

Eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos: análisis de rendimiento y factores determinantes

Energy efficiency in photovoltaic systems: performance analysis and determining factors

Carlos Alberto Fernández V.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0983-8777>
Correo: carlosfernandez@ulatina.edu.pa
Universidad Latina, Panamá

Resumen

El proceso de generación de energía se ha vuelto más costoso, y la demanda ha aumentado considerablemente. Como resultado, el precio de la energía a nivel mundial se ha disparado hasta alcanzar niveles históricos. Una de las alternativas más fiables y sostenibles es el uso de paneles solares o energía fotovoltaica. El objetivo de este estudio es determinar en qué horarios se genera mayor cantidad de energía solar, con el fin de optimizar su aprovechamiento. Métodos: Se trata de una investigación de campo, de enfoque cuantitativo y de corte transversal. La muestra fue observada durante 10 días, en los meses de febrero y marzo, desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. Resultados: Se encontró que la mayor producción de energía solar ocurre entre las 8:00 a.m. y las 3:00 p.m. Conclusión: Una parte considerable de la energía generada durante el día se desperdicia, ya que las luminarias y equipos eléctricos se utilizan principalmente en horas nocturnas, cuando no hay generación directa de energía solar.

Palabras Clave

Inversores, Paneles solares, Reguladores, Ahorro energético.

Abstract

The process of generating energy has become more expensive, and demand has increased significantly. As a result, global energy prices have soared to historic levels. One of the most reliable and sustainable alternatives is the use of solar panels or photovoltaic energy. The objective of this study is to determine the time periods during which the highest amount of solar energy is generated, in order to optimize its use. Methods: This is a field study with a quantitative and cross-sectional approach. Data were collected over a 10-day period during the months of February and March, from 6:00 a.m. to 6:00 p.m.

Results: The highest levels of solar energy generation were observed between 8:00 a.m. and 3:00 p.m. Conclusion: A significant portion of the energy generated during the day is lost, as lighting and electrical equipment are mostly used at night, when there is no direct solar energy generation.

Keywords

Inverters, Solar panels, Regulators, Energy savings.

Introducción

La eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos ha sido un aspecto central en la transición hacia fuentes de energía renovables. La eficiencia, entendida como el cociente resultante de la relación entre la energía eléctrica útil producida y la energía solar incidente sobre el panel (Duffie & Beckman, 2013), depende de múltiples factores: físicos, ambientales y tecnológicos.

A su vez, en condiciones estándar de prueba (STC), los paneles de los tipos monocristalino y policristalino modernos pueden alcanzar eficiencias del 15% al 22%; no obstante, en condiciones reales, esta suele ser inferior.

En el contexto tropical de países como Panamá, existen una serie de factores ambientales que influyen directamente en el rendimiento eléctrico de los paneles solares, como la temperatura, la humedad relativa, la nubosidad y la irradiancia solar diaria. Lorenzo et al. (2018) afirman que temperaturas superiores a los 25°C, típicas de los ambientes tropicales, pueden reducir el rendimiento hasta en un 0,4 % por cada grado adicional, lo cual resulta crítico, ya que en Panamá las temperaturas oscilan entre los 28 y 33°C.

En estudios recientes desarrollados por Pérez y Jiménez (2020), se concluye que la eficiencia real de los paneles solares instalados en regiones tropicales es idónea, aunque rara vez alcanza el 80% del rendimiento teórico, si se consideran las pérdidas debidas a orientación, suciedad y eficiencia del inversor. En este sentido, resulta crucial realizar mediciones de voltaje (V) y corriente (I) de forma *in situ*, como se ha hecho en este estudio, para obtener la potencia eléctrica generada $P=V \times I$ durante las distintas horas del día.

Considerando estos datos junto a los de las tablas de radiación solar históricas —por ejemplo, las disponibles en Tutiempo.net— se podría estimar, a su vez, la eficiencia diaria del sistema, y de esta forma determinar también las horas de mayor aprovechamiento solar. La comparación de ambos resultados permite verificar si el sistema cumple con los niveles de irradiancia esperados y detectar posibles desviaciones causadas por pérdidas térmicas en la superficie del panel o por deficiencias en su limpieza.

Asimismo, se ha encontrado literatura relacionada en países con latitudes similares a Panamá (8–10° N), como Costa Rica, Colombia y Tailandia, cuyos estudios muestran curvas de comportamiento similares a las obtenidas en esta investigación. Un ejemplo es el documento de Vega-Baudrit et al. (2019), en el que se indica que la producción pico se da entre las 9:00 y las 14:30, lo que coincide con las horas de mayor generación observadas en el presente estudio. Investigaciones realizadas en Cartagena (Colombia) y Chiang Mai (Tailandia) demuestran que los sistemas fotovoltaicos en regiones tropicales requieren ajustes menores en la inclinación y muestran resiliencia ante cielos intermitentes, aunque también presentan una leve disminución de eficiencia frente a condiciones de alta humedad o cielo completamente cubierto.

Así pues, este estudio se enmarca en una línea de investigación que no solo busca validar la eficiencia técnica del sistema, sino también orientar la adaptación del conocimiento global al entorno tropical panameño, aportando datos concretos que faciliten la toma de decisiones en la instalación óptima de sistemas fotovoltaicos.

Si bien la migración hacia modelos de generación eléctrica más amigables con el medio ambiente y el impulso del uso de energías renovables han sido de creciente interés en el caso de Panamá, la expansión de la energía solar dentro del sistema eléctrico nacional aún enfrenta importantes retos. Estos desafíos no solo se relacionan con su posible evolución técnica, sino también con el desarrollo del conocimiento del consumidor, ambos aspectos fundamentales para la adecuada implementación y aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos.

Uno de los retos más significativos es la escasez de estudios sistemáticos locales que analicen la eficiencia real de los paneles fotovoltaicos (PV) frente a las condiciones meteorológicas particulares del país. En específico, factores como la iluminancia, la temperatura ambiente y los períodos de nubosidad inciden directamente en el rendimiento de estos sistemas.

A menudo, los paneles fotovoltaicos son instalados siguiendo especificaciones determinadas en laboratorio, es decir, bajo condiciones estándar (STC, por su sigla en inglés: 1000 W/m², 25°C), sin considerar necesariamente el contexto geográfico o climático de Panamá. Esto puede provocar discrepancias notables entre la eficiencia eléctrica teórica y la eficiencia eléctrica real alcanzada, lo cual introduce un grado de incertidumbre relevante para ingenieros civiles, diseñadores de sistemas fotovoltaicos y consumidores finales.

Dado que Panamá es un país tropical con alta irradiancia solar, pero también con niveles elevados de nubosidad y humedad durante amplios periodos del año, se hace necesario contar con un análisis representativo de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos operando en condiciones reales. Esto requiere una muestra adecuada de instalaciones ubicadas en diferentes regiones del país, así como una red de monitoreo eléctrico que permita obtener datos directos y confiables del funcionamiento de los sistemas a lo largo del tiempo.

La importancia del presente estudio radica en que proporciona una base científica para la evaluación del desempeño de los sistemas solares en Panamá. El país presenta un gran potencial para consolidar su transición energética como parte de su **Agenda de Transición Energética 2020–2030**, que compromete al país a alcanzar al menos un 70% de generación eléctrica a partir de fuentes renovables para el año 2030 (Secretaría Nacional de Energía, 2020). El cálculo detallado de la eficiencia de los paneles solares in situ, basado en datos eléctricos reales (corriente, voltaje y potencia) y en condiciones climáticas locales (irradiancia, temperatura), permite establecer una guía técnica adecuada para el diseño e instalación de sistemas fotovoltaicos.

Por otro lado, los resultados obtenidos contribuirán a la elaboración de políticas públicas más ajustadas a la realidad energética nacional, favorecerán la toma de decisiones técnicas por parte de ingenieros y desarrolladores, y fortalecerán la confianza del usuario final, al ofrecer estimaciones realistas sobre el rendimiento esperado de los sistemas, tanto en aplicaciones residenciales como comerciales.

Asimismo, este trabajo de investigación servirá como referencia para futuros estudios académicos y como insumo para universidades, instituciones gubernamentales e industrias del sector energético interesadas en promover el uso de fuentes renovables.

Delimitación:

El trabajo concreto se limita a paneles solares para uso comercial (300–400 W desde luego) instalados en ciertas zonas de Panamá (ciudad de Panamá, Chiriquí, Coclé), incluidos parámetros como irradiancia, temperatura, corriente y voltaje medidos durante un tiempo mínimo de 30 días sin considerar posibles instalaciones de almacenamiento en baterías y/o inyecciones a red excluyendo hoy en día el tipo de instalaciones híbridas o con sombreados relevantes.

Metodología

La presente investigación se contextualiza dentro de una modalidad experimental, trato menor de cuantitativa y de diseño transversal, puesto que se recopilaban determinados datos en un periodo temporal determinado con el objeto de analizar el comportamiento de un sistema fotovoltaico en condiciones reales.

La investigación se realizó de forma que se implementó un prototipo funcional del sistema cargador compuesto por un panel solar de 330 W conectado a un sistema de carga compuesto por controlador de carga, baterías y un multímetro digital, que proporcionaron valores reales a los medios de producción eléctrica en términos de voltaje (V) y corriente (I), durante toda la jornada, obteniendo posteriormente la potencia generada mediante, la siguiente fórmula:

$$P=V \times I$$

A. Paneles Solares

Un panel solar es un dispositivo que utiliza la energía solar para generar electricidad, estos paneles tienen múltiples celdas, llamadas celdas fotovoltaicas que convierten la radiación solar en electricidad. Esta se genera debido al efecto fotovoltaico que provoca la energía de la luz solar o fotones sobre el material del

panel, generando una carga positiva y negativa que circula en las celdas solares y que luego son recolectadas y enviadas a través de cables a un regulador para cargar la batería o para su uso.



Fig 1: Panel solar monocristalino.

B. Inversores

El inversor es un dispositivo que convierte la corriente directa almacenada en la batería o generada por el panel solar en corriente alterna para su transmisión y uso directo en los equipos de la industria o las casa.



Fig 2: Inversor de 410 Watts 120 Voltios

C. Baterías de gel

Las baterías de gel o de ciclo profundo es una batería sellada cuyo electrolito es un gel de sílice que no es líquido, estas baterías están diseñadas para durar mucho más tiempo que otros tipos de baterías y generalmente tienen partes de fibra de vidrio, las ventajas que tienen es que mantienen mucho más tiempo la carga almacenada, mejor rendimiento a temperaturas bajas, y mayor capacidad de entrega de corriente.



Fig 3: Batería de Gel 12 Voltios

D. Reguladores de voltaje

Es un dispositivo eléctrico diseñado para suministrar un diferencial de voltaje estable y de forma permanente, algunos protegen los circuitos también, en el caso de la investigación fueron utilizados para suministrar un voltaje de 24 VDC al MPPT ya que este tiene una entrada de 24 Voltios como máximo y entre las 8:00 a.m. y las 3:30 p.m. el voltaje del panel Solar sobre pasaba los 24 voltios, este para protegerse aislaba el sistema y evitaba que la batería se cargara.



Fig 4: Regulador de voltaje 48VDC a 24VDC

E. Kill a Watt

Es un medido de consumo energético diseñado y fabricado por la empresa P3 International, es utilizado e implementado por técnicos e ingenieros eléctricos para determinar casi con exactitud el consumo de una línea hasta 10 A 110 Voltios, tiene una pantalla LCD donde puede observarse el consumo en tiempo real.



Fig 5: Kill a Watt medidor de voltaje y consumo

F. Cables y conectores

Conectores MC4 es un conector eléctrico que es utilizado para conectar módulos o paneles solares entre sí y al regulador de voltaje de la batería. Además, están diseñados para poder conectar los Paneles en configuraciones de serie y paralelo.

Cable para panel solar tipo 4MM2, este cable es recomendado para las instalaciones de paneles fotovoltaicos expuestos al medio ambiente, dentro de sus características es que posee una resistencia a altas temperaturas y a los rayos ultravioleta, estos cables deben durar 25 años aproximadamente.



Fig 6: Conectores MC4 y Cables 4MM

G. MPPT Solar Panel Regulator Charge Controller 12V/24V

Es un dispositivo electrónico que se utiliza para regular el voltaje en la batería, él está constantemente revisando el porcentaje de carga de la batería para no sobre calentarla, utiliza una técnica basada en un algoritmo matemático para realizar seguimiento de la potencia de la instalación y así conocer cuál es el punto más alto en el que se alcanza la máxima potencia.

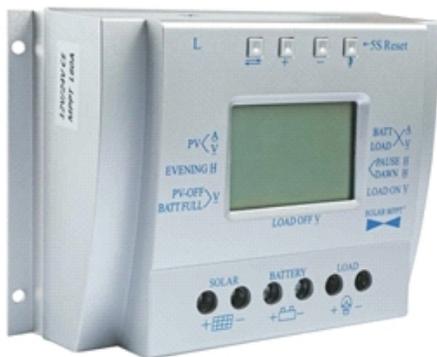


Fig. 7: Controlador de regulador para panel solar. MPPT

Argumentos

La mayoría de los países no poseen yacimientos de petróleo o grandes riquezas minerales como gas, carbón entre otras, pero muchos de estos países tienen mucha precipitación pluvial, vientos o permanece soleado casi todo el año, esto ha estimulado el uso de energía alternativa y renovable, logrando que estos países hagan parques fotovoltaicos, eólicos e hidroeléctricos para aumentar la capacidad energética del país y proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento de este.

La energía cada día es más difícil de generar y la ha hecho más costosa, esto ha dado origen a inversiones que hacen empresas y familias en comprar sistemas solares para disminuir el costo de la energía. Como sabemos a finales del 2022 finalizó el subsidio de la energía y actualmente solo se mantiene en las casas que consumen menos de 300KWatt al mes, por lo cual es importante saber el consumo mensual y el consumo diario de la energía para poder bajarla a 300KWatts al mes. Dependiendo de la distribuidora el precio puede oscilar entre 0.13 y 0.12 dólares el KWatt (tarifas eléctricas que se pagarán desde el 1 de enero de 2023, ASEP, ENSA) y básicamente lo que tendríamos que hacer es apuntar el promedio de consumo mensual y restarle 300KWatts para saber cuánta energía necesitamos generar y pagar por debajo de los 300KWatts al mes, si nos pasamos de 300KWatts el costo subiría a entre 16 y 18 centavos (Tarifas del Sector Eléctrico: Año 2022), aumentando el costo de este (Lineamientos de la Agenda de Transición Energética 2020-2030).

Descripción del Prototipo

Se utilizó un panel solar de 330 W y 33 V para realizar las pruebas y mediciones. A este se le conectó un regulador de voltaje de 48 VDC a 24 VDC y 10 A, ubicado en la entrada del regulador de carga de la batería. El mismo contaba con un data logger incorporado, el cual registraba información como: el consumo y nivel de carga de la batería, la temperatura, la carga de los dispositivos conectados (consumo), la corriente generada por el panel solar y el voltaje, entre otros datos relevantes.

Los paneles solares fueron conectados al regulador mediante un conector tipo MC4, utilizando cables tipo 4 mm², de color rojo y negro. Estos cables pasaban por un interruptor de seguridad, que permitía trabajar en el sistema sin el riesgo de generar un cortocircuito desde el panel solar.

Una parte del circuito fue implementada en corriente directa (DC); sin embargo, debido a la longitud de los cables de aproximadamente 10 metros, se presentaron ciertos problemas de caída de tensión. Estos fueron solucionados parcialmente mediante el uso de bancos de capacitores.

El proyecto está ubicado a 9.0121 y -79.4947 GPS, provincia de Panamá, con una orientación aproximada de 20 grados del sur y una inclinación de 6.8 grados sobre la horizontal, no existe ningún tipo de obstáculo sobre los 20 grados este y oeste.

Haciendo una medición diaria y tomando 4 días de referencia para comparar las mediciones tenemos las siguientes tablas:

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga
6:30	17	0.4	64	-0.3
7:00	23.9	1.5	74	-0.3
7:30	24	2.7	80	-0.3
8:00	24	4	84	-0.3
8:30	24.1	5.7	86	-0.6
9:00	24.2	6.7	97	-0.1
9:30	24.3	6.1	100	-0.3
10:00	24	3.1	91	-0.4
10:30	24.5	7	100	-1.5
11:00	24.4	4	94	-1
11:30	24.6	3.3	100	-1.8
12:00	24.5	2.3	91	-1.2
12:30	24.5	3.1	100	-1
13:00	24.5	2.9	96	-0.7
13:30	24.6	1.7	100	-0.5
14:00	24.6	2.2	100	-0.7
14:30	19.8	2.3	100	-0.8
15:00	19.1	0.7	87	-0.6
15:30	24.4	0.8	100	-0.6
16:00	24.4	2	100	-0.7
16:30	24.1	1.6	100	-0.6
17:00	20.3	1.6	100	-0.6
17:30	20.8	0.8	86	-0.5
18:00	16.4	0.3	80	-0.5
18:30	13	0	77	0
19:00	---	---	---	---
19:30	0	0	78	-0.9

Tabla 1: tabla de medición completa del 7 de abril de 2023

En la tabla 1, tenemos la información de las horas medidas el voltaje recibido por el MPPT, la corriente generada por el Panel Solar, la carga de la batería y el consumo en Amperios por algunos dispositivos conectados al MPPT. Según esta tabla el horario con mayor incidencia está entre las 8 a.m. y las 2 p.m., para esto hicimos otras mediciones en los mismos horarios y esperamos que no estuviera nublado.

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga
6:30	16	0.2	61	-0.4
7:00	18	0.5	62	-0.8
7:30	24.2	2.4	74	-0.3
10:00	24.1	6.5	100	-0.2
10:30	24.2	3.9	100	-0.3
11:00	24.2	5.1	100	-0.7
11:30	24	3.8	100	-0.6
12:00	24.6	0.8	94	-0.4
12:30	24.4	6.3	91	-2.3
13:00	24.4	4	97	-0.7
13:30	24	0.8	100	-0.4
14:00	24.4	2.1	100	-0.4
14:30	16.4	1.1	94	-0.4
15:00	23.3	1.2	84	-0.4
15:30	18.7	0.6	84	-0.4
16:00	23.2	1.1	84	-0.4

Tabla 2: tabla de referencia del 8 de abril de 2023

En la tabla 2 vemos que la referencia nos indica que hasta la 1 p.m. la irradiación solar fue máxima, después de esa hora se nubló por lo cual no pudimos conseguir más información.

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga	Voltaje	Temperatura
6:30	16.8	0.4	70	-0.4	12.8	---
7:00	23.9	1.4	74	-0.3	13	---
9:00	24.3	4.6	100	-0.4	13.8	---
9:30	24.6	4.1	100	-0.4	13.7	---
10:00	24.4	4.6	100	-0.4	14.5	---
10:30	24.2	2.2	94	-1.2	13.6	---
11:00	24.1	5.9	100	-1.3	13.8	30
11:30	24.5	2.3	100	-1.2	13.8	31.5
12:00	24.6	2.2	94	-1.1	13.6	31.1
12:30	24.3	2.4	100	-1.2	13.8	32.8
13:00	24.4	1.4	100	-1.1	13.7	34.3
13:30	24.3	1.7	100	-1.1	13.8	35.4
14:00	24.4	4	100	-1	13.8	34.3
14:30	24.2	1.1	94	-1	13.8	35.4
15:00	24.3	2.8	100	-1.1	13.7	34.9
15:30	24	1.9	97	-1	13.8	34.8
16:00	24.2	2.2	100	-1	13.8	---
16:30	24.5	2.6	100	-1.3	---	39
17:00	24	2	100	-0.8	13.8	39.2
17:30	20	0.9	80	-0.9	13.2	31.2
18:00	15	0.3	80	-0.9	13.2	27.4
18:30	0.2	0	78	-0.5	13.1	---

Tabla 3, Tabla de referencia del día 9 de abril de 2023

En la tabla 3 de referencia tenemos que hasta las 2 p.m. fue el pico más alto de la irradiación solar pero también podemos apreciar las lecturas de temperatura y voltaje medidos de la batería, donde 13.8V nos indica que la batería está al 100% de carga.

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga	Voltaje	Temperatura
6:00	13	0	61	-0.9	12.6	22
6:30	14.9	0.2	64	-0.7	12.7	22.9

Tabla 4, tabla de descarga de la batería 10 de abril de 2023

En la tabla 4 y utilizando la tabla 3 podemos apreciar que desde las 6 p.m. del día 9 de abril hasta el 10 de abril la batería se llegó a descargar un 20%, con un consumo promedio de 1 Amp hora.

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga	Voltaje	Temperatura
6:15	13.7	0	67	-0.5	12.8	23.4
6:30	16	0.3	68	-0.5	12.8	23.2
6:45	19.4	0.6	68	-0.5	12.8	23.4

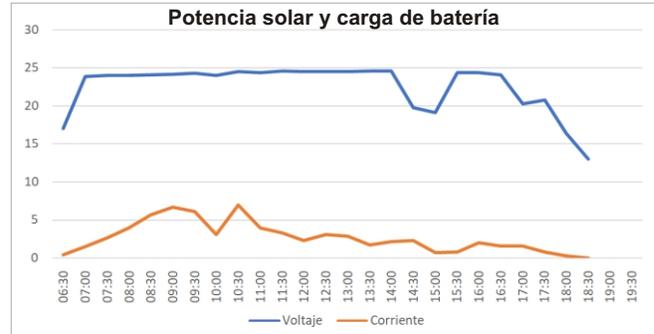
Tabla 5: tabla de referencia de 11 de abril de 2023

Revisando cada una de las tablas y las mediciones tomadas podemos ver que entre las 6:00 a.m. y las 6:15 a.m. a pesar de que existe un bajo voltaje de carga la corriente es casi nula y a partir de las 7:00 a.m. ya tenemos un voltaje de carga de 24 voltios.

Hora	Voltaje	Corriente	Capacidad	Carga	Voltaje	Temperatura
7:00	22	0.8	70	-0.4	12.9	23.4
9:30	24.5	5.5	99	-0.6	13.8	29.4
10:00	24.1	2.4	100	-0.6	13.9	29.6
11:00	24.3	1.4	100	-0.6	13.7	30.5
11:30	24.4	3.8	100	-0.6	13.7	31.7
12:00	24.2	1.8	100	-0.8	13.8	31.9
13:00	24	2	100	-10	13.8	32.4
14:00	24.4	2.1	100	-0.8	13.8	32.4

Tabla 6. Tabla de referencia de carga del día 15 de abril de 2023

Como último día de medición observamos que a partir de las 9:30 a.m. la batería de 50 Amph llega a su punto máximo de carga al 100%, en todas las mediciones estuvo despejada la mañana hasta medio día, donde empezó a nublarse, pero ya la batería estaba a su carga máxima. (Elena Fernández, 2023).

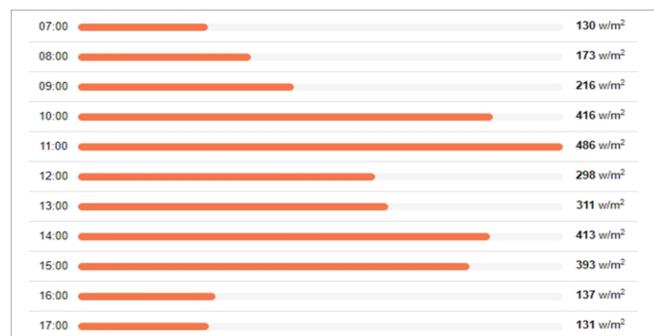


Grafica 1: Potencia generada por panel solar vs carga de batería

Al revisar la Tabla 1 y compararla con las tablas siguientes, se puede observar que, de enero a abril, se obtiene una generación solar promedio de aproximadamente 5 horas pico por día. Con un flujo de corriente de alrededor de 2.5 amperios por hora, durante las 12 horas en que el panel solar recibe iluminación, y considerando que la batería no debe descargarse por debajo del 50% (en nuestro caso se ha considerado un límite del 60%), se observa que para las 9:30 a.m. ya se encuentra completamente cargada.

En este contexto, se puede afirmar que un panel solar de 330 W y 10 A es capaz de cargar una batería de 100 Ah, además de alimentar una carga aproximada de 70 Ah entre las 6:00 a.m. y las 6:00 p.m.

La carga reflejada en las tablas corresponde a los equipos conectados al sistema. Todos ellos funcionan con corriente directa (DC) e incluyen: cuatro bombillos de 12 V y 5 W, dos lámparas LED de 36 V y 7 W, un abanico de 12V y un deshumidificador de 5V y 3A. Eventualmente, también se conectan celulares y baterías para recarga.



Grafica 2. Tabla de radiación solar en Panamá 12 de octubre 2023. (tutiempo.com, Panamá, 2023).

Aunque la Gráfica 2 fue tomada con varios meses de diferencia, se puede notar que sus máximos comienzan casi al mismo tiempo que en el mes de marzo. Esto indica que, a pesar de que octubre es un mes bastante nublado, genera una cantidad significativa de radiación infrarroja y ultravioleta.

Resultados y Discusión

Como resultado, se determinó que entre las 8:00 a.m. y las 2:00 p.m. se registró la mayor ganancia de energía por parte del panel (corriente generada). Esta variación dependía de la cantidad de nubes presentes en el cielo, aunque, tomando como referencia las distintas lecturas aleatorias realizadas en los días posteriores (*Ilumin.*), se observó un patrón consistente.

Mediante cálculos estimativos, se puede precisar que con un panel solar de 330 W y 33 V es posible cargar una batería de 100 Ah, considerando un consumo promedio de 1 A/h durante el período de carga diario.

Más adelante, se tiene previsto conectar al sistema un inversor de 420 W, con el fin de alimentar equipos que requieran corriente alterna, tales como abanicos, televisores, entre otros.

Propiedades Eléctricas

Factor de Forma (Ilumin, 2020; Elena Fernández, 2023).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

Donde,

I_m es la corriente máxima de potencia.

V_m es la tensión de máxima potencia.

I_{sc} es la corriente de corto circuito.

V_{oc} es la tensión de circuito abierto.

Fórmula de eficiencia de una célula solar Fotovoltaica

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{G \times Area}$$

η = % eficiencia

FF = Factor de Forma

V_{oc} = Máxima tensión en circuito abierto

I_{sc} = Máxima corriente en corto circuito

G = Irradiancia (kWh/m²) sobre la célula o panel

Área = En metros cuadrados del Panel o Célula.

Cálculo de Rendimiento para Panel JKM330PP en Panamá

Condiciones:

Ubicación: Ciudad de Panamá

Irradiancia (GG): 850 W/m² (día típico tropical)

Temperatura ambiente: 35°C

HSP: 4.8 horas

1. Cálculo de Temperatura de Celda

Fórmula:

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G}{800} \times (NOCT - 20)$$

NOCT=45°C (valor típico para paneles policristalinos, no especificado; asumido de datos similares)

$$T_{cell} = 35 + \frac{850}{800} \times (45 - 20) = 35 + 1.0625 \times 25 = 61.56^\circ C$$

2. Voltaje Real en Punto de Máxima Potencia (V_{mp})

Fórmula (coeficiente temperatura $\beta_V = -0.30\% / ^\circ C$):

$$V_{mp_real} = V_{mp\ S\ TC} \times [1 + \beta_V \times (T_{cell} - 25)] \times \frac{G}{1000}$$

$$V_{mp_real} = 37.8 \times [1 - 0.003 \times (61.56 - 25)] \times \frac{850}{1000}$$

$$V_{mp_real} = 37.8 \times [1 - 0.003 \times 36.56 - 25] \times 0.85$$

$$V_{mp_real} = 37.8 \times 0.89032 \times 0.85 = 28.6\ V$$

3. Corriente Real en Punto de Máxima Potencia (I_{mp})

Fórmula (coeficiente temperatura $\alpha_I = -0.06\% / ^\circ C$):

$$I_{mp_real} = I_{mp\ S\ TC} \times [1 + \alpha_I \times (T_{cell} - 25)] \times \frac{G}{1000}$$

$$I_{mp_real} = 8.74 \times [1 - 0.0006 \times (61.56 - 25)] \times \frac{850}{1000}$$

$$I_{mp_real} = 8.74 \times 1.02194 \times 0.85 = 7.61\ A$$

4. Potencia Real Generada

$$P_{real} = V_{mp_real} \times I_{mp_real} = 28.6 \times 7.61 = 217.6\ W$$

Pérdidas por temperatura:

5. Energía Diaria Generada

Fórmula:

$$E_{dia} = P_{real} \times HSP \times PR$$

Performance Ratio (PRPR): 0.80 (típico en trópicos)

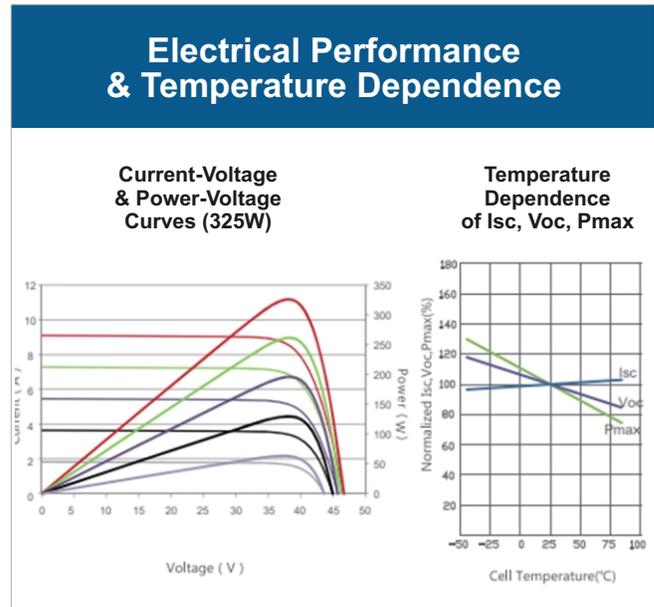
$$E_{dia} = 217.6 \times 4.8 \times 0.80 = 835.5\ Wh/día$$

6. Rendimiento Anual en Panamá

$$E_{\text{anual}} = 835.5 \times 365 = 304,857.5 \text{Wh/año} (\approx 305 \text{kWh/año})$$

Resumen Técnico

Parámetro	Valor STC	Valor Real (Panamá)	Variación
Voltaje (Vmp)	37.8 V	28.6 V	-24.3%
Corriente (Imp)	8.74 A	7.61 A	-12.9%
Potencia (Pmax)	330 W	217.6 W	-34.1%
Energía diaria	-	835.5 Wh	-
Eficiencia real	17.01%	11.2%	-34.1%



Grafica 3. data del fabricante.

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM320PP-72 JKM320PP-72-V		JKM325PP-72 JKM325PP-72-V		JKM330PP-72 JKM330PP-72-V		JKM335PP-72 JKM335PP-72-V		JKM340PP-72 JKM340PP-72-V	
	STC	NOCT								
Maximum Power (Pmax)	320Wp	237Wp	325Wp	241Wp	330Wp	245Wp	335Wp	249Wp	340Wp	253Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	37.4V	34.7V	37.6V	35.0V	37.8V	35.3V	38.0V	35.6V	38.2V	35.9V
Maximum Power Current (Imp)	8.56A	6.83A	8.66A	6.89A	8.74A	6.94A	8.82A	6.99A	8.91A	7.05A
Open-circuit Voltage (Voc)	46.4V	43.0V	46.7V	43.3V	46.9V	43.6V	47.2V	43.8V	47.5V	44.0V
Short-circuit Current (Isc)	9.05A	7.35A	9.10A	7.40A	9.14A	7.45A	9.18A	7.52A	9.22A	7.98A
Module Efficiency STC (%)	16.49%		16.75%		17.01%		17.26%		17.52%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.38%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.31%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Tabla 7. Tabla de especificaciones del Panel solar de 330Watts

Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline 157×157mm (6 inch)
No.of cells	72 (6×12)
Dimensions	1956×992×40mm (77.01×39.05×1.57 inch)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs.)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TÜV 1×4.0mm ² , Length: 1200mm or Customized Length

Tabla 8. De características mecánicas del panel 320watts

La información del fabricante del panel solar utilizado para la investigación está en la gráfica 3, tabla 7 y 8 donde podemos ver todas las características técnicas del mismo.

La eficiencia es una relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida, la potencia de entrada es una potencia solar y la potencia de salida es una potencia eléctrica. Las pruebas de los paneles solares son hechas con una irradiancia de 1000 vatios sobre 1 metro cuadrado y estas pruebas se hacen con una masa de aire de 1,5.

$$I = 1000 \frac{W}{m^2}$$

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Recomendaciones

Como posibles mejoras, se podría aumentar la capacidad del sistema de almacenamiento añadiendo una segunda batería de 50 Ah conectada en paralelo con la batería principal, y posteriormente realizar nuevamente las mediciones. Se espera que, con esta configuración, ambas baterías logren cargarse completamente antes del atardecer.

Otra mejora sería incorporar un segundo regulador de voltaje entre el panel solar y el regulador de carga de la batería, con el objetivo de optimizar la transmisión de energía, ya que el regulador actual tiene un límite de 10 amperios. Según los cálculos realizados utilizando la ecuación $P=V \times I$, si se parte de una potencia de 330W y un voltaje de 33V, se obtiene una corriente de aproximadamente 10 A. Sin embargo, considerando que el regulador convierte de 48 V a 24 V, es probable que el sistema entregue una corriente menor en la salida, lo cual debe ser tomado en cuenta para una mejor eficiencia del sistema.

Conclusión

Durante una semana de observación en la estación seca de Panamá, se determinó que la ventana de máxima eficiencia solar se extiende aproximadamente desde las 8:00 – 8:30 a.m. hasta las 3:30 – 4:00 p.m., lo que representa un promedio diario de 6 horas y 30 minutos de producción energética sostenida, capaz de mantener las baterías al 100% de carga. Este valor supera la estimación comúnmente utilizada en cálculos fotovoltaicos estándar, que considera un promedio de 5 horas pico solares por día en la región.

Durante las pruebas, también se observó que, incluso en condiciones de nubosidad parcial, la generación no disminuyó drásticamente, lo cual concuerda con estudios que indican que los paneles fotovoltaicos pueden seguir operando eficientemente bajo radiación difusa (Lorenzo et al., 2018). La pérdida de rendimiento fue moderada y no representó un obstáculo para la carga continua del sistema.

Por otro lado, aunque el panel no pudo ser orientado completamente hacia el sur (presentando una desviación aproximada de 20° hacia el oeste) ni se logró una inclinación óptima de 9° sobre la horizontal, la producción energética no mostró una reducción significativa. Esto se debe a que, en zonas cercanas al ecuador como Panamá, la incidencia solar es suficientemente elevada durante casi todo el año, lo que reduce el impacto de errores menores de orientación e inclinación (Duffie & Beckman, 2013).

Estos resultados evidencian que, bajo condiciones reales de campo, la eficiencia de los sistemas solares en Panamá puede superar las proyecciones estándar, al menos en la estación seca. Se recomienda repetir el estudio durante la estación lluviosa para contrastar el impacto de la nubosidad y la precipitación sobre el rendimiento del sistema.

Referencia

- Auto Solar. (s.f.). *¿Qué es un panel solar?* Auto Solar. <https://autosolar.es/energia-solar/que-es-un-panel-solar>
- Celsia. (s.f.). *Celsia — Energía que transforma.* <https://www.celsia.com>
- Secretaría Nacional de Energía. (2020, noviembre). *Resolución de Gabinete N°93 que aprueba los lineamientos de la agenda de transición energética 2020-2030.* Gobierno de Panamá. <https://www.energia.gob.pa/mdocs-posts/lineamientos-de-la-agenda-de-transicion-energetica/>
- Redacción de La Prensa. (2022, diciembre 30). Estas son las tarifas eléctricas que se pagarán desde el 1 de enero del 2023. *La Prensa.* <https://www.prensa.com/economia/estas-son-las-tarifas-electricas-que-se-pagaran-desde-el-1-de-enero-de-2023/>
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos. (2023). *Tarifas eléctricas de Panamá a partir del 2023.* https://www.asep.gob.pa/?page_id=177457
- AC Fotovoltaica. (s.f.). *¿Conoces el punto máximo de la eficiencia de un panel solar (MPPT)?* <https://acfotovoltaica.es/punto-maximo-de-potencia-mppt/>
- PV Magazine LATAM. (2021, febrero 18). Entra en operación en Panamá la planta Penonomé de 150 MW. *PV Magazine.* <https://www.pv-magazine-latam.com/2021/02/18/entra-en-operacion-en-panama-la-planta-penonome-de-150-mw/>
- Goo.su. (s.f.). *Cómo calcular la eficiencia de un panel solar.* <https://goo.su/fObKP>
- Ilumin Online. (s.f.). *Cómo calcular la eficiencia de un panel fotovoltaico.* <https://ilumin.online/como-calcular-la-eficiencia-de-un-panel-fotovoltaico/>
- Tutiempo Network. (s.f.). *Radiación solar medida en Panamá.* <https://www.tutiempo.net/radiacion-solar/panama/panama.html>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- Lorenzo, E., Narvarte, L., & Muñoz-Cerón, E. (2018). *Radiación solar y captación fotovoltaica: Fundamentos, tecnología y experiencia.* Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid.
- Pérez, A., & Jiménez, R. (2020). Evaluación de sistemas fotovoltaicos en climas tropicales. *Revista Iberoamericana de Energía*, 25(1), 55–70.
- Vega-Baudrit, J., González, E., & Vargas, D. (2019). Monitoreo de eficiencia solar en estaciones tropicales. *Universidad Nacional de Costa Rica.*
- Secretaría Nacional de Energía. (2020). *Lineamientos estratégicos de la Agenda de Transición Energética 2020–2030.* Gobierno de Panamá. <https://energia.gob.pa/agenda-transicion-energetica>