidas en circuito abierto y en corto circuito se empleó un relé opto-acoplado, el cual permitió hacer el cambio entre estos dos estados.

Por medio del uso de un reloj en tiempo real (RTC) el sistema de medición tuvo la fecha y hora disponible al momento de tomar medidas, sin tener que tomar como referencia una fuente externa. De este modo, se recolectó las mediciones, tanto del medio ambiente como las del panel fotovoltaico cada cierto periodo de tiempo.

El dispositivo encargado de procesar las señales emitidas por los sensores y de recibir la hora procedente del RTC fue una tarjeta Arduino Mega 2560; la cual, una vez procesada la información recibida, envió los datos recolectados a una memoria microSD.

7.1. Materiales.

A continuación, se hace una descripción de los materiales utilizados en el proyecto y que fueron necesarios para construir el dispositivo; cabe señalar nuevamente que, tanto el lugar donde se realizó el proyecto como los materiales utilizados, fueron suministrados por el SENA en la medida que el diseño lo requería.

Durante la toma de datos se utilizaron dos paneles solares policristalinos de $75 W_p$ [24], ubicados en el techo del laboratorio de energías renovables del CTPI del Sena, los cuales tienen las siguientes características:

Características Eléctricas	STC	TONC
Potencia Máxima (Pmax)	75Wp	55Wp
Voltaje en Potencia Máxima (Vmpp)	18V	16.8V
Corriente en Potencia Máxima (Impp)	4.17A	3.28A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	22.5V	21.2V
Corriente en Corto Circuito (Isc)	4.5A	3.64A
Eficiencia del módulo STC	14.73%	
Rango de temperaturas de operación	-40°C hasta +85°C	
Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0.44%/°C	
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0.33%/°C	
Coeficiente de temperatura (Isc)	0.055%/°C	
Temperatura de Operación Nominal de la celda (TONC)	45±2°C	
Factor de Forma (FF)	72.02%	
Características Mecánicas		
Tipo de celda	Policristalina 156x156	
Numero de celdas	36 (4x9)	
Dimensiones	670x760x35	
Peso	6.2 kg	

Tabla 1 Características eléctricas y mecánicas panel 75Wp

Del mismo modo, el panel solar utilizado para realizar la validación de datos presenta las siguientes características:

Características Eléctricas	STC	TONC
Potencia Máxima (Pmax)	150Wp	109Wp
Voltaje en Potencia Máxima (Vmpp)	18.1V	16.5V
Corriente en Potencia Máxima (Impp)	8.3A	6.59A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	22.3V	20.5V
Corriente en Corto Circuito (Isc)	8.87A	7.19A
Eficiencia del módulo STC	15.17%	
Rango de temperaturas de operación	-40°C hasta +85°C	
Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0.43%/°C	
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0.34%/°C	
Coeficiente de temperatura (Isc)	0.065%/°C	
Temperatura de Operación Nominal de la celda (TONC)	45±2°C	
Características Mecánicas		
Tipo de celda	Policristalina 152.4x152.4 mm	
Numero de celdas	36 (4x9)	
Dimensiones	1485X666X40	
Peso	12 kg	

Tabla 2 Características eléctricas y mecánicas panel 150Wp

El sistema de medición de datos contó con un piranómetro y con sensores de corriente, voltaje, humedad y temperatura; también se utilizó una tarjeta Arduino que fue la encargada de recolectar y procesar los datos recibidos por los sensores que a continuación se describen.

El sensor de radiación solar Davis 6450 Vantage Pro2 (*Figura 2*), se utilizó para medir la radiación total (radiación difusa y directa). El equipo tiene las siguientes especificaciones [25]:

- Respuesta espectral en un rango de 400 a 1100 nm y un rango de temperatura entre -40°C y $+150^{\circ}\text{C}$.
- Voltaje de operación es de $+3\text{ VDC} \pm 10\%$ y el voltaje de salida es de 0 a 3 VDC; 1.67 mV por W/m^2 .
- Resolución de $1\text{ W}/\text{m}^2$, rango de detección entre 0 y $1800\text{ W}/\text{m}^2$.



Figura 2 Sensor de radiación solar Davis 6450

Además del instrumento anterior, se utilizaron sensores de corriente y voltaje (*Figura 3*), los cuales midieron la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto del panel solar fotovoltaico. El sensor de corriente utilizado fue el ACS712 (*Figura 3a.*) para Arduino el cual detecta corrientes de hasta 30 amperios con una sensibilidad de 66 mV/A [26]. El sensor de voltaje empleado para Arduino fue el FZ0430 (*Figura 3b.*) el cual mide voltajes de 0 a 25 VDC.

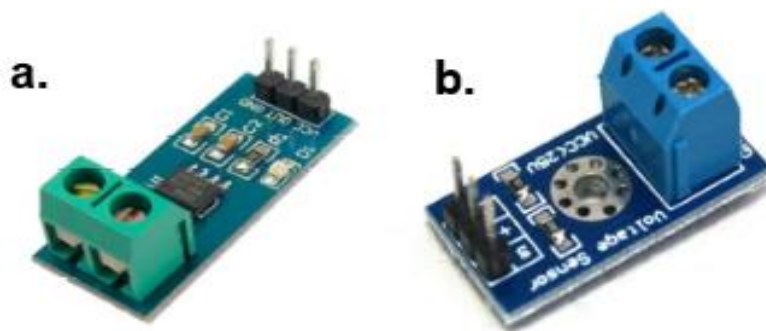


Figura 3 a) Sensor de Corriente ACS712, b) Sensor de voltaje FZ0430

Se usó un sensor de humedad y temperatura AM2301 [27], este dispositivo contiene sensores capacitivos de humedad y dispositivos de temperatura de alta precisión los cuales van conectados a un microcontrolador, se alimenta con 5VDC y la transmisión de datos se hace en cadena de 40 bits con una actualización de datos cada 2 segundos (*Figura 4*).



Figura 4 Sensor de temperatura y humedad AM2301

Se empleó un Arduino Mega2560 para la recolección y procesamiento de las señales entregadas por los sensores [28], debido a la velocidad de procesamiento, además de la disponibilidad de entradas análogas-digitales. El Arduino Mega2560 (Figura 5) es una tarjeta microcontroladora que se fundamenta en el ATmega2560; se alimenta con una tensión de 12V y una corriente máxima de 2A, además cuenta con 54 pines de entrada/salidas digitales, 16 entradas análogas, un cristal de oscilación de 16MHz, un conector USB, clavija de poder, pines ICSP y un botón de reinicio.



Figura 5 Arduino Mega2560

Otros instrumentos utilizados (Figura 6) fueron el reloj RTC 1307 (Figura 6a) para tener precisión en la fecha y hora durante el día, un módulo microSD (Figura 6b) para guardar la información de los datos obtenidos y un juego de relés opto-acoplados para alternar entre corriente y voltaje en el panel solar fotovoltaico (Figura 6c).

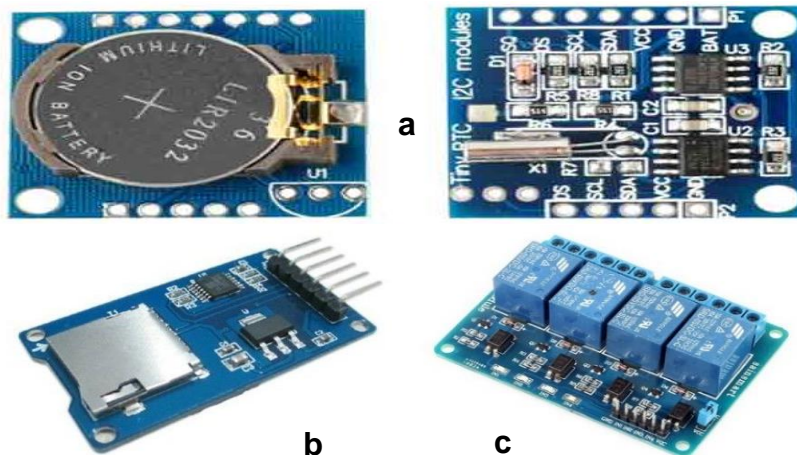


Figura 6 a) Reloj RTC 1307, b) Modulo microSD, c) Relés opto-acoplados

7.2. Programación Arduino

Para la programación del Arduino se utilizaron las librerías DHT y DHT_U las cuales se encargaron de la recepción y manipulación de las señales emitidas por el sensor AM2301; asimismo se utilizó la librería *RTClib* que se responsabilizó de la adquisición y manipulación de la hora entregada por el reloj RTC, por último se utilizaron las librerías SPI, SD y Wire las cuales tenían la función de escribir y guardar los datos en la memoria MicroSD.

Una vez llamadas las librerías se definen las entradas en los pines del Arduino por donde se recibieron las señales provenientes de los sensores y del reloj RTC, también se definen los pines de escritura y lectura de la memoria MicroSD. Acto seguido se definen constantes que permitieron adecuar las señales adquiridas.

Por otra parte, se definieron funciones que se encargan de las tareas de manipular tiempo y fecha; guardar datos en la MicroSD; leer los datos de los sensores de corriente, voltaje y el piranómetro.

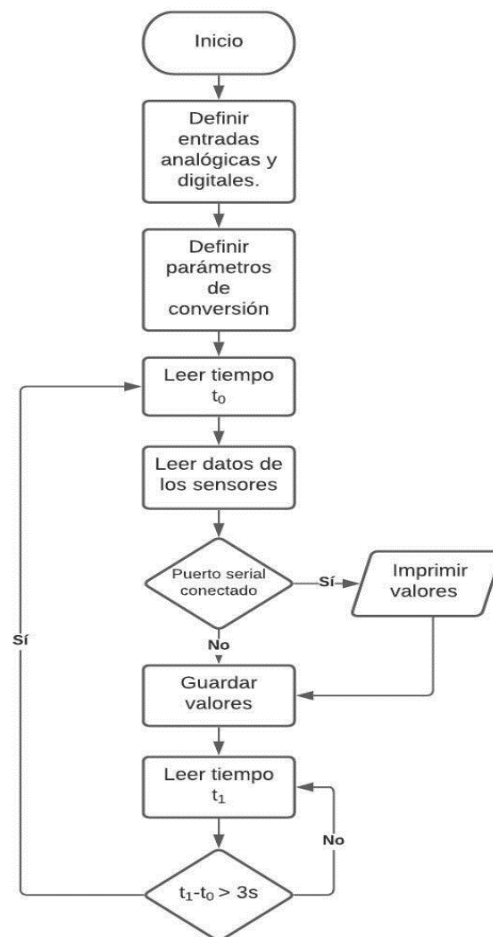


Figura 7 Diagrama de flujo para la programación Arduino

En las siguientes líneas del código se estableció un puerto serial para la lectura de los datos a través de la computadora sin necesidad de desconectarla; se estableció la función de cada pin del Arduino y se inicializaron tanto la tarjeta MicroSD como el reloj RTC 1307.

Dentro de la función “*loop*” del Arduino se crearon variables contenedoras de los datos procesados y provistos por los sensores y el reloj. Acto seguido se envían los datos a guardar a la microSD. Debido a la configuración de los sensores, donde el AM2301 se actualizaba cada 2 segundo y el Davis cada segundo, se dio un lapso 3 segundos para tomar los datos nuevamente.

En la siguiente sección se describe el procedimiento utilizado en el análisis de la energía generada por el panel solar fotovoltaico en la ciudad de Popayán, utilizando los datos recolectados por el dispositivo de medida desarrollado y empleado.

8. Caracterización de la generación eléctrica fotovoltaica.

Para la caracterización de la energía solar fotovoltaica en la ciudad de Popayán se analiza el efecto que presenta los cambios del clima en la generación de energía eléctrica para cada uno de los días. En ese orden, se muestra el peso que tienen las variaciones del clima para la corriente y el voltaje con el fin de mostrar cual variable climatológica genera mayores cambios en alguna de las dos o en las dos y eso como afecta la potencia generada por el panel.

El segundo procedimiento, fue mostrar el cambio que presenta la energía eléctrica fotovoltaica diaria y su variación respecto a las variables climatológicas promedio de cada día. En este procedimiento se muestra cuanto diverge la energía real obtenida por el arreglo fotovoltaico y la energía teórica esperada.

Para la caracterización de la energía fotovoltaica se tomó muestras de 30 días aleatorios buscando que estos días sean representativos para el clima de Popayán y poder hacer una extrapolación de los resultados obtenidos para el resto del año.

8.1. Herramientas:

Para realizar la caracterización de la energía fotovoltaica se utilizaron herramientas de programación que ayudaron al filtrado, agrupación y visualización de los resultados

- El ambiente trabajo para manipular los datos recolectados fue el lenguaje de programación Python que cuenta con una gran variedad de librerías. Estas librerías permiten la manipulación de grandes cantidades de datos, de forma fácil y rápida. Además permite el trabajo de varios tipos de datos y permite la incorporación de código dentro de módulos o paquetes [29], [30].
- La librería utilizada para la manipulación de datos fue pandas, que es capaz de leer, escribir, agrupar, entre otras funcionalidades. Presenta un objeto rápido y eficiente, “*DataFrame*”, para la manipulación e indexación integrada. También contiene herramientas para lectura y escritura de datos en diferentes formatos.

Pandas es una librería altamente optimizada para el rendimiento, con rutas de código críticas escritas en *Cython* o *C* [31].

- Para la visualización de los datos recolectados, se utilizó la librería *matplotlib.pyplot*, que es una colección de funciones que hace que *matplotlib* trabaje como *MATLAB*. En la creación de figuras se crea una instancia a un objeto que permite la modificación de sus propiedades como los ejes, tamaño de fuente, colores de línea o de marcadores, entre otros [32].

9. Sugerencia de fórmulas:

Por último, con los datos caracterizados, se procede a sugerir fórmulas que permitan establecer el comportamiento de la generación eléctrica fotovoltaica teniendo en cuenta la caracterización realizada y las relaciones entre los datos.

Con los datos caracterizados se observa la relación entre cada una de las variables con el fin de establecer si existen relaciones fuertes o débiles que pueden afectar el comportamiento de los modelos sugeridos.

Para comparar cada una de las variables estudiadas, se escogen tres muestras de 30 días cada una, dos muestras correspondientes a los días de medición en orden cronológico y una tercera muestra como la combinación de las otras dos. Posteriormente se empleó la librería *scikit-learn* de Python, la cual es una librería de código abierto para machine learning que soporta aprendizaje supervisado y no supervisado [33]. También posee varias herramientas para hacer ajuste de datos, preprocesamiento de datos, selección y evaluación de modelos; que fueron las herramientas utilizadas para obtener los modelos predictivos de energía fotovoltaica y tiempo de sol pico.

10. Otros procedimientos:

Dentro del desarrollo del trabajo encontramos problemas con la medición directa de la temperatura de los paneles solares policristalinos dado que los instrumentos de medición debían estar instalados a la intemperie durante las 24 horas del día, para lo cual no estaban diseñados, por esta razón se decidió hacer el cálculo de la temperatura de los paneles de forma indirecta aplicando la *Ecuación 10*, de esta forma los valores necesarios para su cálculo eran la irradiancia y la temperatura ambiente.

Por otro lado, se hace validación de los datos generados por las fórmulas obtenidas, con el fin de comprobar de que las ecuaciones estén haciendo una predicción cercana a los valores reales. Esta validación se hace con la ayuda de los datos recogidos en el laboratorio de energía renovables del CTPI SENA, el cual implementó un dispositivo similar, desarrollado a partir del que se utilizó en este proyecto. Los datos empleados para la validación fueron recolectados entre mayo y noviembre de 2019.

CAPÍTULO 3

Comportamiento de paneles solares fotovoltaicos policristalinos bajo condiciones reales de trabajo.

11. Sistema de medición.

Antes de comenzar con la construcción del sistema de medición fue necesario caracterizar los sensores empleados en el dispositivo para garantizar la fiabilidad de los datos.

El sensor de radiación solar utilizado en el proyecto está calibrado con un piranómetro de precisión espectral *Eppley* [34], el cual asegura que los datos obtenidos a través del piranómetro Davis 6450 [25] son confiables y que el factor de conversión dado en la ficha técnica corresponderá a una lectura real de irradiancia.

Para la calibración de los sensores de voltaje y corriente se utilizó como instrumento patrón el multímetro UNI-T UT33C+. Los resultados de la calibración se muestran a continuación:

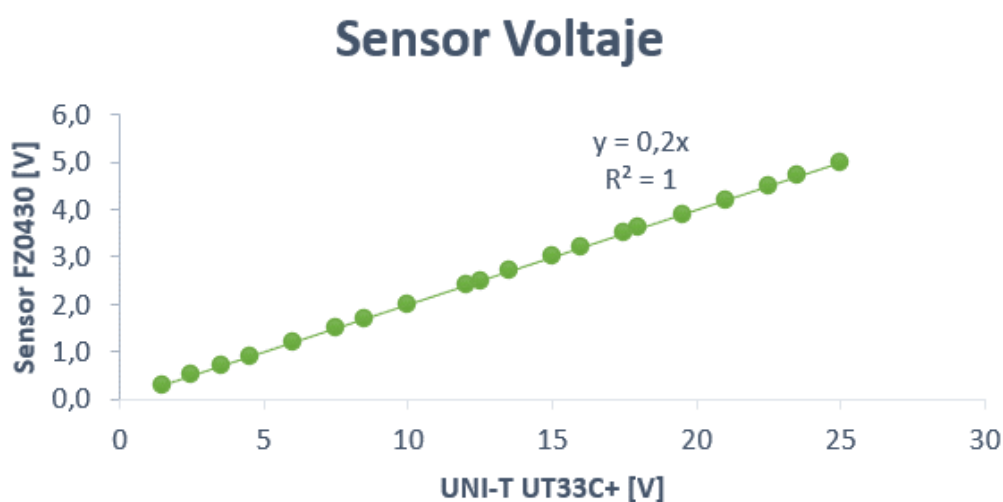


Figura 8 Relación entre sensor Voltaje e instrumento patrón

El sensor de voltaje (Figura 8) no muestra variaciones en sus salidas de voltaje, aunque se puede evidenciar que el voltaje de entrada es reducido por el sensor y esto se debe a que se encuentra compuesto por un divisor de voltaje, con el fin de que el máximo voltaje que llega al Arduino no supere los 5v máximos que soporta la tarjeta.

Sensor Corriente

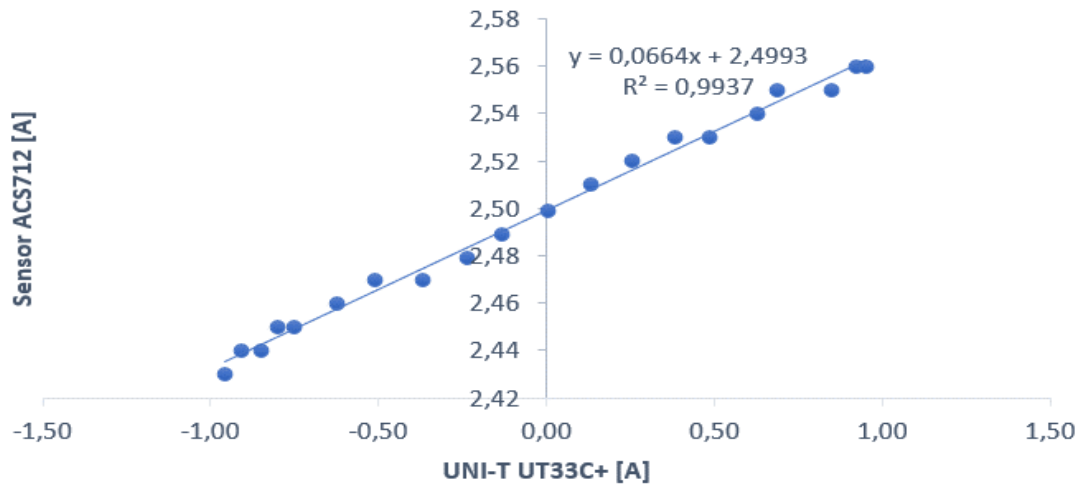


Figura 9 Relación entre sensor Corriente e instrumento patrón

En relación con el sensor de corriente se observó variaciones muy pequeñas sobre los parámetros, en el orden de las milésimas (Figura 9), en comparación con los valores entregados por el fabricante; teniendo en cuenta esto se prefirió trabajar con los datos proporcionados por el constructor del dispositivo, ya que los cambios en los parámetros del dispositivo de medición se pudieron haber dado en el momento del muestreo o por la sensibilidad de dispositivo patrón.

Para la calibración de los sensores de humedad relativa y temperatura ambiente se utilizó como sensor patrón el termohigrómetro UNI-T UT332. Los resultados de la calibración se muestran a continuación:

Sensor Humedad

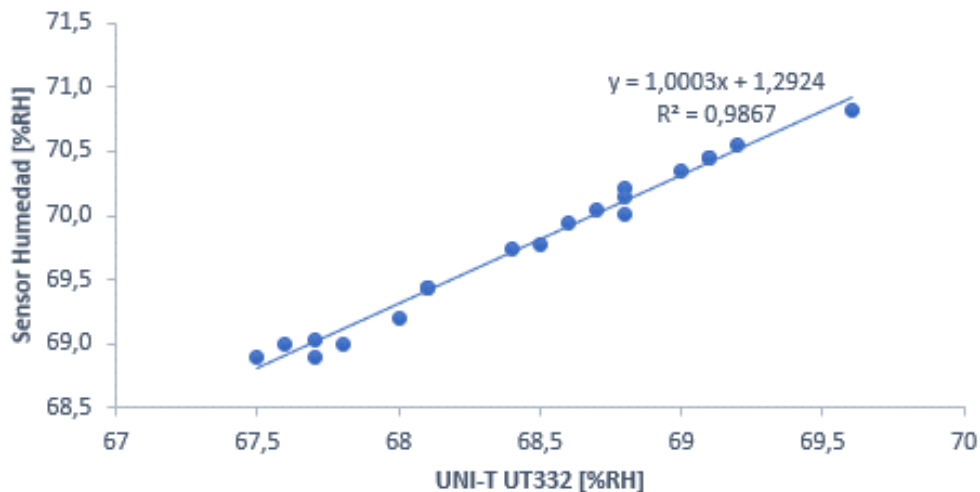


Figura 10 Relación entre sensor de Humedad e instrumento patrón

Para los sensores de humedad relativa y temperatura ambiente, se muestra una variación en el sesgo de 1.292%RH (Figura 10) y 0.536°C (Figura 11)

respectivamente, esta variación fue corregida dentro de la programación del Arduino para que sus valores correspondan a valores muy cercanos a los del instrumento patrón.

Sensor temperatura ambiente

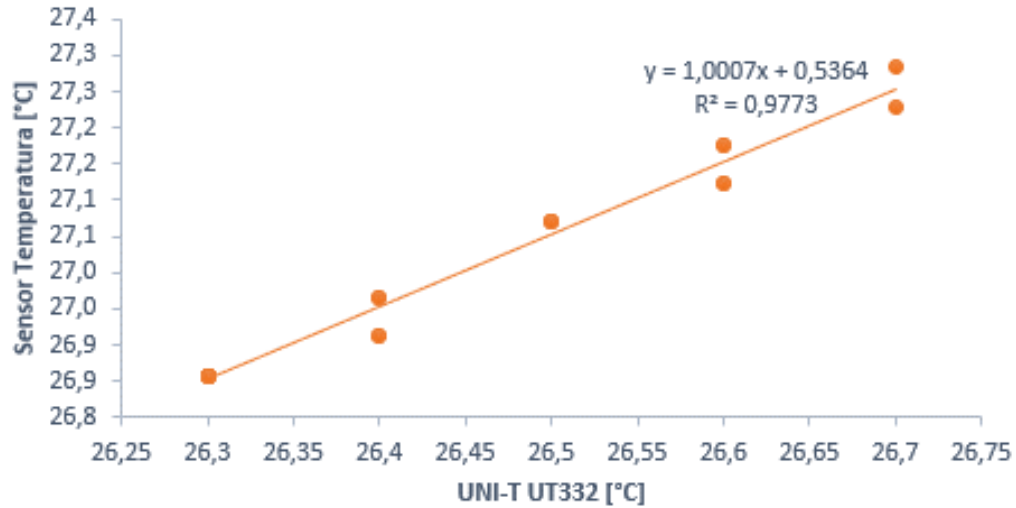


Figura 11 Relación entre sensor de Temperatura e instrumento patrón

Con los sensores caracterizados y calibrados se comenzó a ensamblar el dispositivo, como se muestra en la Figura 12.

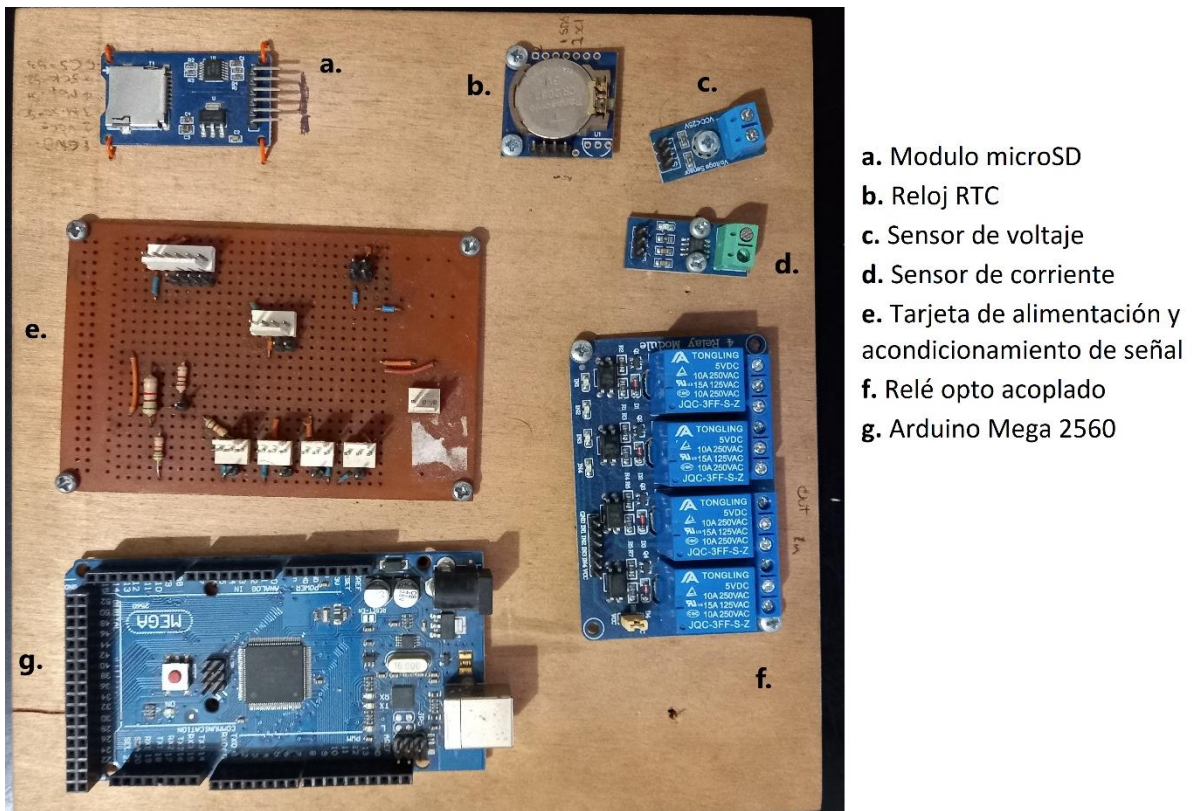
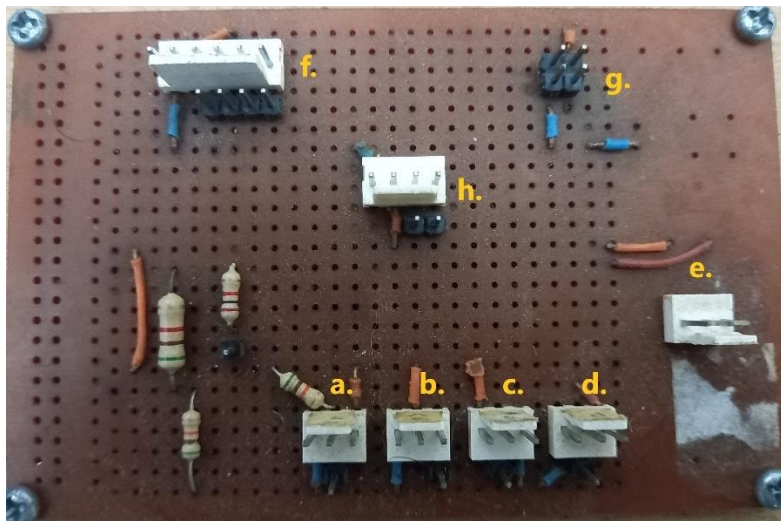


Figura 12 Distribución de los dispositivos, sin conexiones.

En la *Figura 12* se muestran los elementos utilizados para el sistema de medición. Se empleó una tarjeta pre perforada (*Figura 12e.*) para hacer el acondicionamiento de las señales y de alimentación de voltaje de los elementos de medición.



Conectores

- a. Sensores de humedad y temperatura.
- b. Sensor de voltaje.
- c. Sensor de corriente.
- d. Sensor de irradiancia.
- e. Fuente de alimentación general de 5v, 3.3v y tierra.
- f. Modulo microSD.
- g. Relé opto-acoplado.
- h. Reloj RTC.

Figura 13 Tarjeta de alimentación y acondicionamiento de la señal

En la *Figura 13* se muestran los puntos donde se conecta cada uno de los elementos utilizados para la toma y guardado de datos. La tarjeta se utilizó como acondicionador del voltaje de los sensores al voltaje del Arduino. El sistema de medición se instaló al interior del laboratorio de energías renovables del CTPI y tomó datos durante todo el día y la noche. Una vez a la semana, el sistema se apagaba y se descargaban los datos a una computadora, de esta manera se aseguraba de obtener datos de todo el día, durante toda la semana de forma continua. Por otro lado, el reloj RTC debía ser calibrado una vez a la semana, ya que presentaba variaciones con la hora real de 5 minutos al final de la semana.

12. Influencia de las variables climatológicas en la generación de energía eléctrica fotovoltaica.

Para la generación de energía fotovoltaica se espera un aumento en la generación eléctrica de forma gradual, en la medida que el sol atraviesa el cielo, así como se muestra en la *Figura 14 (línea azul continua)*. Sin embargo, ese comportamiento solo es válido en escenarios ideales donde la influencia de la naturaleza y los cambios en las características de los paneles solares fotovoltaicos se desprecian.

Cuando los paneles solares fotovoltaico se ven expuestos a condiciones reales de trabajo, es decir, donde se enfrentan con los cambios inesperados del clima es posible que en un día típico se muestren cambios como los de la *Figura 14 (barras amarillas)* donde se presentan fluctuaciones en su forma de generar energía.

Para obtener la energía generada por los paneles, se realizó la suma total de las potencias registradas en el transcurso del día, multiplicado por las horas de generación eléctrica; la potencia se obtuvo de la *Ecuación 7* tomando el factor de forma propio del panel fotovoltaico.

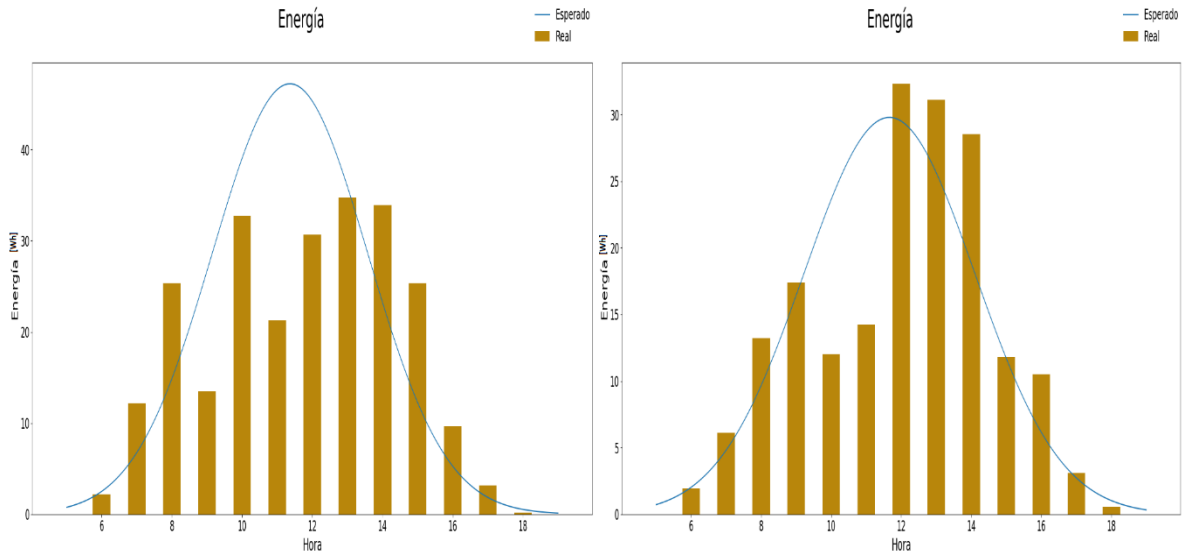


Figura 14 Ejemplo de dos días de generación eléctrica.

En la gráfica anterior (Figura 14, Ver anexo 37) se muestran fluctuaciones en la energía debido al constante cambio de la potencia respecto a la irradiancia. Para corroborar estos datos se estudia la probabilidad de obtener variaciones mayores al 10% en la energía esperada respecto a la real.

HORA	MEDIA (%)	DES. EST (%)
08:00:00	14,36	13,53
09:00:00	7,09	12,49
10:00:00	14,63	8,76
11:00:00	19,60	9,33
12:00:00	22,58	13,05
13:00:00	23,44	13,58
14:00:00	20,53	14,56
15:00:00	27,00	20,98
16:00:00	46,47	31,61

Tabla 3. Variación de la energía teórica respecto de la real obtenida para cada hora del día.

En la *Tabla 3* se muestra información de la variación en porcentaje de la energía que se obtiene y su comparación con la energía que se espera obtener, se tiene que existe la probabilidad de que la variación de energía sea mayor al 10% con una significancia de 0.05 para cada una de las horas del día. De la misma manera, en la Figura 15 se muestra cómo cambia la irradiancia durante el transcurso del día y es notable como este cambio influencia fuertemente en la potencia, ya que, a partir de la irradiancia se genera la energía en el panel solar fotovoltaico, sin embargo, el comportamiento de la potencia también se ve afectado por otros factores climatológicos como la humedad, la temperatura ambiente y del panel.

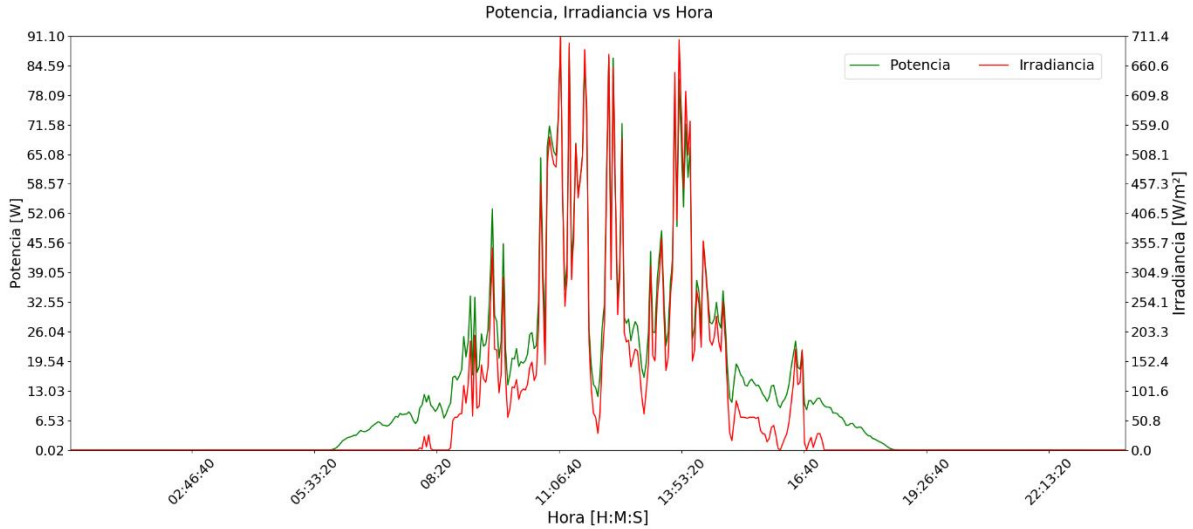


Figura 15 Ejemplo de potencia fotovoltaica e irradiancia en el transcurso del día.

En la Figura 15 (Ver anexos 1 al 35), la irradiancia está expresada en la misma proporción con la potencia generada, ya que se produce tanta potencia en el panel fotovoltaico como irradiancia que incide sobre la superficie. Del mismo modo, se hace la comparación de la potencia fotovoltaica con la humedad relativa (Figura 16), donde se muestra un comportamiento contrario de la potencia respecto a la humedad.

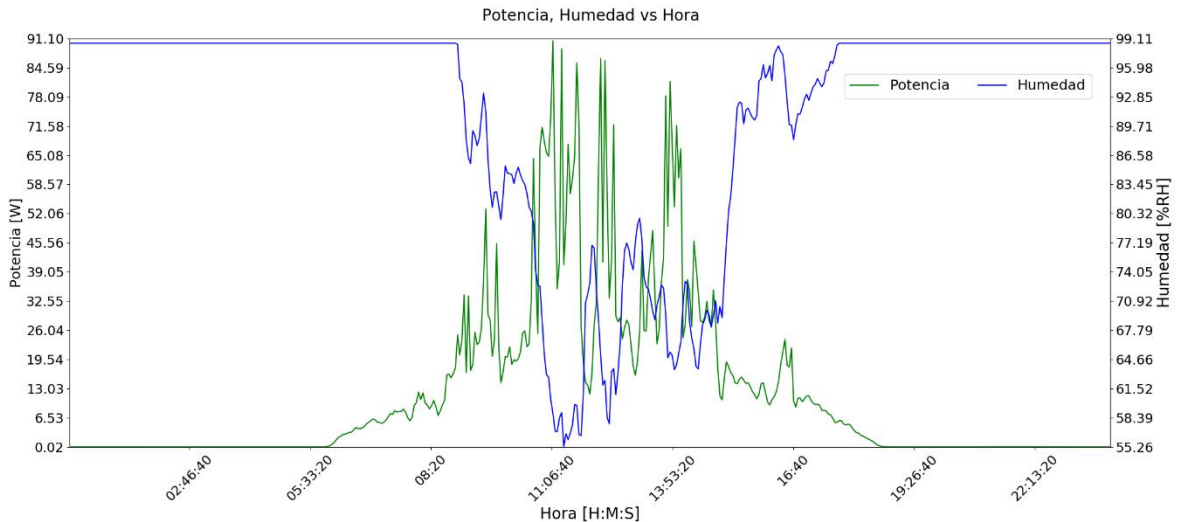


Figura 16. Ejemplo de potencia fotovoltaica y humedad en el transcurso del día.

La Figura 16 (Ver anexos 1 al 35) podría sugerirnos que la humedad relativa influye en la generación eléctrica de un panel fotovoltaico y esto se debe a que las partículas de agua presente en el aire pueden reflejar, reflectar o difractar los rayos del sol [18], por lo que en zonas donde la humedad relativa es baja se generará más energía que cuando la humedad relativa es mayor.

La corriente juega un papel importante en el comportamiento de la potencia ya que es la que varía directamente con la irradiancia.

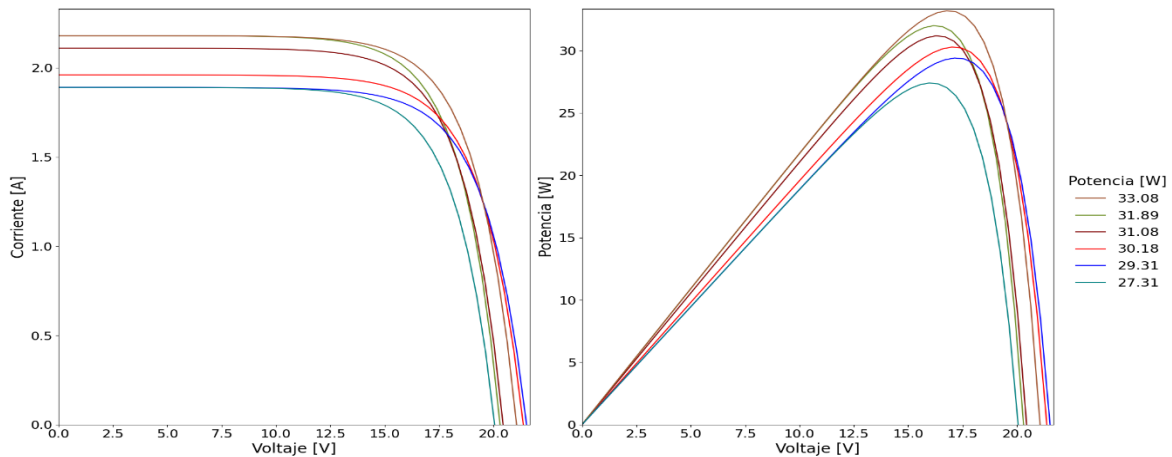


Figura 17 Curva característica de generación de corriente y potencia de un panel solar fotovoltaico.

En la Figura 17 (Ver anexo 36) se muestra el comportamiento característico de la corriente generada en un panel solar fotovoltaico a un mismo nivel de irradiancia, en esta gráfica la corriente varía en proporción a las variaciones de las condiciones climatológicas. Lo anterior se explica dado que la humedad y la corriente son inversas; esto se debe a que cuando la humedad relativa disminuye, hay menos vapor de agua en la atmósfera, resultando en un aumento de la irradiancia que eleva la producción de corriente [35]. De manera contraria ocurre con la temperatura de panel que favorece a la generación de corriente, es decir, a medida que la temperatura aumenta la corriente incrementa en el mismo sentido, sin embargo, la presencia de humedad en el ambiente dificulta la generación de corriente debido a la dispersión de la irradiación.

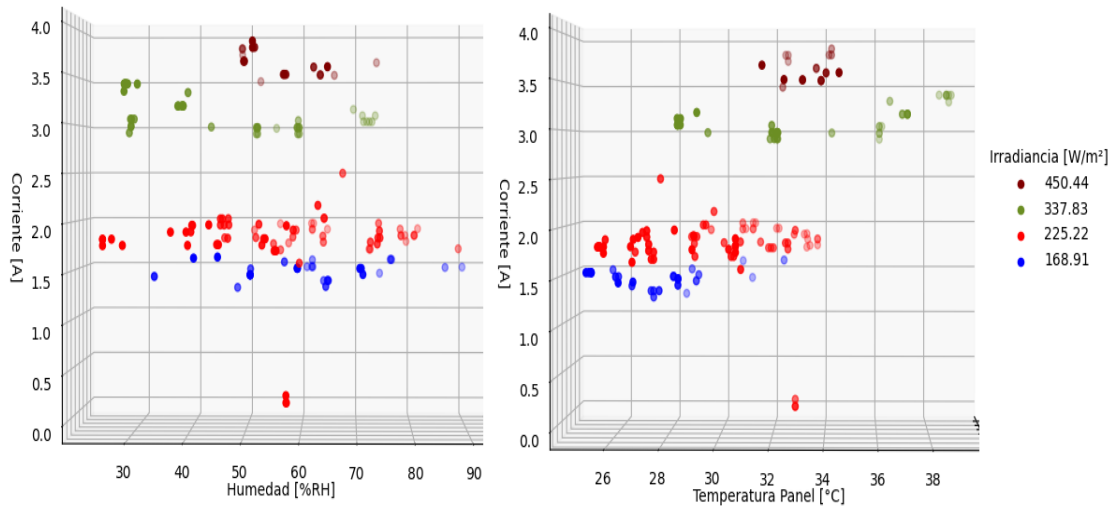


Figura 18 Relación entre la corriente - humedad y corriente - temperatura panel

La Figura 18 muestra como varía la corriente respecto a diferentes niveles de irradiancia, donde es posible observar que la corriente no es constante respecto a la humedad y a la temperatura de panel, pero si es proporcional a la irradiancia dado que para determinado valor de irradiancia, la corriente se encuentra alrededor de

un valor esperado, sin embargo, presenta fluctuaciones debido al cambio de la humedad y de la temperatura del panel. Para valores de baja irradiancia el valor de la corriente llega a variar desde 10% hasta un 14% de su valor promedio, mientras que a medida que incrementa la irradiancia presenta menos fluctuaciones hasta 9% de su valor esperado.

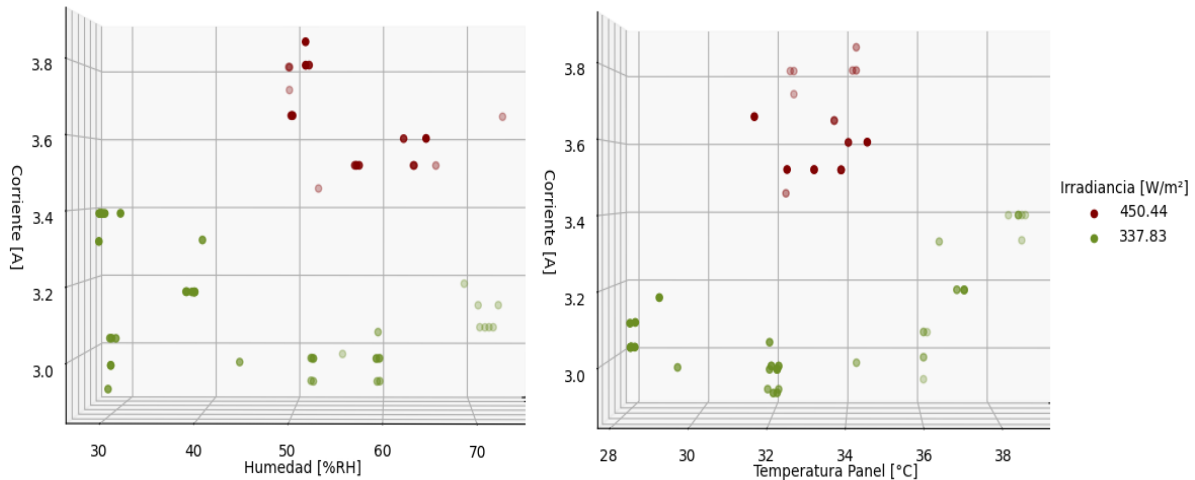


Figura 19 Relación entre la corriente - humedad y corriente - temperatura panel

La Figura 19 muestra que es posible tener un incremento en la corriente a un mismo valor de irradiancia cuando la temperatura del panel está entre 32 y 38 °C pero con humedades entre el 30 y 40 %RH, además, se encuentra que estos rangos cambian cuando la irradiancia incrementa, mostrando una mayor tolerancia a la humedad y una disminución en la temperatura del panel.

Por otro lado, la salida de voltaje presenta fluctuaciones insignificantes durante el transcurso del día, menos de 0.5%, en comparación a las de la corriente (~14%)[36]. De lo anteriormente descrito, se evidencia que la variable con la cual se ve más influenciada la potencia es la corriente, debido a que es la variable que presenta mayores cambios respecto a la irradiación, mostrando un comportamiento como el de la Figura 15.

De acuerdo con lo anterior, la energía eléctrica producida por un panel solar fotovoltaico no depende solo del nivel de irradiancia, sino que también depende de los cambios en el clima durante el día. Por otro lado, es necesario observar el comportamiento general durante varios días y determinar la influencia del cambio climatológico en la generación de energía eléctrica diaria.

Teniendo en cuenta los datos recolectados por el dispositivo de medición del proyecto y haciendo la verificación con los datos recolectados por el laboratorio de energías renovables del CTPI SENA. En la siguiente gráfica se muestra el cambio de la humedad relativa en un transcurso de 30 días entre los meses de diciembre y febrero, los cuales corresponden al primer periodo de menores precipitaciones en la región Andina [37].

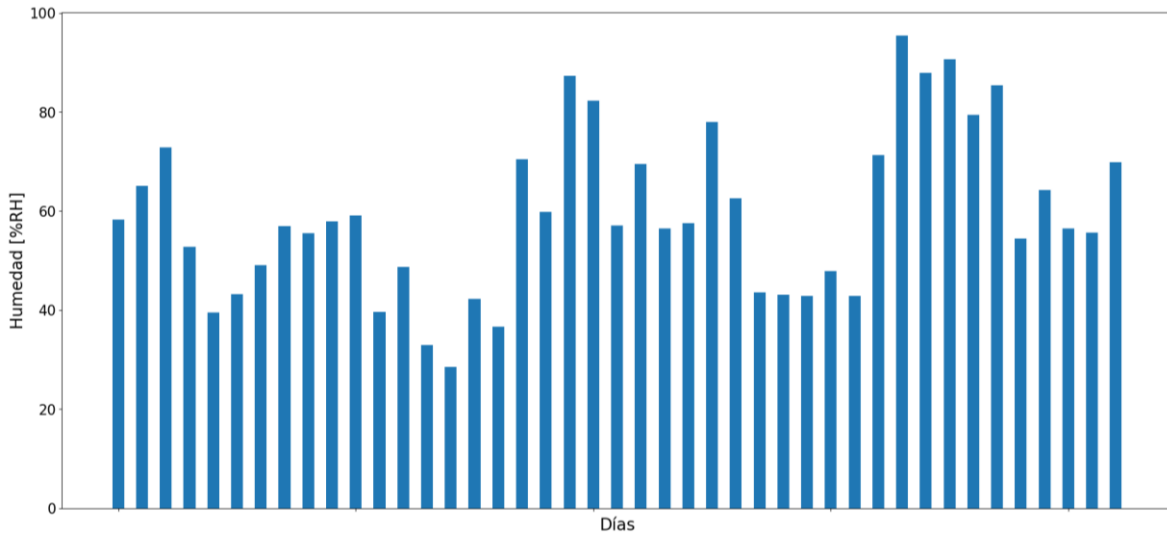


Figura 20 Cambio de la humedad relativa en la ciudad de Popayán Fuente: Propia

La anterior gráfica permite mostrar que la variación del clima en cuanto a la humedad relativa es alta y no muestra un cambio gradual o progresivo. En esta gráfica (Figura 20) se encuentra que cerca del 37% de sus días presentan humedades altas (mayores al 60%RH) y más del 50% de sus días se encuentran variaciones de la humedad relativa entre el 40%RH y el 60%RH.

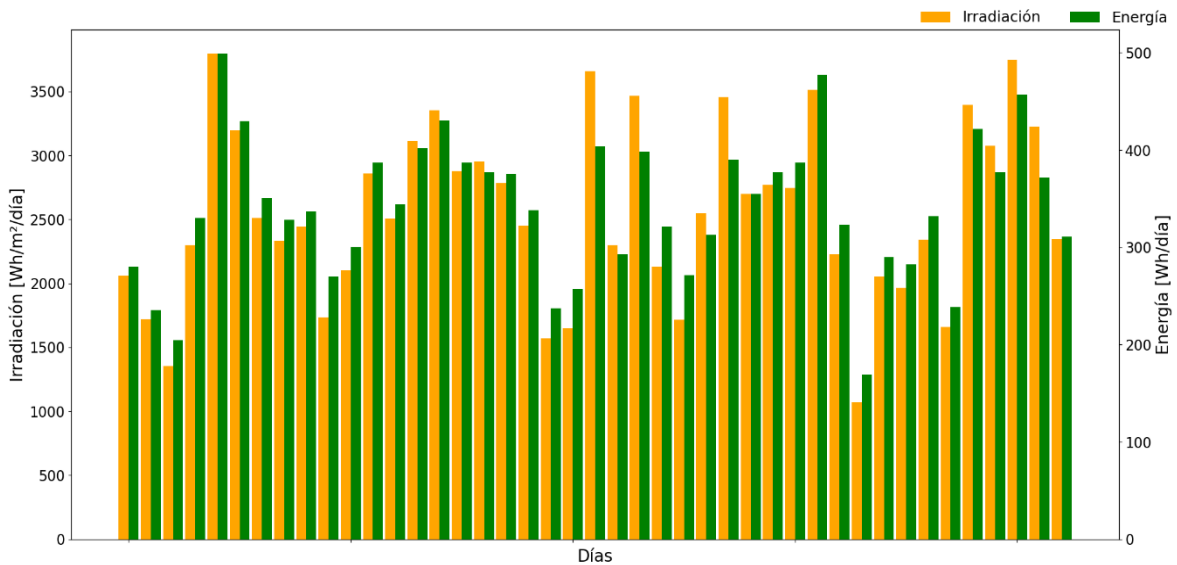


Figura 21 Relación entre energía eléctrica fotovoltaica e irradiación por día. Fuente: Propia

Para la ciudad de Popayán el promedio diario de irradiación es de 3.5 kWh/m²/día como mínimo y 4.5 kWh/m²/día como máximo [38], sin embargo, los datos recolectados por el instrumento de medición mostraron un promedio de 2.5 kWh/m²/día y una desviación de 0.7 kWh/m²/día. La Figura 21 muestra como la energía presenta variaciones de un día para otro y su generación eléctrica no es constante, esto también se debe a que la irradiación que llega cada día es distinta.

Haciendo una comparación entre la Figura 20 y la Figura 21 es posible notar que sus variables climatológicas cambian abruptamente de un día a otro, por lo que la generación de energía fotovoltaica también se puede ver afectada por esos cambios que presenta el medio al que se encuentran expuestos los paneles fotovoltaicos, además, es necesario tener una base de datos que entregue información diaria de los cambios que tiene el clima, como lo hace el laboratorio de energías renovables del CTPI SENA.

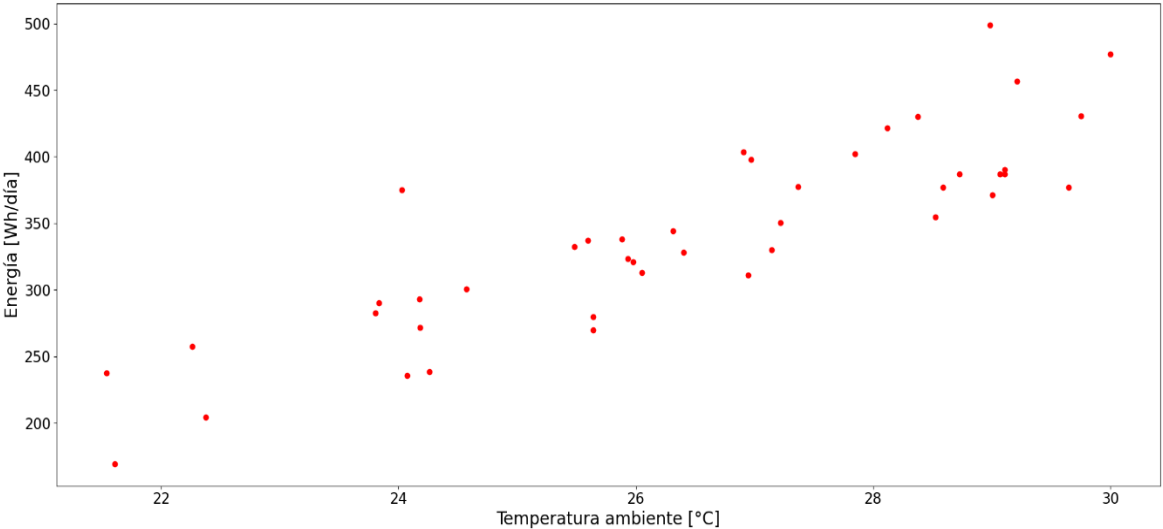


Figura 22 Relación entre la energía eléctrica fotovoltaica y la temperatura ambiente

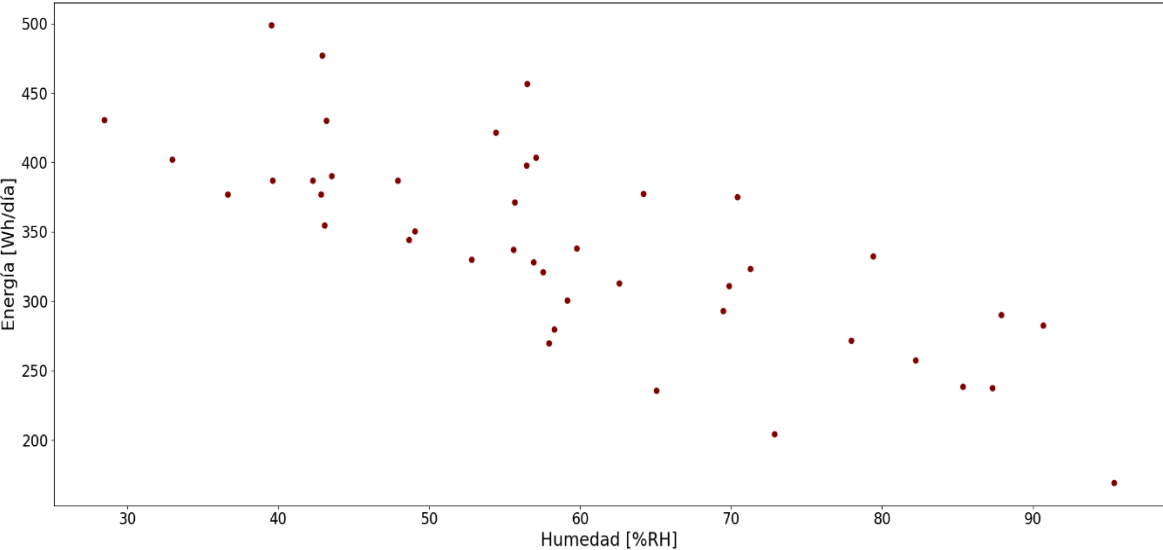


Figura 23 Relación entre la energía eléctrica fotovoltaica y la humedad.

La Figura 22 muestra un aumento en la generación de energía fotovoltaica en la medida que la temperatura ambiente crece, sin embargo, este aumento de temperatura puede deberse al aumento de la irradiación que se recibe durante el día, lo que causa un aumento en la generación eléctrica fotovoltaica, además, la temperatura ambiente es un factor importante para el rendimiento eléctrico porque

influye en la temperatura de panel la cual causa un aumento o disminución en la energía generada [39]. Por otro lado, la Figura 23 muestra un comportamiento inverso entre la humedad y la energía fotovoltaica donde hay una mayor generación eléctrica cuando la humedad es baja y en la medida que la humedad aumenta hay una disminución de la energía fotovoltaica, no obstante este comportamiento puede estar ligado a otras interacciones como la misma temperatura ambiente, el polvo y la velocidad de aire que en combinación pueden causar variaciones en el rendimiento del panel solar fotovoltaico [8], [40].

La energía eléctrica fotovoltaica presenta una relación más estrecha con la irradiación, pero debido a la influencia del clima, la energía sufre fluctuaciones en su valor esperado, así como se muestra en la siguiente gráfica:

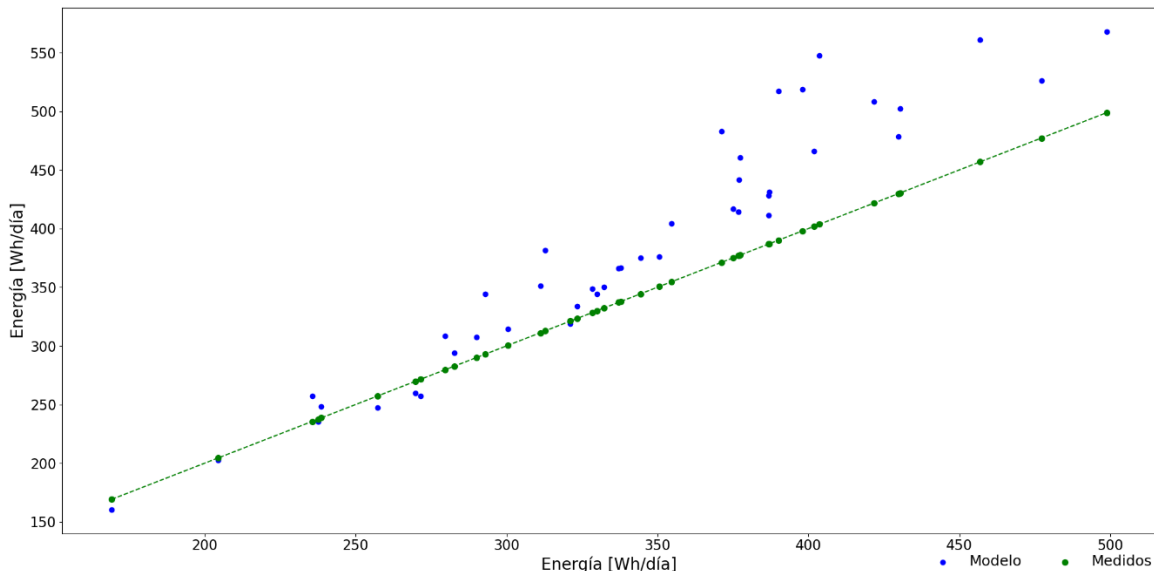


Figura 24 Relación entre la energía teórica y la energía real generada.

En la Figura 24 (*puntos azules*) se hace una comparación punto a punto de la energía real obtenida por los paneles fotovoltaicos y la energía teórica (*Ecuación 6*) que se debería generar considerando la irradiación obtenida en el día, mientras que la línea verde simboliza la tendencia que debería seguir la energía teórica respecto a los valores reales. En esta gráfica se observa que para valores bajos de energía generada los valores esperados presentan una tendencia cercana a las medidas de energía obtenidas, esto se debe a que la presencia de la irradiancia en los paneles es baja, por lo que la temperatura en el panel presenta una baja influencia en la generación de energía. Por otro lado, a medida que la irradiancia aumenta se genera una mayor cantidad de energía, pero también se ve aumentada la temperatura del panel por lo que la energía teórica discrepa en gran medida de la energía que en realidad se obtiene.

En la ciudad de Popayán se estiman variaciones de energía menores al 6% del valor esperado cuando la irradiancia se encuentra por debajo de los 2.3 kWh/m², a estas condiciones se presentan temperaturas promedio en el panel entre los 20 y 30 °C y humedades relativas superiores 59%, estas condiciones de trabajo se encontraron

en una proporción de alrededor del 27% de los días de la ciudad medidos mediante el dispositivo creado y los datos recolectados por el laboratorio de energías renovables, por lo tanto, bajo estas condiciones se podría obtener un comportamiento ideal con el valor esperado por la *Ecuación 6* donde la influencia de las variaciones climatológicas y temperatura del panel son muy bajas. Por el contrario, cuando se tiene irradiaciones superiores a los 2.3 kWh/m², la temperatura promedio del panel será superior a los 30 °C que conjunto con la humedad, su generación eléctrica es altamente afectada mostrando variaciones superiores al 15% por debajo de su valor esperado.

El error general promedio asociado a la variación de la energía eléctrica, respecto de la fórmula teórica es del 12%, mientras que si se compara la energía teórica con los datos recolectados por el laboratorio de energías renovables del CTPI SENA, el error asociado es del 15.5%. Por todo esto, se hace necesario sugerir una fórmula o un método de trabajo que ayude a tener una mejor certeza en las medidas que se emplean para hacer diseños de sistemas fotovoltaicos.

13. Construcción de modelos.

Con lo anteriormente descrito sobre la influencia de las variables climatológicas en la generación de energía fotovoltaica, se pretende discernir las variables que se van a tomar en cuenta al momento de sugerir el o los modelos estadísticos.

Variables\Valores estadísticos	Calculo 1		Calculo 2		Calculo 3		Calculo 4	
	t	P	t	P	t	P	t	P
Irradiancia	-0,253	0,802						
Humedad	-0,942	0,352	-0,942	0,352	-0,951	0,057		
Temperatura ambiente	1,093	0,281	0,4	0,691	1,111	0,045	2,519	0,016
Temperatura panel	1,093	0,281	-0,095	0,925				
Irradiación	4,852	3,82E-22	4,852	3,82E-22	10,552	1,27E-22	10,523	1,27E-22

Tabla 4. Valores estadístico P y t-student de las variables de estudio

En la Tabla 4 se muestra el criterio de selección de variables backward, para esta selección se escoge un valor de significancia de 0.05 el cual nos va a servir para la toma de decisiones. Para comenzar se selecciona la variable que presenta un valor *t* muy cercano a 0 y posteriormente se evalúa si su valor *P* es mayor al nivel de significancia, por lo que en el primer y segundo calculo se encuentra que esas variables corresponden a la Irradiancia y a la temperatura de panel, cuyo valor *P* es mucho mayor que 0.05, por lo tanto, se decide eliminar estas variables.

En el tercer calculo se encuentra que la humedad presenta un comportamiento similar al de las variables anteriores, con la diferencia que su valor *P* es muy cercano al valor de significancia, con lo cual, se decide eliminar parcialmente esta variable y determinar más adelante si se elimina del todo. En el cuarto calculo se encuentra que no es posible seguir eliminando variables quedando solamente la temperatura ambiente y la irradiación.

En la eliminación de variables el valor del determinante r^2 para los cálculos 1 y 2 fue de 0.936 y un r^2 ajustado igual a 0.929. En el cálculo 3 el valor de r^2 ajustado presentó un cambio a 0.931, en contraste con el cálculo 4, cuando se eliminó la variable de la humedad, los valores de r^2 y r^2 ajustado sufrieron un ligero cambio de 0.935 y 0.930 respectivamente.

De acuerdo con la información anteriormente presentada y los resultados de la Tabla 4, se propone utiliza la irradiación como una de las variables que deben ser incluidas, ya que a partir de esta se genera la energía en el panel fotovoltaico, además, se propone incluir la temperatura ambiente y la humedad como complementos en los modelos a sugerir.

Los modelos que se sugieren para establecer el comportamiento de la energía generada en la ciudad de Popayán relacionan a la energía fotovoltaica en función de la irradiación, humedad y temperatura ambiente.

	Modelo	Nivel	Error (%)	Error con Validación (%)
1	$E_p(I_g, H)$	1	3,348	5,014
2	$E_p(I_g, T_a)$	1	4,059	5,526
3	$E_p(I_g, H, T_a)$	1	3,745	4,547
4	$E_p(I_g, H)$	2	3,382	4,794
5	$E_p(I_g, T_a)$	2	4,271	4,991
6	$E_p(I_g, H, T_a)$	2	6,229	11,976

Tabla 5 Comparación de los errores de algunos modelos estudiados

Para encontrar un modelo que describa la energía eléctrica fotovoltaica, teniendo en cuenta los valores recolectados en un periodo de 20 a 30 días, se hace un análisis de regresión múltiple considerando las variables que se relacionan con la irradiación, además, se hace combinación de estas variables con diferentes grados de polinomios. En la *Tabla 5* se muestran los errores asociados a los modelos generados y a los errores asociados por las validaciones. De la tabla anterior (*Tabla 5*) se muestra que los modelos 3 y 4 presentan un mejor comportamiento tanto con los datos de muestreo como con la validación hecha con los datos recolectados por el laboratorio de energías renovables.

$$E_p(I_g, H, T_a) = 47.73025 + 0.082103I_g - 0.30884H + 3.74833T_a$$

$$E_p(I_g, H) = 153.688 + 0.143I_g - 1.17 \times 10^{-5}I_g^2 - 3.233H + 2.03 \times 10^{-2}H^2 + 1.22 \times 10^{-4}I_gH \quad (14)$$

$$E_p(I_g, T_a) = 138.973 + 0.214I_g - 9.4 \times 10^{-8}I_g^2 - 18.068T_a + 0.671T_a^2 - 4.98 \times 10^{-3}I_gT_a$$

Las *ecuaciones 14* hacen referencia a los modelos 3 y 4 de la *Tabla 5*, siendo estos modelos que se proponen para hacer una descripción de la energía generada a partir de los datos que se recojan en un intervalo de tiempo corto.

Para extender los modelos anteriores a paneles solares de diferente potencia se proponen las siguientes ecuaciones:

$$t_p(I_g, H, T_a) = 0.318202 + 5.47 * 10^{-4} I_g - 2.06 * 10^{-3} H + 2.5 * 10^{-2} T_a$$

$$t_p(I_g, H) = 1.025 + 9.53 \times 10^{-4} I_g - 7.77 \times 10^{-8} I_g^2 - 2.16 \times 10^{-2} H + 1.35 \times 10^{-4} H^2 + 8.14 \times 10^{-7} I_g H \quad (15)$$

$$t_p(I_g, T_a) = 0,926 + 1,43 \times 10^{-3} I_g - 6,2 \times 10^{-10} I_g^2 - 0,1204 T_a + 4,47 \times 10^{-3} T_a^2 - 3,32 \times 10^{-5} I_g T_a$$

Las *ecuaciones 15* hacen referencia al tiempo de sol efectivo en panel y se sugieren con el fin de que en un futuro diseño se haga el modelado con cualquier valor de potencia que este conformado el arreglo fotovoltaico, el procedimiento para encontrar la *ecuaciones 15* es el mismo que se aplicó con la *ecuaciones 14* y siguiendo las mismas recomendaciones donde se incluyan la irradiación la temperatura ambiente y la humedad.

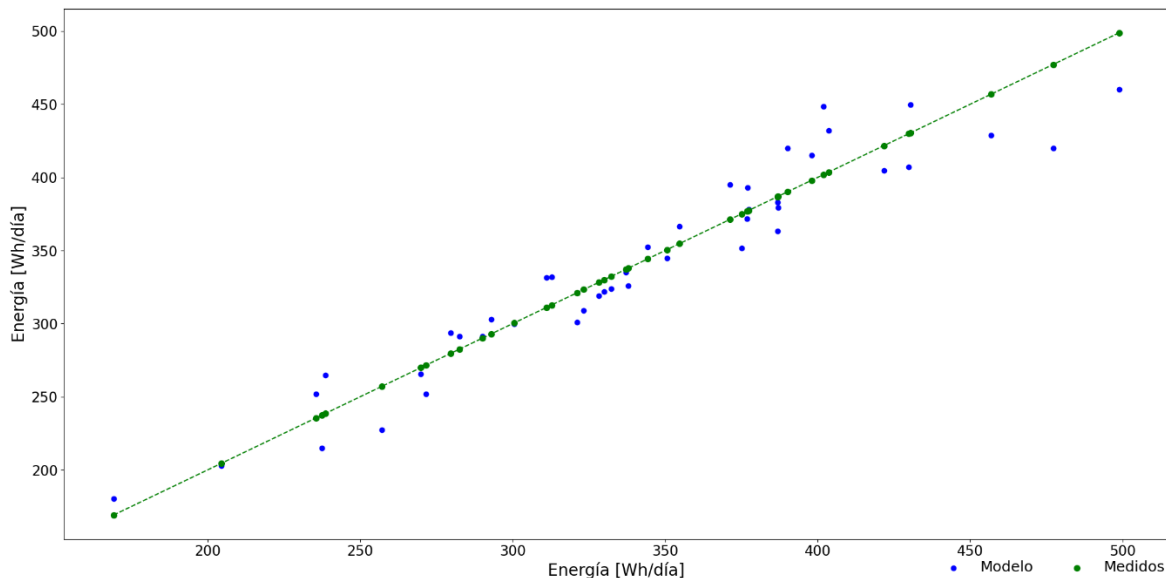


Figura 25 Gráfica de energía eléctrica fotovoltaica contra irradiación solar diaria

La Figura 25 muestra la variación de los datos generados por parte de los modelos propuestos respecto de los valores medidos. Su error asociado para la muestra obtenida es inferior al 4% a diferencia de los valores que se obtiene con la fórmula teórica que se representan en la Figura 24 que presentan una dispersión del 12%.

El resultado de la Figura 25 muestra que es posible encontrar modelos a partir de la medición de 20 a 30 días estudiados y que permitan hacer una mejor descripción de la energía eléctrica fotovoltaica que se podría generar, si se conoce el comportamiento del clima en la zona donde se pretende hacer el estudio, en este caso, la ciudad de Popayán.

CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema para la medición de variables climatológicas (humedad y temperatura), voltaje y corriente de un panel solar fotovoltaico, para determinar los cambios en la energía producida por el panel y su caracterización, de acuerdo con las condiciones ambientales del entorno.

La implementación de un sistema de medición como el que se obtuvo en este trabajo permite genera un mayor soporte en el desarrollo e implementación sistemas fotovoltaicos.

La energía eléctrica fotovoltaica se ve afectada por los cambios climáticos causando variaciones en la energía esperada según la irradiación medida, por lo que en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos se debe considerar, además de la irradiación, las condiciones climatológicas de la localidad.

El clima en la ciudad de Popayán presenta una gran variación en sus medidas, por lo que su generación eléctrica fotovoltaica no será constante, presentando días con menor producción eléctrica que otros, además se encuentran variaciones hasta del 15% de su valor esperado.

Los datos muestran una relación directa con la temperatura ambiente y una relación inversa con la humedad, para lo que se podría asumir que estas variables afectan la generación eléctrica fotovoltaica, sin embargo, se deben estudiar otras variables climatológicas, como la velocidad de viento u otras, que en conjunto permitan establecer el impacto de cada uno de estos parámetros.

Los modelos encontrados en los que se tienen en cuenta variables climatológicas como la humedad y la temperatura ambiente permiten hacer una mejor descripción del comportamiento de la energía fotovoltaica que se genera, contrario a los modelos donde solo se tiene en cuenta la irradiación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. P. Marques Filho *et al.*, “Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling,” *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 64–74, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.040.
- [2] M. E. Meral and F. Dinçer, “A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2176–2184, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.010.
- [3] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, “Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 175–180, 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.09.001.
- [4] F. Zaoui, A. Titaouine, M. Becherif, M. Emziane, and A. Aboubou, “A Combined Experimental and Simulation Study on the Effects of Irradiance and Temperature on Photovoltaic Modules,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 373–380, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.393.
- [5] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, “A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 104–109, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.03.004.
- [6] M. Chegaar, A. Hamzaoui, A. Namoda, P. Petit, M. Aillerie, and A. Herguth, “Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 722–729, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.084.
- [7] S. Hamou, S. Zine, and R. Abdellah, “Efficiency of PV module under real working conditions,” *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 553–558, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.067.
- [8] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, “Effect of Humidity on Photovoltaic Performance Based on Experimental Study,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 23, pp. 4357–43577, 2016.
- [9] M. K. Panjwani and G. B. Narejo, “Effect of Humidity on the Efficiency of Solar Cell (photovoltaic),” *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 499–503, 2014.
- [10] E. D. Obando-Paredes and R. Vargas-Cañas, “Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular,” *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 40, no. 154, p. 27, Mar. 2016, doi: 10.18257/raccefyn.301.
- [11] C. A. Astaiza Ordoñez and C. F. Gaviria Delgado, “Diseño de un equipo autónomo, para determinar índices en la producción de energía solar fotovoltaica a partir de variables climatológicas y espectros de radiación,”

Universidad del Cauca, 2017.

- [12] R. Guerrero Pérez, *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas (UF0150)*. Málaga, SPAIN: IC Editorial, 2011.
- [13] J. I. Pfeffer and S. Nir, "The Photoelectric Effect," in *Modern Physics: An Introductory Text*, 1st ed., Imperial College Press, 2000, pp. 115–119.
- [14] H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRIAG J. Astron. Geophys.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–61, 2014, doi: 10.1016/j.nrjag.2014.04.001.
- [15] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [16] A. Bouraiou *et al.*, "Analysis and evaluation of the impact of climatic conditions on the photovoltaic modules performance in the desert environment," *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 1345–1355, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.073.
- [17] S. Sundaram and J. S. C. Babu, "Performance evaluation and validation of 5 MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India," *Energy Convers. Manag.*, vol. 100, no. 2015, pp. 429–439, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.04.069.
- [18] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.012.
- [19] H. El Achouby, M. Zaimi, A. Ibral, and E. M. Assaid, "New analytical approach for modelling effects of temperature and irradiance on physical parameters of photovoltaic solar module," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 258–271, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.054.
- [20] V. J. Chin, Z. Salam, and K. Ishaque, "Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review," *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 500–519, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.035.
- [21] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [22] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Academic press Canada, Inc., 1983.
- [23] T. Muneer, C. Gueymard, and H. Kambezidis, *Solar Radiation and Daylight Models*. Elsevier Ltd. All rights reserved, 2004.
- [24] SolarBaba Group, "Polycrystalline Solar Module." p. 1.
- [25] Davis Instruments, "Solar radiation sensor." pp. 1–2, 2014.
- [26] Allegro MycroSystems LLC, "ACS712 DataSheet." p. 15, 2017, [Online]. Available: www.allegromicro.com.
- [27] AOSONG, "Temperature and Humidity Module," *Datasheet*.

- Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd., p. 11, [Online]. Available: www.aosong.com.
- [28] Arduino, "Arduino Mega2560." [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>.
- [29] G. Van Rossum and F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [30] Python Software, "Python," *Python Software Foundation*, 2019. <https://www.python.org/>.
- [31] J. Reback *et al.*, "pandas-dev/pandas: Pandas 1.0.0." Zenodo, 2020, doi: 10.5281/zenodo.3630805.
- [32] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [33] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in {P}ython," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.
- [34] C. Scientific, "Eppley PSP Precision Spectral Pyranometer," 2001. www.campbellsci.com.
- [35] V. B. Omubo-Pepple, C. Israel-Cookey, and G. I. Alaminokuma, "Effects of temperature, solar flux and relative humidity on the efficient conversion of solar energy to electricity," *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 35, no. 2, pp. 173–180, 2009.
- [36] H. A. Kazem *et al.*, "Effect of humidity on the PV performance in Oman," *Asian Trans. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 29–32, 2012.
- [37] IDEAM, "Boletín climatológico," 2019. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual?p_p_id=110_INSTANCE_xYvIPc4uxk1Y&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=2&_110_INSTANCE_xYvIPc4uxk1Y_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fvie.
- [38] IDEAM, "Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia." <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- [39] S. Chandra, S. Agrawal, and D. S. Chauhan, "Effect of ambient temperature and wind speed on performance ratio of polycrystalline solar photovoltaic module: An experimental analysis," *Int. Energy J.*, vol. 18, no. 2, pp. 171–179, 2018.
- [40] H. Salimi, A. Mirabdollah Lavasani, H. Ahmadi-Danesh-Ashtiani, and R. Fazaeli, "Effect of dust concentration, wind speed, and relative humidity on the performance of photovoltaic panels in Tehran," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1080/15567036.2019.1677811.