

Comparison of the methods relation to determine the efficiency of a photovoltaic panel.

Comparación de la relación de métodos para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico.

Cayo Ramirez Maria Belen¹, Tuquerres Imbaquingo Oscar Santiago¹, Maya Izurieta Néstor Xavier¹

¹Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador

E-mail: mabel_belen28@hotmail.com

E-mail: oscartuquerres2@gmail.com

E-mail: nmaya@istct.edu.ec

RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudia los métodos para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico policristalino a través del análisis comparativo de su rendimiento basado en irradiación y temperatura obtenidos por dos modelos matemáticos y métodos experimentales (realizado en las instalaciones del ISUCT). Los resultados permiten identificar cuan eficiente es el panel fotovoltaico bajo condiciones reales de trabajo. Además, fue posible realizar una relación teórico-práctica entre escenarios optimista y pesimista de generación de energía fotovoltaica. Se identificó que la relación de eficiencia puede o no ser proporcional a la temperatura y/o irradiancia que recibe el panel.

Palabras clave— Panel fotovoltaico, eficiencia, rendimiento, factor de forma, irradiación solar, modelos matemáticos.

ABSTRACT

This research work studies the methods to determine the efficiency of a polycrystalline photovoltaic panel through the comparative analysis of its performance based on irradiation and temperature obtained by two mathematical models and experimental methods (carried out at the ISUCT facilities). The results allow to identify how efficient the photovoltaic panel is under real working conditions. In addition, it was possible to make a theoretical-practical relationship between optimistic and pessimistic scenarios of photovoltaic power generation. Identifying that the efficiency ratio is or is not proportional to the temperature and /or irradiancia received by the panel.

Keywords— Photovoltaic panel, efficiency, performance, form factor, solar irradiation, mathematical models.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los sistemas de energía solar generaron 85 TW/h de electricidad en el año 2011, dicha cantidad fue suficiente para cubrir las necesidades de 100 millones de personas. Europa es la región líder en proyectos fotovoltaicos, con una capacidad instalada de 51 GW, seguida por Japón (5 GW), EE. UU. (4,4 GW) y China (3,1 GW). (Arencibia Carballo, 2016)

En Ecuador la mayor cantidad de paneles solares en generación distribuida están ubicados en zonas rurales, su uso en residencias o comercios es casi nulo a diferencia de países europeos, esto impulsa al desarrollo de aplicaciones con energías renovables exclusivamente con paneles fotovoltaicos para lograr el uso masivo de los mismos aplicados al sector y residencial, teniendo a la energía solar como principal fuente de generación alternativa a desarrollar en el país. (El Universo, 2017)

Según Marthoz Calderon (Calderon, 2018) el efecto fotovoltaico "(EF)" es el principal factor para la conversión de la radiación solar, esto fue determinado luego de varios estudios realizados por el científico Alexander Edmon y el profesor Gryslls Adams, para dar creación a las primeras celdas fotovoltaicas de silicio que son capaces de admitir radiación directa y difusa, la misma que tiene una producción de energía de 2 a 4 Amperios, con un voltaje de 0.46 a 0.48 voltios y eficiencia de conversión teórica máxima de 33.7%. (Torres Pacheco J. P., 2018)

La eficiencia tiene un papel importante para seleccionar un panel fotovoltaico (PV), puesto que es una medida de la cantidad de energía solar que cae sobre la superficie de un panel fotovoltaico y se convierte en electricidad, en este proceso de conversión se consideran factores como temperatura,

punto de máxima potencia, punto de máxima corriente, irradiancia y temperatura. (Torres Pacheco J. P., 2018)

Gaglia y otros (Athina G. Gaglia, 2017) estudiaron la eficiencia en paneles policristalinos en determinados tiempos para observar el rendimiento tomando en cuenta la temperatura, teniendo como resultado el 18.1% de eficiencia, además de tener una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de celda de 25 °C, bajo la norma IEC 60904-1.

T. Vargas y A. Abrahamse (Abrahamse, 2014) en su trabajo "*Trazador de Curvas I-V de código abierto para Monitoreo de Rendimiento de Paneles Fotovoltaicos*" señalan que la manera más completa de medir la eficiencia de un PV es a través de la medición de la curva de corriente-voltaje (I-V), al comparar la corriente de máxima potencia "(Imp)" y el voltaje de máxima potencia "(Vmp)" con el voltaje de circuito abierto "(Voc)" y la corriente de cortocircuito "(Isc)" se puede determinar el rendimiento del panel, el área rectangular bajo la curva de máxima potencia es denominado factor de relleno (FF) el cual expresa cuan eficiente es un PV.

De la Cruz Montañez, Josmel William Bastidas Guzmán, Yubica Margarita (De la Cruz Montañez, 2020) en su estudio de los modelos matemáticos tales como Modelo matemático de Evans & Florschuetz (1977), y modelo matemático de Anis et al. (1983) realizaron una comparación entre los modelos mencionados a partir de pruebas en paneles monocristalinos, obteniendo como resultados favorables en su eficiencia con un equivalente entre sí.

En base a los estudios previos, el trabajo de investigación realiza un estudio de los métodos para determinar la eficiencia de un panel fotovoltaico y un análisis respecto a

sus características técnicas y analíticas que permiten identificar y mejorar la eficiencia de estos, mediante comparación teórica-práctica de modelos y experimentación.

A continuación, se detalla el uso de variables matemáticas y de experimentación que se consideran en el estudio, los diferentes métodos y modelos matemáticos para determinar la eficiencia de un panel, así como la metodología para la experimentación y toma de datos en los diferentes factores analizados.

2. DATOS Y VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables por considerar para la comparación de métodos experimentales con modelos matemáticos de eficiencia de PV son la irradiancia y la temperatura tomando como condición de trabajo la posición del sol (tabla 1). Lo anterior se realizó con ayuda de los equipos del laboratorio del Instituto Superior Universitario Central Técnico, características que se detallan en la tabla 5, el cual estará instrumentado por sensores de voltaje, corriente y potencia para la evaluación de los parámetros de operación y rendimiento. además de ello se toma como referencia el estudio de (De la Cruz Montañas, 2020)

Tabla 1
Variables a considerar en el estudio

| Posición del sol | Irradiancia | Temperatura del panel |
|------------------|-------------|-----------------------|
| 60° | 100 | 53,2 |
| 45° | 284 | 54 |
| 30° | 553 | 55,5 |
| 15° | 839 | 57,6 |
| 00° | 1020 | 59,9 |

Fuente: Propia

La tabla 2 representa un resumen estadístico de los datos del voltaje en

circuito abierto (Voc) en condiciones de la resistencia en 1k Ω , 100 Ω y 10 Ω .

Tabla 2
Descripción estadística de voltaje experimental.

| | Media | Des | Var | CV | Min | Max |
|--------------|-------|-----|------|-----|------|------|
| Voc | 19,3 | 0,5 | 0,2 | 0,0 | 18,5 | 19,9 |
| 1K Ω | 19,3 | 0,6 | 0,3 | 0,0 | 18,1 | 20,2 |
| 100 Ω | 10,7 | 3,6 | 13,1 | 0,3 | 5,0 | 15,8 |
| 10 Ω | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,4 | 0,5 | 1,5 |

Fuente: Propia

El resumen estadístico de los datos de corriente de corto circuito (Isc) en condiciones de la resistencia en 1k Ω , 100 Ω y 10 Ω se presente en la tabla 3.

Tabla 3
Descripción estadística de corriente experimental.

| | Media | Des | Var | CV | Min | Max |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Isc | 0,141 | 0,039 | 0,002 | 0,278 | 0,080 | 0,190 |
| 1K Ω | 0,042 | 0,004 | 0,000 | 0,093 | 0,040 | 0,050 |
| 100 Ω | 0,128 | 0,034 | 0,001 | 0,268 | 0,070 | 0,180 |
| 10 Ω | 0,137 | 0,040 | 0,002 | 0,291 | 0,080 | 0,190 |

Fuente: Propia

La recolección de datos prácticos en laboratorio se realiza bajo los siguientes parámetros (tabla 4):

Tabla 4
Parámetros para la evaluación práctica de modelos

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Hora | 10:00 am |
| Temperatura ambiente | 22°C |
| AM | 1.5 |
| Irradiancia | 1000 kWh/m ² |
| Tamaño muestra | 494 datos |

Fuente: Propia

De manera contigua el módulo de carácter emulativo utilizado para el desarrollo de la investigación consta de las siguientes características:

Tabla 5
Características técnicas de módulo práctico

| Datos Técnicos | |
|------------------------------|------|
| Modulo solar policristalino | 10W |
| Reflector halógeno regulable | 500W |

| | |
|-----------------------------|----------------------|
| Voltaje en circuito abierto | 26V |
| Corriente de corto circuito | 650 mA |
| Dimensiones | 0.1122m ² |

Fuente: Lucas Nulle labsoft

Las pruebas experimentales someten al módulo a diferentes condiciones de operación donde se toman datos de Voc, Isc, Vmp, Imp y temperatura.

Los datos prácticos recopilados permiten determinar cuál de los métodos tiene características que son equivalentes o tienen relación a los modelos matemáticos de Evans and Florschuetz (1977) y Anis utilizados en el estudio de: De la Cruz Montañez (De la Cruz Montañez, 2020) los cuales evalúan un rendimiento estimado a partir de diferentes constantes y condiciones de operación.

3. MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se toma en consideración tres métodos para determinar la eficiencia que podemos encontrar en nuestros paneles fotovoltaicos conocidos como: Factor de forma (FF), eficiencia en la conversión de energía y modelos matemáticos, los cuales se detallan a continuación.

3.1. El factor de forma.

Es la relación entre la potencia máxima y el producto de Isc y Voc. Su valor es más alto cuanto mejor es la célula. Por lo general, un valor bajo de FF está asociado con la existencia de pérdidas de eficiencia en el dispositivo, mientras que una célula de buena calidad suele tener valores de FF superiores a 0.70, se calcula mediante la ecuación 1. (Europe, 2007)

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1)$$

Donde:

- **FF**: Factor de forma o llenado
- **Pmp**: Punto de máxima potencia
- **Voc**: Voltaje en circuito abierto
- **Isc**: Corriente de corto circuito

3.2. Eficiencia en la conversión de energía.

Otra manera de calcular la eficiencia en un panel fotovoltaico es a través del método por eficiencia en la conversión de energía, según D. Pérez (Garrido, 2009), en su trabajo de tesis "Análisis de un Sistema de Iluminación, Utilizando Ampolletas de Bajo Consumo y Alimentado por Paneles Fotovoltaicos" nos explica que la eficiencia de un panel fotovoltaico, corresponde al porcentaje de energía eléctrica generada en relación a la cantidad de energía luminosa recibida desde el sol, cuando el panel se encuentra conectado a un circuito eléctrico.

Para determinar el coeficiente de rendimiento "(η)" de una celda solar se necesita el punto de máxima potencia "(MPP)", la intensidad de radiación "(GT)" y la superficie "(A)" de la celda solar. Este coeficiente se calcula a partir de la siguiente relación:

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{GT \times A} = \frac{P_{mp}}{GT \times A} \quad (2)$$

Donde:

- **η**: Rendimiento
- **Pmp**: Punto máximo de potencia
- **GT**: Irradiancia solar
- **A**: Área del PV

Para calcular el rendimiento de paneles fotovoltaicos se usan condiciones de prueba estándar (STC) de irradiancia y temperatura utilizadas universalmente según la norma IEC 60904-1, para así caracterizar células, módulos y generadores solares (Edwin Rua Ramirez, 2021). El rendimiento de una célula solar disminuye con el aumento de la temperatura, esto se debe a que cuando

tenemos mayor temperatura de trabajo en el panel se experimenta un aumento de corriente y disminución de voltaje. (Swapnil Dubey, 2012). Igualmente, cuando la temperatura de trabajo del panel desciende este incrementa su voltaje y reduce ligeramente la corriente.

3.3. Modelos matemáticos empíricos de la eficiencia de un PV.

Los modelos matemáticos nos aportan un rendimiento estimado con respecto a la temperatura que experimenta el PV. Los modelos matemáticos utilizados como referencia para el desarrollo, comparación y relación en el presente trabajo son:

3.3.1.- Modelo matemático de Evans & Florschuetz (1977).

Este modelo permite determinar un rendimiento estimado del panel fotovoltaico de acuerdo a las condiciones de temperatura que interactúan con el mismo.

Para el análisis del mismo se utilizaron los coeficientes citados en la investigación "Evaluación de tres modelos matemáticos de la eficiencia de un panel fotovoltaico" donde:

$$\eta = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T - T_{ref})] \quad (3)$$

Donde:

- η : Rendimiento
- $\eta_{T_{ref}}$: Rendimiento en temperatura de referencia (0.11)
- β_{ref} : coeficiente de temperatura (0.004)
- T : Temperatura de la celula
- T_{ref} : Temperatura de referencia (25°C)

3.3.2.- Modelo matemático de Anis et al. (1983).

De la misma manera el modelo matemático de Anis muestra un rendimiento estimado, en este caso para el cálculo dicho modelo

utiliza los coeficientes a_1 y a_2 , coeficientes que nos permiten determinar el rendimiento sobre estimando.

Para η_{ref} se utiliza el mismo valor tomado en el trabajo de "E. Skoplaki, J.A. Palyvos (E. Skoplaki, 2009) en su trabajo "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations" donde indica: $\eta_{ref} \approx 0.12$ basado en ello podemos determinar el rendimiento a través de la ecuación:

$$\eta = \eta_{ref} \left[1 - a_1(T - T_{ref}) + a_2 \ln \left[\frac{GT}{1000} \right] \right] \quad (4)$$

Donde:

- η : Rendimiento
- η_{ref} : Rendimiento de referencia
- $a_1 = 0.005$
- $a_2 = 0.052$
- GT : Irradiancia Solar

La recolección de datos para los modelos matemáticos mencionados se efectúa bajo parámetros específicos y sometiendo al panel de prueba a distintas configuraciones.

4. RESULTADOS

4.1. Factor de Forma.

La comparación del punto máximo de potencia con el Voc y la Isc determina el rendimiento del panel, de manera gráfica, el área bajo la curva es conocida como el factor de forma.

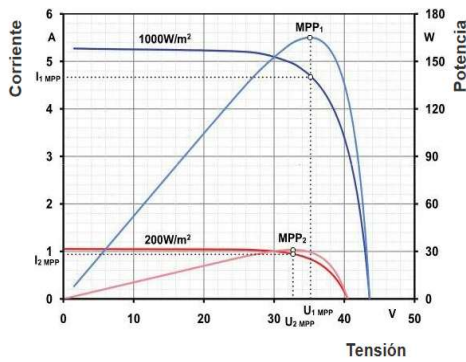


Figura 1: Curva I-V de un panel fotovoltaico
Fuente: Lucas Nulle labsoft

El resultado de la ecuación del factor de forma es una constante adimensional, si el valor es inferior a 0,7 es recomendable evitar el uso de estos paneles, ya que dicho valor indica cuan eficiente es el panel y también las características de las cuales está compuesto. Para comprobar de manera experimental el método propuesto, se realiza la toma de datos de Voc e Isc del módulo fotovoltaico descritos en la tabla 6 y tabla 7 respectivamente, además, se determina el Pmp por medio de la curva I-V.

Tabla 6
Voltajes en circuito abierto

| GT | ∠ | 1 | 2 | 3 | 4 | Pro |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100 | 60° | 18,45 | 18,55 | 18,49 | 18,72 | 18,55 |
| 284 | 45° | 19,16 | 19,26 | 19,17 | 19,41 | 19,25 |
| 553 | 30° | 19,48 | 19,57 | 19,49 | 19,72 | 19,57 |
| 839 | 15° | 19,63 | 19,73 | 19,63 | 19,85 | 19,71 |
| 1020 | 00° | 19,65 | 19,76 | 19,66 | 19,89 | 19,74 |

Fuente: Propia

Tabla 7
Corrientes de corto circuito

| GT | ∠ | 1 | 2 | 3 | 4 | Pro |
|------|-----|------|------|------|------|------|
| 100 | 60° | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 284 | 45° | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 553 | 30° | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 839 | 15° | 0,18 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,18 |
| 1020 | 00° | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 |

Fuente: Propia

Posterior a la toma de datos de voltaje y corriente, se procede a excitar el panel fotovoltaico sometiéndolo a diferentes configuraciones, de esta manera obtener la

curva de I-V, los valores obtenidos para cada configuración se muestran en la tabla 8 a la tabla 12.

Tabla 8
Excitación del panel con ángulo de 60°

| | V | I |
|------|-------|-------|
| Voc | 18,55 | 0,001 |
| 1KΩ | 18,32 | 0,04 |
| 100Ω | 5,21 | 0,07 |
| 10Ω | 0,48 | 0,08 |
| Isc | 0,001 | 0,08 |

Fuente: Propia

Tabla 9
Excitación del panel con ángulo de 45°

| | V | I |
|------|-------|-------|
| Voc | 19,25 | 0,001 |
| 1KΩ | 19,21 | 0,04 |
| 100Ω | 8,80 | 0,11 |
| 10Ω | 0,81 | 0,11 |
| Isc | 0,001 | 0,12 |

Fuente: Propia

Tabla 10
Excitación del panel con ángulo de 30°

| | V | I |
|------|--------|-------|
| Voc | 19,565 | 0,001 |
| 1KΩ | 19,56 | 0,044 |
| 100Ω | 11,91 | 0,14 |
| 10Ω | 1,118 | 0,148 |
| Isc | 0,001 | 0,15 |

Fuente: Propia

Tabla 11
Excitación del panel con ángulo de 15°

| | V | I |
|------|-------|-------|
| Voc | 19,56 | 0,001 |
| 1KΩ | 19,56 | 0,044 |
| 100Ω | 11,91 | 0,14 |
| 10Ω | 1,118 | 0,148 |
| Isc | 0,001 | 0,15 |

Fuente: Propia

Tabla 12
Excitación del panel con ángulo de 0°

| | V | I |
|------|--------|-------|
| Voc | 19,74 | 0,001 |
| 1KΩ | 19,764 | 0,04 |
| 100Ω | 15,47 | 0,17 |
| 10Ω | 1,49 | 0,18 |
| Isc | 0,001 | 0,19 |

Fuente: Propia

Basados en los datos recopilados se hace las pruebas de laboratorio bajo el método de factor de forma y se realiza el trazo de curvas de I-V, arrojando los resultados siguientes.

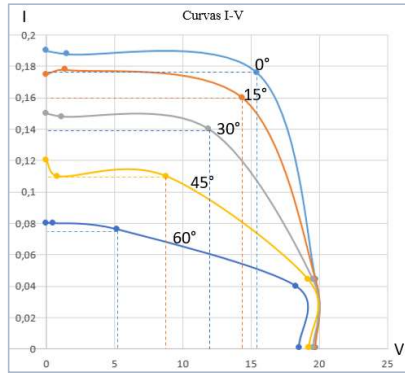


Figura 2: Curvas I-V con diferentes ángulos de inclinación del panel

Fuente: Propia

Se observa como el factor de forma varía de acuerdo con la posición del panel fotovoltaico.

Tabla 13

Cálculo del factor de forma

| Angulo | 60 | 45 | 30 | 15 | 0 |
|--------|------|------|------|-------|-------|
| FF | 0.49 | 0.42 | 0.57 | 0.667 | 0.726 |

Fuente: Propia.

La curva de I-V en los parámetros mostrados con respecto a la figura 2, nos muestra un comportamiento ascendente con respecto al grado de inclinación de nuestro PV, a partir de la fórmula planteada (1) se obtiene como resultado los datos de la tabla 13.

4.2. Eficiencia en la Conversión de energía.

A través de la ecuación de rendimiento establecida (2) se procede a evaluar el mismo para la experimentación realizada.

Es importante tomar como referencia las normas universales (IEC 60904-1) las cuales establecen parámetros de pruebas óptimas para determinar la eficiencia de los paneles

fotovoltaicos, por lo cual se somete a las pruebas bajo las siguientes condiciones:

- Irradiancia: 1000 Wh/m² (G)
- Temperatura de las células: 25 °C
- Distribución espectral de la luz: AM1.5G

A partir de los parámetros se establece requisitos básicos para la medida de las características corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos. El cálculo del rendimiento se efectúa haciendo uso de nuestro punto máximo de potencia, la irradiancia y el área o superficie del panel fotovoltaico. Este método fue replicado para cinco configuraciones, diferente resistencia con diferentes tipos de radiación.

Tabla 14

Irradiancia según el ángulo de la posición del sol

| Irradiancia | Posición del sol |
|-------------|------------------|
| 100 | 60° |
| 284 | 45° |
| 553 | 30° |
| 839 | 15° |
| 1020 | 00° |

Fuente: Propia

Los factores principales que intervienen en la estimación del rendimiento se ven reflejados en la tabla 14, dichos valores a partir de la ecuación 2, arrojan los siguientes resultados.

Tabla 15

Evaluación de rendimiento por la conversión de energía

| Angulo | 60 | 45 | 30 | 15 | 0 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| η | 6.54% | 3.04% | 2.69% | 2.45% | 2.38% |

Fuente: Propia

La evaluación estadística de los datos de experimentación, indican un decrecimiento del rendimiento a medida que incrementa el valor de irradiación, dicho

comportamiento se ve reflejado en la figura 3.

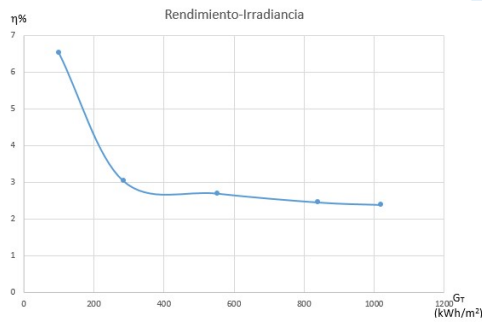


Figura 3: Comportamiento del rendimiento con respecto a la irradiancia.

Fuente: Propia

4.3. Evaluación respecto a modelos matemáticos.

En la evaluación del modelo matemático de Evans la variable que interactúa con el sistema es la temperatura, a partir de ello y con el cálculo utilizando la ecuación (3) el rendimiento estimado para cada caso de experimentación se muestra en la tabla 12

Tabla 16

Evaluación del modelo matemático de Evans

| °∠ | η Tref | βref | T | Tref | ηest |
|----|--------|-------|------|------|-------|
| 60 | 0,11 | 0,004 | 53,2 | 25 | 0,098 |
| 45 | 0,11 | 0,004 | 54 | 25 | 0,097 |
| 30 | 0,11 | 0,004 | 55,5 | 25 | 0,097 |
| 15 | 0,11 | 0,004 | 57,6 | 25 | 0,096 |
| 0 | 0,11 | 0,004 | 59,9 | 25 | 0,095 |

Fuente: Propia

Del mismo modo el modelo matemático de Anis refleja a la temperatura como la variable que interactúa con el sistema, con el cálculo a partir de la ecuación (4) se obtiene los siguientes valores de rendimiento estimado:

Tabla 17

Evaluación del modelo matemático de Anis

| °∠ | η ref | GT | βref | T | Tref | ηest |
|----|-------|------|-------|------|------|-------|
| 60 | 0,12 | 100 | 0,004 | 53,2 | 25 | 0,089 |
| 45 | 0,12 | 284 | 0,004 | 54 | 25 | 0,095 |
| 30 | 0,12 | 553 | 0,004 | 55,5 | 25 | 0,098 |
| 15 | 0,12 | 839 | 0,004 | 57,6 | 25 | 0,099 |
| 0 | 0,12 | 1020 | 0,004 | 59,9 | 25 | 0,099 |

Fuente: Propia

4.4. Comparación de rendimiento estimado con el rendimiento experimental.

Al conocer analíticamente el porcentaje de rendimiento estimado, en base a cada uno de los modelos matemáticos analizados, para el modelo matemático de Evans un decrecimiento en el rendimiento y para el modelo matemático de Anis un incremento en el mismo.

Usando los datos mostrados de rendimiento para cada configuración y de los modelos matemáticos se realiza una comparativa del rendimiento estimado con el rendimiento experimental sometido a cada modelo matemático, dichos valores se ven reflejados en las tablas 18 y 19.

Tabla 18

Comparativa rendimiento estimado de Evans con rendimiento experimental

| ηexp | ηest | E.R | E.A |
|------|-------|---------|------|
| 6,54 | 9,759 | 32,99 % | 3,22 |
| 3,04 | 9,724 | 68,74 % | 6,68 |
| 2,69 | 9,658 | 72,15 % | 6,97 |
| 2,45 | 9,566 | 74,39 % | 7,12 |
| 2,38 | 9,464 | 74,85 % | 7,08 |

Fuente: Propia

Tabla 19

Comparativa rendimiento estimado de Anis con el rendimiento experimental

| ηexp | ηest | E.R | E.A |
|------|-------|---------|------|
| 6,54 | 8,871 | 26,28 % | 2,33 |
| 3,04 | 9,475 | 67,91 % | 6,43 |
| 2,69 | 9,800 | 72,55 % | 7,11 |
| 2,45 | 9,934 | 75,34 % | 7,48 |
| 2,38 | 9,918 | 76,00 % | 7,54 |

Fuente: Propia

La comparativa nos indica que los Factores E.R (Error relativo) y E.A (Error Absoluto) en se ven denotados por una diferencia constante y decreciente en ambos modelos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados muestran 4 etapas de análisis respecto a la eficiencia de un panel fotovoltaico y a los parámetros que intervienen en la misma, la metodología implica someter de manera práctica a los modelos analizados, se obtiene en principio un factor de forma que varía de acuerdo a la configuración utilizada para el panel fotovoltaico, este nos ayuda a determinar el punto de inflexión del máximo punto de potencia para cada prueba y en base a ello el comportamiento ascendente del "FF", mientras menor es la inclinación y por ende mayor irradiación solar recibe el panel.

Los datos revisados en la tabla 13 muestran un mejor comportamiento de este factor al incrementar la irradiación tanto en valor como en cantidad que ingresa al panel independientemente de las características técnicas previas del equipo. En resultado a dicho comportamiento y datos el rendimiento del panel sometido a cada configuración muestra un decrecimiento en el rendimiento para los valores que corresponden a un incremento del factor de forma, se comprende como las características influyentes para la eficiencia de un panel fotovoltaico intervienen de forma directa.

Si bien el factor de forma hace referencia a incrementar cuando existe más irradiación, la capacidad de transformar esa irradiación en energía eléctrica es lo que determina finalmente la eficiencia, pues al tener una irradiación solar mayor y con ello un incremento no proporcional de la potencia máxima, conlleva a este decrecimiento de la eficiencia, además se toma en cuenta que para cada parámetro y configuración, mientras más irradiación recibe el panel, mayor será su temperatura que implica la

reducción del voltaje y por ende afecta el rendimiento final.

A partir de comprender lo mencionado en el párrafo anterior se realiza la evaluación de los parámetros prácticos a los modelos matemáticos donde a partir de la inclinación e irradiación se determina una temperatura que interactúa directamente con estos modelos, dicha evaluación arroja 2 resultados diferentes.

Para el modelo matemático de Evans se puede hacer una relación a resultados obtenidos, ya que se observa un decrecimiento de dicho rendimiento estimado cuando la temperatura incrementa, debido a las propias características de transformar la energía solar en energía eléctrica del panel, pues se observa un factor de forma ascendente a mayor irradiación, sin embargo la energía producida finalmente no compensa ese aumento de energía solar conllevando a un rendimiento alejado a partir de descender el ángulo de 45° o incrementar la irradiación arriba de 230 Wh/m^2 .

El factor importante por comparar es el comportamiento de decrecimiento en dicho rendimiento estimado al disminuir el ángulo, elevarse la irradiación y la temperatura. El modelo matemático de Anis refleja todo lo contrario, al subir la temperatura lo que se observa es un crecimiento en el rendimiento estimado.

La eficiencia en un panel fotovoltaico resulta importante para el aprovechamiento idóneo y continuo del potencial solar, en consecuencia, el análisis del rendimiento teórico vs práctico trae consigo varias ventajas a la hora de elegir un panel para un proyecto fotovoltaico. Someter a un panel a ensayos bajo condiciones STC puede determinar un comportamiento deficiente o productivo

respecto a los valores deseados, considerando los factores que influyen en el crecimiento o decrecimiento de dicha eficiencia, así como su comparación analítica de ciertos modelos matemáticos.

El presente estudio abre paso a diferentes análisis multicriterio del comportamiento de la eficiencia en paneles fotovoltaicos de diferente composición, marca y sometidos a diferentes configuraciones para ampliar el estado del arte y evolucionar gradualmente los porcentajes de eficiencia actuales de paneles fotovoltaicos en el mercado, además contribuye a la difusión de aspectos altamente relevantes para elegir un panel y determinar incluso una producción de energía eléctrica útil real, aplicando dichos estudios en departamentos de calidad de fabricación de paneles o departamentos de ingeniería dedicados a la instalación y puesta en marcha de dichos sistemas.

6. CONCLUSIONES

- Se determina que el factor de forma al ser asociado con la calidad de los materiales es importante para discernir las condiciones de trabajo de nuestro PV. El estudio del FF y las diferentes condiciones de trabajo a las que se sometió, dan como resultado distintos coeficientes, resultando en ser más óptimo cuando este percibe mayor cantidad de radiación solar.

- De acuerdo con los resultados del análisis del rendimiento se puede observar como la conversión de energía tiende a disminuir conforme el ángulo del panel disminuye y por ende este recibe más irradiación y temperatura, demuestra que, a pesar de tener un factor de forma adecuado y ascendente, la capacidad del panel de transformar la energía solar en energía eléctrica a partir de sus características

físicas y de composición determina finalmente el rendimiento.

- Los datos de experimentación sometidos a los modelos matemáticos determinan el rendimiento estimado de nuestro panel fotovoltaico, este guarda relación con el rendimiento estándar de un panel fotovoltaico policristalino que es aproximada el 10% de los modelos matemáticos frente al 13% del rendimiento estándar.

- Los resultados experimentales utilizados en el desarrollo de la investigación se relacionan con el comportamiento del modelo matemático de Anis, aun así, con valores alejados y no guardan relación con el modelo matemático de Evans, esto se ve reflejado en el análisis comparativo de los mismos, lo anterior plantea la necesidad de un mayor estudio en los equipos de laboratorio empleados en los procesos formativos.

7. REFERENCIAS

- Abrhamse, T. V. (2014). Trazador de Curvas I-V de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia. *UPB*, 102.
- Arencibia Carballo, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica. *REDVET*, 2.
- Athina G. Gaglia, S. L. (2017). Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditione an experimental assessment in Athens, Greece. *ELSEVIER*, 241.
- Calderon, M. (2018). *Desarrollo de un Sistema Fotovoltaico de Concentracion para Aplicaciones de Co-Generacion*. Aguascalientes:

Centro de Investigaciones en
Optica, A.C.

De la Cruz Montañes, J. W. (2020).
*Evaluacion de Tres Modelos
Matematicos de la Eficiencia de un
Panel Fotovoltaico*. Huacayo:
Universidad Nacional del Centro del
Peru.

E. Skoplaki, J. P. (2009). On the temperature
dependence of photovoltaic
module electrical performance: A
review of efficiency/power
correlations. *ELSEVIER*, 616.

Edwin Rua Ramirez, I. D. (2021). Banco de
pruebas didáctico para aprendizaje
y medición del rendimiento de
paneles solares fotovoltaicos.
Revista UIS Ingenierias, 5.

El Universo. (9 de Junio de 2017). La energia
solar se abre terreno en Ecuador. *El
Universo*, pág. 1.

Europe, S. (2007). *SUNFIELDS*. Obtenido de
[https://www.sfe-
solar.com/noticias/articulos/modul
o-fotovoltaico-parametros-
fundamentales/](https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-parametros-fundamentales/)

Garrido, D. O. (2009). *ANÁLISIS DE UN
SISTEMA DE ILUMINACIÓN,
UTILIZANDO AMPOLLETAS DE BAJA
CONSUMO Y ALIMENTADO POR
PANELES FOTOVOLTAICOS*.
Valdivia: Universidad Austral de
Chile.

Swapnil Dubey, J. N. (2012). Temperature
Dependent Photovoltaic (PV)
Efficiency and Its Effect on PV
Production in the World A Review.
ELSEVIER, 313.

Torres Pacheco, J. P. (2018). Eficiencia en
Paneles Solares. *Revista del Diseño
Innovativo*, 13-14.

Torres Pacheco, J. P. (2018). Eficiencia en
Paneles Solares. *Revista del Diseño
Innovativo*, 10.