

La Energía solar fotovoltaica led como una alternativa de iluminación en la Ruralidad

Jorge Morales¹, Mayela Fernández², Carlos Román³, Edwin Quinchimba⁴,
David Sánchez⁵, Álvaro Carrera⁶

jmsegovia@tecnologicoismac.edu.ec; mfernandez@tecnologicoismac.edu.ec;
croman@tecnologicoismac.edu.ec; equinchimba@tecnologicoismac.edu.ec;
bspozo@tecnologicoismac.edu.ec; acarrera@tecnologicoismac.edu.ec

¹⁻⁶ Instituto Tecnológico Universitario ISMAC, 170184, Quito, Ecuador.

Pages: 427-441

Resumen: El sol como fuente de energía emite constantemente una potencia de 62.600 kW/m². Por ende, La energía solar fotovoltaica como energía limpia, inagotable y en crecimiento, es considerada como una solución para la reducción de gases de efecto invernadero. El objetivo del estudio es analizar el impacto de las variables meteorológicas en el rendimiento de lámparas fotovoltaicas de iluminación led en zonas rurales, considerando que Ecuador cuenta con radiación solar alta debido a su ubicación geográfica. Según los diferentes simuladores el índice de radiación solar promedio varía entre 4,01 y 4,25 H (kW/m²/día), cotejado con 3.7 kWh/m²/día a través de una estación meteorológica instalada en el lugar. A su vez mediante Python se representa gráficamente los datos derivados del análisis meteorológico y eléctrico del sistema. Finalmente se determina como las variables de temperatura y radiación afectan directamente al comportamiento de carga del sistema.

Palabras-clave: Energía renovable; Sistema fotovoltaico; Iluminación LED; Parámetros espaciales; Parámetros meteorológicos.

LED photovoltaic solar energy as an alternative lighting in rural areas

Abstract: The sun as an energy source constantly emits a power of 62,600 kW/m². Therefore, photovoltaic solar energy as clean, inexhaustible and growing energy, is considered as a solution for the reduction of greenhouse gases. The objective of the study is to analyze the impact of meteorological variables on the performance of photovoltaic led lighting lamps in rural areas, considering that Ecuador has high solar radiation due to its geographical location. According to the different simulators, the average solar radiation index varies between 4.01 and 4.25 H (kW/m²/day), compared with 3.7 kWh/m²/day through a weather station installed on site. In turn, using Python, the data derived from the meteorological and electrical analysis of the system is graphically represented. Finally, it is determined how the temperature and radiation variables directly affect the load behavior of the system.

Keywords: Renewable energy; photovoltaic system; led lighting; spatial parameters; meteorological parameters.

1. Introducción

El crecimiento de las energías renovables es imparable, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) el suministro eléctrico global para el 2018 era del 26% y para el 2040 se pronostica una utilización del 44 %, la cual proporcionará 2/3 del incremento de la demanda eléctrica, principalmente a través de la energía eólica y fotovoltaica (AIE, 2020), que están en constante evolución tecnológica.

En la actualidad, la energía renovable se ha convertido en una alternativa atractiva para el suministro de energía eléctrica en áreas rurales, debido a su accesibilidad y costo. Uno de los sistemas más utilizados para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es el sistema fotovoltaico. En este sentido, la iluminación en parques rurales es un aporte a la descongestión del sistema energético del país y al planeta, como consecuencia la implementación de sistemas fotovoltaicos podría ser una solución viable y sostenible para satisfacer esta demanda. Por lo cual se formula la siguiente pregunta de esta investigación ¿Los sistemas fotovoltaicos son una alternativa de energía renovable para la iluminación en la ruralidad en el Distrito Metropolitano de Quito?, que se pretende responder a lo largo del presente este artículo.

2. Trabajos relacionados

Según (Charfi et al., 2018), en el artículo “Performance evaluation of a solar photovoltaic system” presentaron un estudio experimental de un panel particular. El artículo analizó el efecto de la temperatura y su influencia negativa en las celdas solares, siendo esta una limitación importante en su rendimiento. El experimento involucra pruebas del sistema solar en dos tipos de suelos (blanco y gris) y con dos ángulos de inclinación (15° y 30°). Los resultados indican que el rendimiento del panel es óptimo cuando se encuentra inclinado y se coloca sobre un suelo de color blanco. Asimismo, se utiliza el modelo CFD para comparar el rendimiento térmico del sistema solar en cuestión con el de un sistema fotovoltaico plano, demostrando que la menor temperatura lograda a través del auto enfriamiento conduce a una producción eléctrica más eficiente.

A su vez, el análisis eléctrico es un estudio fundamental para evaluar el rendimiento y eficiencia en paneles solares. Según el estudio realizado por (Novoa et al., 2020) se propone utilizar técnicas de simulación para modelar el comportamiento eléctrico de los paneles solares en diferentes condiciones de operación, esto permite obtener datos más precisos sobre la corriente y tensión manejadas por el panel solar en función de la intensidad de luz incidente y la temperatura ambiente. También el trabajo expuesto por (Cortés et al., 2020) resalta la importancia de realizar mediciones en tiempo real del rendimiento de los paneles solares para detectar posibles problemas o degradación a lo largo del tiempo, estos análisis eléctricos contribuyen en el de la eficiencia y la vida útil de los paneles solares, así como también optimizan la instalación y el diseño de sistemas fotovoltaico con previo estudio de cada caso.

El análisis eléctrico de paneles solares es esencial para comprender y mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, las curvas de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) son condiciones a tomar en cuenta para su desarrollo, según (Vargas & Navia, 2015) se puede utilizar un microprocesador Arduino UNO para generar una interface para los datos del panel, por lo que los microprocesadores de bajo costo tienen la suficiente

capacidad de procesamiento en tiempo real, consecuentemente son considerados para la adquisición de datos eléctricos.

Según (Cortés et al., 2020), estos análisis se basan en modelos matemáticos que describen el comportamiento de los paneles solares. Los parámetros clave incluyen la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto, la corriente y voltaje máximos de potencia, la eficiencia del panel y la influencia de la degradación a lo largo del tiempo. Cabe mencionar que los avances en análisis eléctrico no solo tienen implicaciones en la mejora de la eficiencia de los paneles solares, sino también en la optimización de sistemas completos de generación solar y en la integración efectiva de la energía solar en las redes eléctricas.

Considerando que las energías alternativas están creciendo considerablemente a la par con las nuevas tecnologías referente para la fabricación de paneles fotovoltaicos, baterías e inversores de alta eficiencia, la iluminación led es la más favorecida gracias a su menor consumo de energía final a través de las baterías logrando obtener autonomías para cubrir la totalidad de horas sin presencia de la iluminación del sol. Actualmente el desconocimiento de estas nuevas tecnologías en sistemas fotovoltaicos hace que la población de Ecuador apueste por la energía tradicional de las empresas distribuidoras de energía eléctrica local, pero si se incentiva el uso de las nuevas tecnologías de iluminación led es favorable ya que cada vez los precios de los equipos son más accesibles y se obtiene una mejor rentabilidad económica. Según (Buitrago & Fernández, 2017) menciona también que al tener sistemas fotovoltaicos más eficientes también se menciona la reducción de la huella de carbono y abren paso a la eficiencia energética en la conservación y protección de los recursos.

3. Metodología

Partiendo de un enfoque cuantitativo, con un tipo de investigación experimental y una técnica de levantamiento de datos, donde se tomó como punto de partida un análisis bibliográfico y seguidamente se trabajó con variables espaciales, meteorológicas, de iluminación y eléctricas. La metodología se basa en la consecución de las siguientes fases: En la primera fase se realizó una revisión bibliográfica a partir de trabajos relacionados en el tema. La segunda fase planteó un análisis de visualización de parámetros geoespaciales de radiación solar y sus respectivos indicadores. En la tercera fase el software DIALUX permitió establecer la distribución óptima de luminarias led, su inclinación, altura, potencia, tensión de operación y la eficiencia máxima led (Lm/w). En la cuarta fase se implementó el sistema fotovoltaico led en zona rural. En la quinta fase a través de una estación meteorológica se realizó el análisis de datos referentes al potencial solar lo que permitió cotejar con los datos meteorológicos y establecer conclusiones. En la última fase se procedió a medir parámetros meteorológicos y eléctricos con la finalidad de verificar la eficiencia del sistema fotovoltaico led.

3.1. Selección de la zona rural

Para la implementación del sistema fotovoltaico se tomó el parque del barrio Santa Rosa de los Pinos, que es una comunidad rural ubicada en la parroquia de Tumbaco, perteneciente al cantón Quito en la provincia de Pichincha-Ecuador.

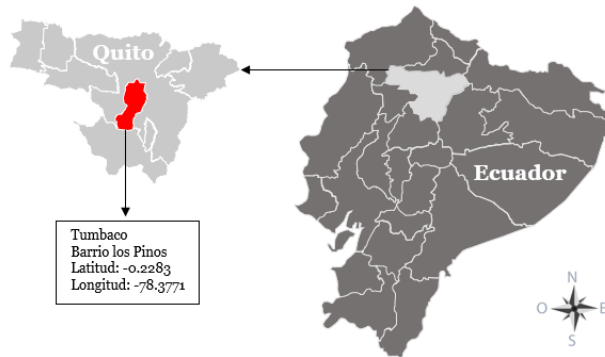


Figura 1 – Ubicación geográfica de la implementación del sistema fotovoltaico

3.2. Estimación radiación solar

El diseño del sistema fotovoltaico requiere conocer la radiación solar existente en el área geográfica de la investigación, por lo que se utilizó el parámetro H “Monthly Averaged Insolation Incident on Horizontal Surface” que representa la radiación solar incidente promedio diaria, que llega a una superficie horizontal para un mes determinado en unidades de kilovatios por metro cuadrado por día para cada mes.

Esta radiación se la obtuvo mediante datos satelitales proporcionados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), a través de la Comisión Europea en el Photovoltaic Geographical Information System(PVGIS) y el programa Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (Homer). A continuación, se detalla el método que utiliza cada programa para determinar la radiación solar en un lugar específico.

NASA, mediante sistemas satelitales obtiene valores medios diarios de los datos meteorológicos y solares que son la base para el programa de Predicción de Recursos Energéticos Mundiales (Stackhouse, 2023), donde se considera la ubicación geográfica del lugar y los valores promedios de H generados en intervalo temporal de 2005 -2020 en la que se encuentra disponible la información.

PVGIS, obtiene los datos de irradiación solar global sobre plano horizontal a través de la base de datos PVGIS-ERA5, que representa el último producto global generado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (Milosavljević et al., 2022), donde se toma un intervalo temporal: 2005-2020, como resultado se obtiene la irradiación mensual de cada año, y finalmente se obtiene un promedio mensual en toda la temporalidad.

HOMER, toma recursos digitales que proporcionan datos promedios de radiación solar desde la web EnergyPlus, en la sección de “Weather Data” al introducir los datos de radiación, se obtiene una tabla de valores que representa las radiaciones promedio

diarias para cada mes (Peñalvo et al., 2019), además presenta el promedio anual de la radiación presente en una superficie horizontal (Bekele & Tadesse, 2012).

En la Tabla 1, se muestra los datos obtenidos de radiación H de la zona rural, que proporcionan las diferentes plataformas.

Mes	H (kW/m²/día)		
	PVGIS	NASA	Homer
Enero	3,92	4,07	4,14
Febrero	3,74	3,84	4,35
Marzo	3,53	3,72	4,55
Abril	3,79	3,86	4,33
Mayo	4,25	3,82	4,12
Junio	3,73	3,86	4,02
Julio	3,91	4,08	4,27
Agosto	4,46	4,31	4,46
Septiembre	4,63	4,35	4,27
Octubre	4,19	4,31	4,24
Noviembre	4,02	4,25	4,3
Diciembre	3,9	3,96	3,98
Promedio anual	4,01	4,04	4,25

Tabla 1 – Monthly Averaged Insolation on Horizontal Surface

En sistemas autónomos con almacenamiento, es posible considerar valores ligeramente más bajos de radiación solar global promedio, ya que el sistema puede almacenar energía para su uso posterior. Los valores en el rango de 3,5 a 4,5 kWh/m²/día podrían ser adecuados para carga de los sistemas (García & García, 2019). Con los datos obtenidos de promedio anual de radiación tanto de PVGIS, NASA y Homer, la radiación presente en el área, proporcionaría la energía solar suficiente para el funcionamiento normal del sistema.

Para determinar la cantidad de radiación H, que necesita una lámpara para carga de su sistema, se considera que cada lámpara cuenta con una batería de 3.2V, corriente de 4000mAh, un panel de 1.2W y con una superficie de 400x200 mm del panel policristalino, con esta información primero se calcula la capacidad de energía requerida para cargar la batería y finalmente evaluar cuánta radiación solar se necesita para generar dicha energía.

Capacidad de energía de la batería en vatios-hora (Wh).

$$E_b = \frac{V_b * Ah}{1000} \tag{1}$$

Donde:

E_b = Capacidad de energía de la batería (Wh)

V_b = Voltaje de la batería (V) = 3.2V

Ah = Capacidad de la batería en miliamperios-hora (mAh) = 4000mAh

$$E_b = \frac{3.2 * 4000mAh}{1000} = 12.8Wh$$

Tiempo de carga de la batería.

$$Tiempo\ de\ carga = \frac{E_b}{Potencia\ del\ panel\ solar\ (kW)} \tag{2}$$

$$Tiempo\ de\ carga = \frac{12.8Wh}{0.0012kW} = 10.67\ horas$$

Determinar cuánta radiación solar (kW/m²/día) se necesita para generar la energía hacia la carga de la batería.

$$Radiación\ solar\ requerida = \frac{E_b}{Tiempo\ de\ carga * rea\ del\ panel\ solar(m^2)} \tag{3}$$

$$Radiación\ solar\ requerida = \frac{12.8Wh}{10.67\ horas * (0.04m * 0.02m)}$$

$$Radiación\ solar\ requerida = 14.99\ W/m^2/día$$

Por lo tanto, se necesita aproximadamente 0.015 kW/m²/día de radiación solar global horizontal para cargar completamente la batería en un día, asumiendo una eficiencia del sistema del 100%.

3.3. Diseño del sistema

Los niveles requeridos de lux en los parques de recreación de Ecuador pueden variar según una serie de factores, incluido el tamaño del parque, el tipo de actividades que se llevan a cabo y las regulaciones locales como las normas INEN 069 y CONELEC 008/11, que establecen valores mínimos de 25 luxes y los niveles de uniformidad general deben superar el 40% (CONECEL, 2011; INEN, 2016).

Descripción	Valores
Código	P23998
Potencia (W)	150
Tensión operación (V)	4.5

Descripción	Valores
Flujo luminoso máx luminaria (lm)	2673 – 8100
Eficiencia máx módulo led (Lm/W)	100
Temperatura de color (k)	6500
IRC	70
Vida útil (h)	20000

Tabla 2 – Características técnicas de la lámpara led

Las áreas de juegos infantiles requieren una iluminación más intensa para garantizar una buena visibilidad y seguridad (Smith & Doe, 2021). A continuación, se plantea el modelo de alumbrado y sus características técnicas realizado en el software Dialuxevo para proyectos de iluminación, con luminarias fotovoltaicas led de marca Sylvania P23998 existente en el mercado, área útil del parque de 314 m², mediante seis lámparas que deben estar situadas con postes de 4 metros, con un ángulo de inclinación de 35°, generando un nivel de uniformidad luminosa del 46%.

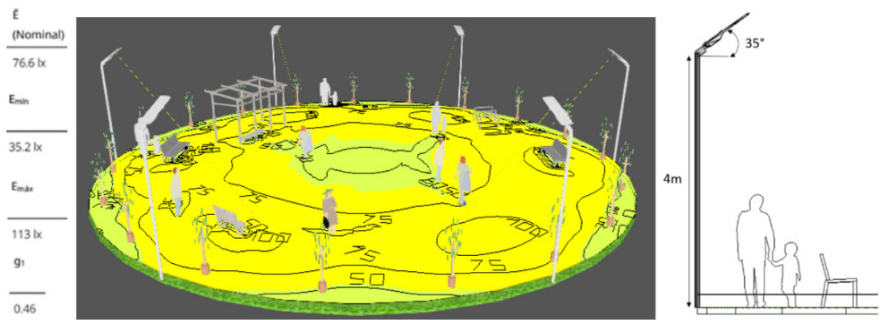


Figura 2 –Modelo de alumbrado fotovoltaico en zona rural.

3.4. Instalación



Figura 3 – Implementación del sistema fotovoltaico

La implementación del sistema fotovoltaico en un entorno de parque rural se llevó a cabo partiendo de la evaluación de la radiación solar disponible en el lugar, un diseño óptimo acorde con las necesidades de iluminación y normativa vigente. La adquisición de los componentes necesarios, lámparas fotovoltaicas y estructuras de montaje, se lleva a cabo en conformidad con el diseño establecido. Finalmente, se ejecutan pruebas para asegurar el rendimiento eficiente del sistema antes de su puesta en funcionamiento y se brinda capacitación a la comunidad respecto al uso y el mantenimiento del sistema.

3.5. Recopilación de datos

3.5.1 Estación Meteorológica



Figura 4 – Estación meteorológica

Con el objeto de recolectar información de niveles de radiación (W/m²), velocidad del viento (Km/h), precipitaciones (mm), temperatura (°C), se instaló una estación meteorológica, la misma que recopiló información cada 10 minutos, los mismos que una vez obtenidos, se utilizan para el análisis que es presentado en esta investigación.

Descripción	Información
Fabricante	Ambient Weather
Modelo	WS-2000
FCC ID	2AKBPESP8266
Tensión operación (Vdc)	5Vdc
Rango envío datos radio frecuencia	915 MHz
WIFI	2.4 GHz
Batería externa	3 pilas AA
Pantalla	Color TFT intuitiva

Tabla 3 – Características técnicas estación meteorológica

3.5.2 Led Light Meter (Luxómetro)

A fin de realizar mediciones precisas de la intensidad de Luz - luxes generados por la lámpara fotovoltaica, se empleó un luxómetro Lutron LX-1148SD. El dispositivo se conecta a una computadora a través del cable RS232 y el software SW-U801-WIN (Instruments, 2023) permite la adquisición y el registro de datos.

Descripción	Valor
Rango	2/20/100 x1000 lux
Tensión operación	9 V dc
Tiempo de Respuesta	1 seg
Calibración	Certificado N° LL-2023-1352
Precisión	±(4 %+2 dgt)
Resolución	1 lux

Tabla 4 – Características técnicas Luxómetro LX – 1148SD

3.5.3 Medición de parámetros eléctricos

Para la adquisición de datos de corriente y voltaje de la batería de Litio que corresponde al sistema eléctrico del panel solar, se utilizó una tarjeta electrónica programable Arduino junto a la aplicación PLX-DAC, la cual permitió la comunicación serial de la herramienta Excel con el IDE de Arduino, generando un vínculo serial directo mediante la biblioteca Serial.print().

El sensor utilizado para adquirir la señal de corriente es del modelo ACS712, este dispositivo funciona con corriente directa hasta 20 amperios y envía un dato análogo según incremente o disminuya el flujo de electrones.

En la adquisición de voltaje, se toma en cuenta la carga y descarga en el panel solar, utilizando un sensor FZ01430, el mismo que trabaja con el concepto de divisor de voltaje con un rango de operación de hasta 25 VDC. El sensor mide tensión directa por lo que se debe tomar en cuenta la polaridad una vez conectado a la placa.

El esquema de conexión eléctrico se muestra en la figura 5.

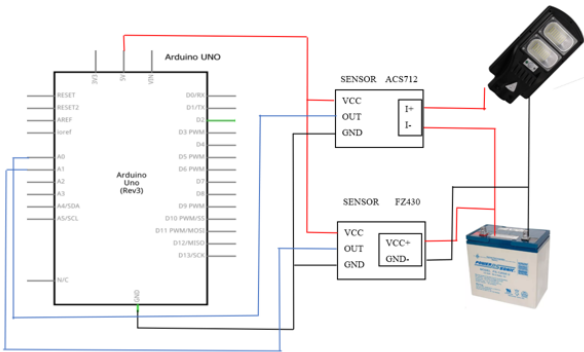


Figura 5 – Esquema eléctrico de conexión con tarjeta Arduino y sensor de voltaje y corriente.

4. Resultados y análisis

Utilizando los datos recopilados de la estación meteorológica y las mediciones eléctricas del sistema, se emplea el lenguaje de programación Python para la representación

gráfica y visualización de la información. Esta integración de datos y procesamiento computacional se lleva a cabo con la finalidad de efectuar el análisis y la interpretación de los datos recopilados, permitiendo así la identificación de patrones, tendencias y relaciones significativas entre las variables meteorológicas, eléctricas empleadas en este estudio.

4.1. Estación meteorológica

En la figura 6, se evidencia la temperatura ambiental con los niveles de radiación registrada por la estación meteorológica, por una parte, tenemos que en días soleados donde se registraron temperaturas superiores a los 24°C, se alcanzó niveles de radiación por sobre los 800 W/m² entre las 10:30 y las 13:30, en contraposición con los niveles de radiación alcanzados en los días con registros de temperatura menor (días nublados), donde difícilmente superan los 400 W/m². Lo que nos permite confirmar que existe una relación directa entre la temperatura ambiental y el nivel de radiación que podrá ser aprovechado por el panel solar.

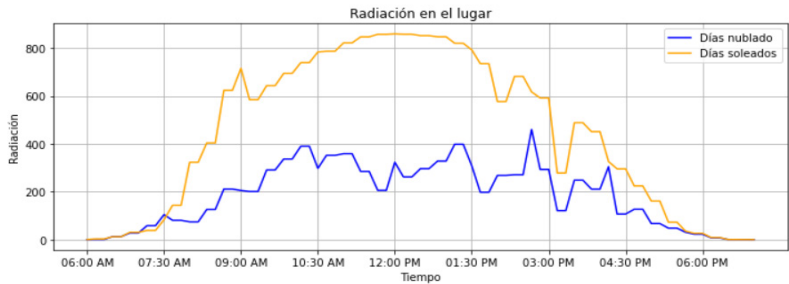


Figura 6 – Radiación entre el día más soleado y el día con la temperatura más baja.

Tomando en consideración la radiación obtenida en días con precipitaciones se puede observar en la figura 7 que no fueron días totalmente nublados, presentando niveles de radiación altos, alcanzando incluso los picos más altos de radiación con valores por sobre los 1000 W/m² y el máximo obtenido que fue de 1200 W/m², intercalados con los momentos en que se presentaron las precipitaciones llegando a valores de radiación entre 200 y 400 W/m².

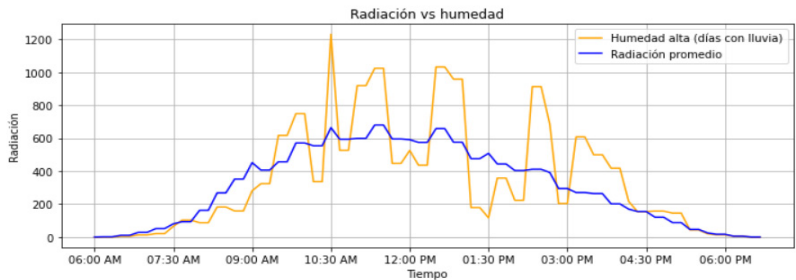


Figura 7 –Radiación con humedad alta y la radiación promedio

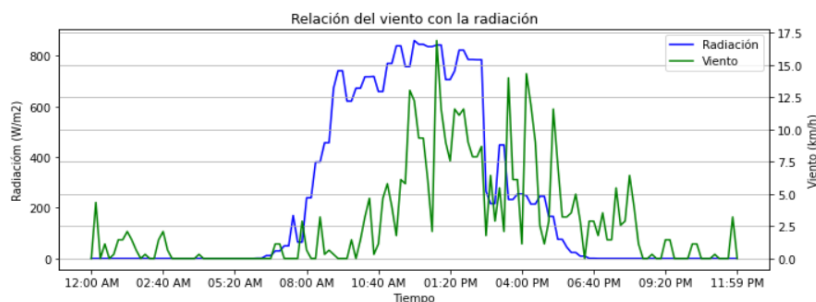


Figura 8 – Comparación entre niveles de viento y radiación

En la figura 8, se compara la radiación del día que presentó los niveles más altos de viento y ráfagas de viento. La velocidad máxima del viento es de 17 Km/h (corresponde a un nivel flojo según la escala de Beaufort), coincide con los niveles máximos de radiación de ese día (800 W/m^2), si bien entre las 15:00 y 17:00 se observa una caída en la radiación en contraposición a un incremento de velocidad del viento, esos valores se reflejan por un incremento en la nubosidad más que por acción del viento.

La radiación promedio en función de las horas del día, obtenida en el transcurso de esta investigación permitió determinar que en un período de 8 horas diarias los niveles de radiación se encuentran entre los 200 a 850 W/m^2 , lo que en base a los datos del fabricante de las lámparas led solar, es suficiente para cargar las baterías y proporcionar luz constante de 12 a 14 horas. De forma adicional en los días donde se presentó los mayores niveles de viento, la radiación está por encima del promedio obtenido, lo que ratifica que los niveles de viento presentados en la zona de la instalación de las lámparas no representan un impacto negativo para la carga.

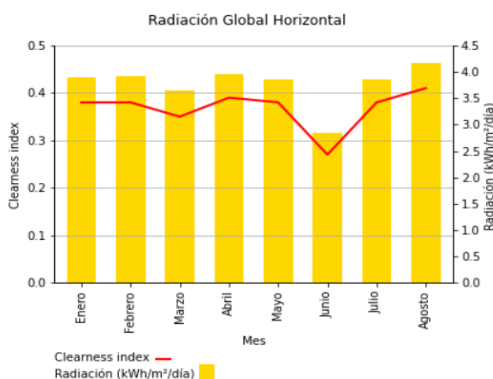


Figura 9 – Radiación global Horizontal

En la figura 9, con la información de los datos meteorológicos de radiación W/m^2 , se realiza la obtención de la radiación global horizontal desde el mes de enero que el

sistema inicia su funcionamiento, con cierre al mes de agosto, donde se obtiene que la radiación H para cada mes del intervalo. Se determina una radiación promedio de 3.7 kWh/m²/día, también se compara con el parámetro de clearness index, que en el mes de junio disminuye hacia un valor de 0.27, donde se presenta mayor nubosidad en el sector lo cual provoca que la radiación también se reduzca a 2.85 kWh/m²/día.

4.1. Parámetros eléctricos

La figura 10, muestra la relación entre la intensidad de iluminación en luxes y el voltaje correspondiente en un conjunto de mediciones, obtenidas a partir de experimentación que empleó la lámpara fotovoltaica de 150 W como fuente de luz.

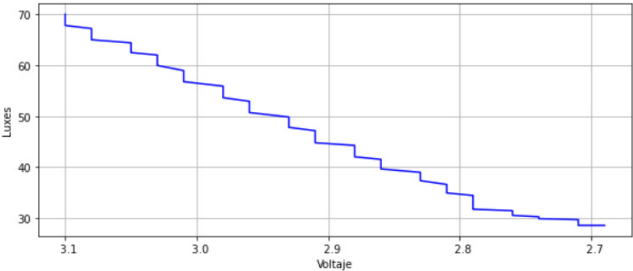


Figura 10 – Relación entre intensidad de luz y voltaje

La lámpara fotovoltaica trabaja a un voltaje máximo de carga de 3.1 V. A lo largo de la toma de datos, se observa la relación entre directa entre la disminución gradual en el voltaje de la batería y los luxes generados como una respuesta natural del sistema. La relación entre estos dos factores se vuelve evidente a medida que el voltaje disminuye, lo que refleja la naturaleza intrínseca del sistema de iluminación. Se determinó mediante experimentación, que si el voltaje de la batería llega a 2.69 V, la lámpara se apaga completamente.

El comportamiento eléctrico del panel está regido a su alimentación, por lo cual hay que tomar en consideración que la batería que alimenta el sistema es de Litio, por lo tanto, el Voltaje nominal de la batería no va a superar los 3.5 Voltios DC.

La figura 11 muestra el comportamiento del voltaje en la batería cuando se carga, bajo ciertas condiciones de radiación.

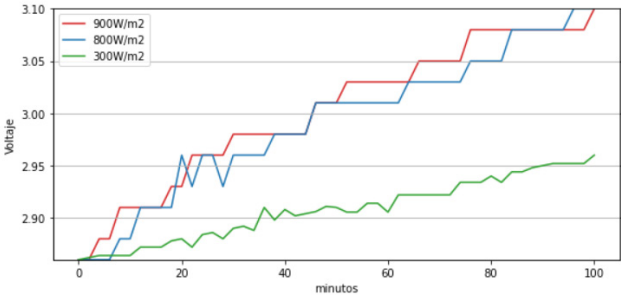


Figura 11 – Comportamiento del voltaje de la batería en estado de carga con radiaciones de 900, 800 y 300 W/m².

El gradiente del voltaje en estado de carga representado en la figura 11, se debe a la función estándar de los paneles al acumular energía fotovoltaica y transmitirlos a la batería de litio, es directamente proporcional a la radiación y por ende a menor radiación mayor será el tiempo requerido para la carga, conforme avanza el tiempo la batería alcanzará su estado nominal, por otra parte la corriente de consumo no se presenta, debido a que cuando se encuentra en fase de carga la presencia lumínica por parte del sol y el sensor de luz LDR mantiene a la lámpara apagada.

Para el análisis eléctrico en descarga la figura 12, muestra la recopilación de los datos de voltaje y corriente de las dos últimas horas de funcionamiento, que es donde el comportamiento del voltaje y corriente cambian y empiezan a decrecer hasta llegar a niveles de voltaje alrededor de 2.6 V, donde la lámpara se apaga automáticamente.

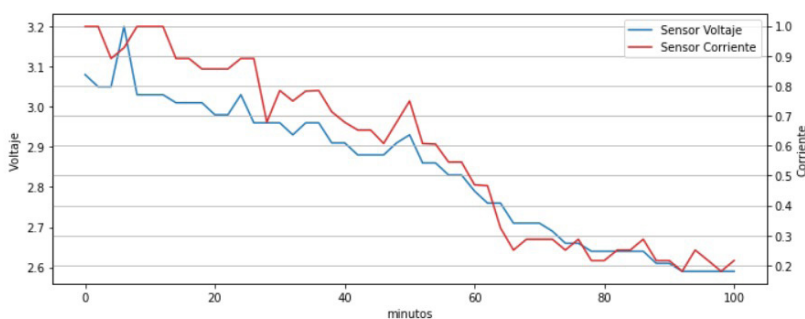


Figura 12 – Comportamiento del voltaje y corriente de la batería en estado de descarga

5. Conclusiones

Aprovechando la radiación solar para generar electricidad, se puede reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales y minimizar el impacto ambiental, con la implementación de sistemas fotovoltaicos en parques rurales se proporciona el acceso a energía limpia y sostenible, al tiempo que promueve el desarrollo de las comunidades locales. Esta iniciativa mejora la seguridad del entorno, contribuye al bienestar de los residentes y promueve un enfoque eco-amigable impulsando un futuro energético más responsable.

Realizar la estimación de radiación solar previa es muy importante, para determinar si la radiación presente en el lugar es la idónea para la carga del sistema fotovoltaico, según los datos de los programas empleados se obtiene valores desde 4,01 a 4,25 (kW/ m²/día), y con la data de radiación de la estación meteorológica, desde su instalación se obtiene el valor promedio en sitio de 3.7 (kW/ m²/día) que es suficiente para la carga de las lámparas fotovoltaicas.

El aporte de datos de la estación meteorológica permitió analizar el comportamiento de la radiación solar, en los ocho meses de investigación. Estableciendo que la ubicación de las lámparas sobrepasa los parámetros mínimos de funcionamiento, que en días de viento la radiación promedio fue de 448 W/m², que la humedad del ambiente relacionada

directamente con días lluviosos presenta en promedio 367 W/m^2 , en días nublados fue en promedio de 199 W/m^2 y que el promedio en días soleados fue de 482 W/m^2 .

Los resultados del experimento que relaciona la intensidad de iluminación en luxes con el voltaje de la lámpara fotovoltaica instalada, revelan una relación clara entre ambos factores. A medida que el voltaje disminuye, los luxes disminuyen proporcionalmente, y la lámpara se apaga por completo a un valor de 2.69 V.

En el mes de junio se registra la radiación horizontal más baja en el área, con $2.85 \text{ (kW/m}^2/\text{día)}$ y presenta un clearness index de 0.37, lo cual muestra que a mayor nubosidad en la zona se reduce la radiación, sin embargo el sistema implementado no se ve afectado, debido a que la energía solar es suficiente para el funcionamiento normal del proceso de carga del sistema.

El período necesario para una carga completa, con una radiación solar de al menos 200 W/m^2 , desde una batería completamente descargada es de 10 horas. No obstante, es crucial tener en cuenta que las luminarias cuentan con un sistema de regulación de luminosidad controlado por un sensor de movimiento, lo que conduce a una eficiente administración del consumo de energía, por lo tanto es poco probable que las baterías se agoten por completo al iniciar una nueva fase de recarga diaria.

Los datos y las relaciones obtenidas en este estudio revelan un potencial significativo para mejorar la optimización y el control preciso de sistemas de iluminación que utilizan fuentes fotovoltaicas. Además de proporcionar valiosa información para futuras implementaciones y mejoras en sistemas de iluminación más eficaces y adaptables, estos resultados representan un avance importante en la búsqueda de una mayor eficiencia energética y sostenibilidad en las aplicaciones de iluminación basadas en energía solar.

Referencias

- Agencia Internacional de la Energía. (2020). Perspectivas de las energías renovables 2020. *Informe n° 2020/11*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020?language=es>
- Ambient Weather. (2023). Estación meteorológica WS-2000 Smart weather station. <https://ambientweather.com/>
- Bekele, G., & Tadesse, G. (2012). Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy*, 97, 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.059>
- Buitrago, A. M. R., & Fernández, F. G. (2017). Reducción de la huella de carbono por medio de la implementación de un sistema fotovoltaico en el sector hotelero. caso de estudio Anaira Hostel (Leticia-Amazonas - Colombia). *Revista de Tecnología*, 16(1), 169–182.
- Charfi, W., Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2018). Performance evaluation of a solar photovoltaic system. *Energy Reports*, 4, 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.06.004>
- CONECCEL. (2011). Consejo Nacional De Electricidad regulación No. 008/11 (pp. 10-11).

- Cortés, C., Gómez, G., Betancur L., Carvajal, S., & Guerrero G. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales. *TecnoLógicas*, 23(47), 1–21.
- Novoa, J., Alfaro, M., Alfaro, I., & Guerra, R. (2020). Determinación de la eficiencia de un mini panel solar fotovoltaico: una experiencia de laboratorio en energías renovables. *Educación química*, 31(2), 22-37.
- García, J. A., & García, J. L. (2019). Diseño y construcción de un sistema fotovoltaico autónomo para la electrificación rural en Colombia. *Revista Científica Agroecosistemas*, 7(2), 1-11.
- INEN. (2016). Instituto Ecuatoriano De Normalización Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE) 069.
- Instruments, L. (2023). Luxmeter LUTRON LX-1148SD. Lutroninstruments.Eu. <https://www.lutroninstruments.eu/luxmeter/luxmeter-lutron-lx-1148sd/>
- Milosavljević, D., Kevkić, T., & Jovanović, S. (2022). Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*, 20(1), 431–451. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0042>
- Vargas, B. & Navia, A. (2015). Desarrollo de un sistema de control para la captura y medición experimental de la eficiencia y curva característica (I-V) en tiempo real de un sistema fotovoltaico utilizando Labview® y Arduino. *Investigación & Desarrollo*, 1(15), 49-64.
- Peñalvo, E., Cárcel, F., Alfonso, D., & Sancho, A. (2019). Herramienta HOMER. *Análisis del recurso solar*. 122958. <https://riunet.upv.es/handle/10251/122958>
- Stackhouse, P. (2023). Nasa power. *Nasa.gov*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Smith, J., & Doe, J. (2021). *Journal of Lighting Technology*, 3(2), 45-56. <https://doi.org/10.1234/jlt.2021.3.2.45>