

Design and Evaluation of a Standalone Photovoltaic System for Rural Road Lighting and Electric Vehicle Charging Based on a Multipurpose Approach

Diseño y Evaluación de un Sistema Fotovoltaico Aislado para Iluminación en Vías Rurales y Carga de Vehículos Eléctricos Basado En Un Enfoque Multipropósito

J.G. Villarreal¹ 0009-0003-6817-0698C.C. Cuji² 0000-0002-9324-6290

¹Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Electricidad, Quito, Ecuador
E-mail: kandrdef@est.ups.edu.ec; lfloresc2@est.ups.edu.ec

²Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Electricidad, GIREI - Quito, Ecuador
E-mail: ccuji@ups.edu.ec, criscuji10@gmail.com

Abstract

The results of a proposal for a high-efficiency photovoltaic system with multipurpose applications implemented along a road are presented. This system is designed to address issues related to lighting, telecommunications, and electric vehicle charging. The need for an isolated system arises from sudden power outages in the country that affect road safety and reliability, as well as the lack of phone signal in some areas.

In the field of lighting, an analysis is conducted using DiaLux software to ensure compliance with appropriate lighting standards for different types of roads. Furthermore, the multipurpose system includes electric vehicle charging, which is becoming increasingly relevant due to the shift towards more eco-friendly vehicles. Providing electric vehicle charging along roads resolves the issue of limited electric vehicle range and promotes their reliable use. The evaluation of the energy resource using the Glover and McCulloch method is essential for designing an efficient system capable of meeting various user needs. Additionally, reducing carbon dioxide emissions is a significant consideration, as electric vehicles can significantly contribute to reducing greenhouse gas emissions compared to fossil fuel vehicles.

Index terms— High efficiency, Public lighting, photovoltaic, Glover and McCulloch, multipurpose system, isolated system. indexing purposes.

Resumen

Se presentan los resultados de una propuesta de un sistema fotovoltaico de alta eficiencia con aplicaciones multipropósito, implementado a lo largo de una carretera. Este sistema está diseñado para abordar cuestiones relacionadas con la iluminación, las telecomunicaciones y la carga de vehículos eléctricos. La necesidad de un sistema aislado surge de los apagones repentinos en el país que afectan la seguridad vial, el excesivo uso de vehículos de combustibles fósiles que emiten gases que contaminan el planeta, así como la falta de señal telefónica en algunas zonas.

En el ámbito de la iluminación, se realiza un análisis utilizando el software DiaLux para garantizar el cumplimiento de los estándares adecuados de iluminación para diferentes tipos de carreteras. Además, el sistema multipropósito incluye la carga de vehículos eléctricos livianos de uso particular, que se está volviendo cada vez más relevante debido al cambio hacia vehículos más ecológicos. La provisión de carga de vehículos eléctricos a lo largo de las carreteras resuelve el problema de la autonomía limitada de los vehículos eléctricos y promueve su uso confiable. La evaluación del recurso energético mediante el método Glover y McCulloch es fundamental para diseñar un sistema eficiente capaz de satisfacer diversas necesidades del usuario. Además, la reducción de las emisiones de dióxido de carbono es un aspecto importante, ya que los vehículos eléctricos pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los vehículos de combustibles fósiles.

Palabras clave— Alta eficiencia, alumbrado público, fotovoltaico, Glover y McCulloch, sistema multipropósito, sistema aislado.

Recibido: 07-11-2023, Aprobado tras revisión: 13-12-2023

Forma sugerida de citación: Villarreal, J.; Cuji, C. (2024) "Diseño y evaluación de un sistema fotovoltaico aislado para iluminación en vías rurales y carga de vehículos eléctricos basado en un sistema multipropósito". Revista Técnica "energía". No. 20, Issue II, Pp. 47-57

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.614>

© 2024 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



Esta publicación es de acceso abierto bajo una licencia Creative Commons



1. INTRODUCCIÓN

El presente informe plantea la implementación de un sistema fotovoltaico autónomo diseñado para abordar la carga de vehículos eléctricos, la iluminación y las telecomunicaciones. La necesidad de esta solución surge para asegurar fuentes de energía verde para la carga de vehículos eléctricos. Adicionalmente, se busca subsanar la carencia de cobertura de telefonía en áreas desatendidas, un servicio fundamental en la era actual. Cabe destacar que, en el territorio nacional, los automóviles que utilizan combustibles fósiles son responsables de una significativa cantidad de emisiones de dióxido de carbono. La transición hacia vehículos eléctricos está en constante crecimiento debido a su menor impacto ambiental. Sin embargo, la limitada autonomía de estos vehículos plantea desafíos, y la provisión de puntos de carga en las vías se plantea como una solución para garantizar su uso fiable. [1].

El análisis del recurso energético, llevado a cabo mediante un método para la obtención de datos de radiación solar, desempeña un papel crucial en la configuración de un sistema eficiente que satisface las múltiples demandas de los usuarios. Este enfoque multipropósito abarca tanto la carga de vehículos eléctricos como la iluminación y las telecomunicaciones. Se subraya la relevancia de los sistemas aislados, que no dependen de las fuentes de energía del sistema eléctrico interconectado del país. Estos sistemas representan soluciones de gran utilidad para llevar electricidad a zonas rurales o comunidades que, de otra forma, no podrían acceder a la red eléctrica nacional debido a diversos factores como la distancia, los costos económicos o las limitaciones técnicas. [2].

2. DESCRIPCIÓN Y ESCENARIOS

2.1. Descripción del Problema de Estudio

En la actualidad, los sistemas aislados desempeñan un papel crucial debido a su independencia de las fuentes de energía del sistema eléctrico nacional interconectado. Estos sistemas resultan de gran relevancia, ya que garantizan el suministro de electricidad en áreas donde las contingencias en el sistema eléctrico convencional no deben afectar. Representan una solución efectiva para llevar energía eléctrica a zonas rurales y comunidades a las que resulta inaccesible o poco viable extender la red eléctrica. Esto puede deberse a diversas razones, como las grandes distancias o las limitaciones económicas que hacen que un proyecto de electrificación convencional no sea factible. Los sistemas aislados ofrecen beneficios similares a los usuarios en términos de acceso a la electricidad, pero a menudo requieren una inversión menor en comparación con la extensión de la red eléctrica, lo que los convierte en una alternativa viable. [3], [4].

2.2. Caso de Estudio

2.2.1. Vía E487

La Vía E487, ubicada en Ecuador, se erige como un ejemplo destacado de una carretera principal que conecta la región costera con la región montañosa, específicamente entre Guayaquil y Riobamba. Esta vía se encuentra transitada por camiones que transportan productos entre ambas regiones, y en días festivos, se congestiona con vehículos que se dirigen a la costa. Uno de los problemas más acuciantes en esta vía es la frecuencia de asaltos a los conductores de camiones, agravados por los accidentes de tráfico que ocurren con regularidad debido a la neblina que se presenta en las noches, dificultando la visibilidad de los conductores [5].

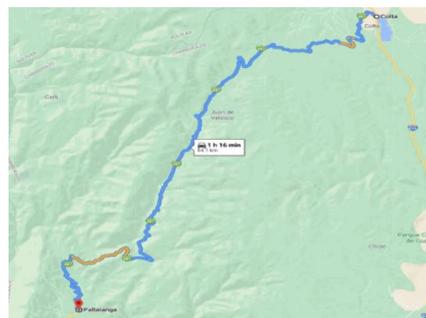


Figura 1: Tramo sin iluminación de la vía E487 - Google Maps

Si bien algunos tramos de la vía cuentan con acceso a la electricidad, en otros lugares, la electricidad no se distribuye a lo largo de la carretera para conectar las pequeñas comunidades y pueblos circundantes sin incurrir en costos excesivos. Sin embargo, en esta misma ruta, se encuentran comunidades aisladas en el páramo de Navag, que carecen de acceso a la energía eléctrica. La implementación del sistema fotovoltaico sería especialmente beneficiosa para estas comunidades.

2.2.2. Vía E28

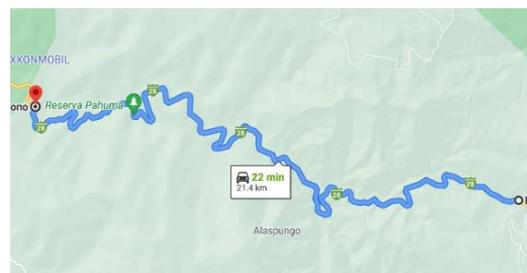


Figura 2: Tramo sin iluminación de la vía E28 - Google Maps

La Vía E28 es otra carretera relevante que conecta la región costera con la región montañosa en Ecuador, específicamente entre Calacalí y Nanegalito. Esta vía es utilizada por vehículos de carga ligera y pesada, ya que la región es conocida por la producción de productos como palmito, banano, yuca, entre otros. Sin embargo, esta vía es oscura, insegura y carece de cobertura de telefonía móvil, lo que dificulta la comunicación en caso de emergencia [6].



Figura 3: Tramo de la vía E28 con cobertura celular nula o con tecnología 2G

2.2.3. Vía E45

La Vía E45 se destaca por conectar diferentes regiones de Ecuador, y en este caso, se considera el tramo ubicado en el Oriente que enlaza la región montañosa con la región amazónica. Esta vía es un corredor comercial vital entre las dos regiones, pero enfrenta desafíos relacionados con la falta de alumbrado público, la electricidad y la cobertura de señal para teléfonos celulares [7][8].



Figura 4: Tramo sin iluminación de la vía E45 - Google Maps

En cada uno de estos casos de estudio, la falta de iluminación, la inseguridad y la escasez de acceso a servicios básicos se presentan como problemas críticos que podrían abordarse de manera efectiva mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos multipropósito. Estos sistemas no solo mejorarían la calidad de vida y la seguridad de los residentes, sino que también respaldarían el desarrollo sostenible y la movilidad eléctrica en el país [9].

2.3. Sistema solar fotovoltaico

Los sistemas solares fotovoltaicos aprovechan la energía del sol para generar electricidad de manera

sostenible. La radiación solar incidente en la Tierra se compone de tres componentes: radiación directa, radiación reflejada y radiación difusa. El cálculo de la radiación global permite la correcta evaluación del recurso solar. Se utilizan métodos empíricos, como el método de Glover & McCulloch, que consideran factores como la latitud del lugar. En Ecuador, situado cerca del ecuador, el método resulta viable. El cálculo de la radiación global implica el uso de ecuaciones que incluyen la radiación extraterrestre diaria, el promedio mensual de horas diarias de brillo solar y el número máximo diario promedio mensual de horas de sol.

$$\frac{H}{H_0} = a \cos \varphi + b \left(\frac{n}{N}\right) \quad (1)$$

Donde:

H: La radiación global diaria promedio mensual en kWh.m⁻².dia⁻¹.

H₀: La radiación solar diaria promedio mensual en kWh.m⁻².dia⁻¹.

n: El promedio mensual de horas diarias de brillo solar.

N: El número máximo diario promedio mensual de horas sol.

a y b: Son las constantes de regresión.

φ: Latitud de la locación [10].

2.3.1. Elementos de los Sistemas Solares

Un sistema solar fotovoltaico se basa en la captación y conversión de la energía solar en electricidad. Esto se logra mediante varios elementos clave:

Paneles Fotovoltaicos: Estos paneles consisten en múltiples celdas fotovoltaicas, cada una de las cuales genera un voltaje de alrededor de 0.3 V a 0.5 V. Para obtener voltajes adecuados para aplicaciones eléctricas, se conectan en serie para incrementar el voltaje y en paralelo para aumentar la corriente. Estos grupos de celdas se conocen como paneles fotovoltaicos.

Baterías: En sistemas aislados, son esenciales para almacenar la energía generada por los paneles solares y utilizarla cuando no se está generando electricidad. Las baterías pueden variar en tecnología, como las de plomo-ácido, níquel-hierro, iones de litio, entre otras. La vida útil de las baterías está directamente relacionada con su profundidad de descarga, lo que implica no descargarlas más del 40% de su capacidad.

Tabla 1: Eficiencia de los paneles solares

Materiales	Eficiencia nominal (%)	Eficiencia real (%)
Panel de silicio Monocristalino	24	14-17
Panel de silicio Policristalino	18	13-15
Panel de silicio Amorfo	13	5-7

Reguladores de Carga: Estos dispositivos permiten una carga eficiente de las baterías al supervisar el voltaje y protegerlas contra sobrecargas o descargas profundas que reducirían su vida útil [11].



Inversores: Los inversores transforman la corriente continua (CC) generada por los paneles en corriente alterna (CA), que es la forma de electricidad utilizada en la mayoría de las aplicaciones eléctricas. Los inversores comerciales pueden ser monofásicos o trifásicos y operan a frecuencias de 50 Hz o 60 Hz. La cantidad de pulsos generados por el inversor influye en la calidad de la señal de CA resultante [12].

2.4. Alumbrado Público:

En el contexto de este proyecto, el alumbrado público se considera, utilizando lámparas LED debido a sus características técnicas óptimas. Estas lámparas LED ofrecen un rendimiento lumínico entre 100 lm/W y 154 lm/W, lo que significa que convierten una cantidad significativa de energía en luz visible, lo cual es crucial para lograr una iluminación eficiente y efectiva. Además, su larga vida útil, que varía entre 50,000 y 100,000 horas, reduce la necesidad de reemplazos frecuentes, lo que es especialmente ventajoso en áreas de difícil acceso, como las carreteras mencionadas en el proyecto [13].

La temperatura de color de las lámparas LED puede variar de 2700 K a 5000 K. En este proyecto, se ha seleccionado una lámpara Sylvania de 90 W y 4000 K. Esta elección está respaldada por su temperatura de color adecuada, que es lo suficientemente cálida para proporcionar una iluminación cómoda y no deslumbrante [14][15]

$$M = (6 - \Sigma_{vps}) \tag{2}$$

Donde:

P: Es la clase de iluminación va de M1 a M6

Σ_{vps} : Es el sumatorio de los valores de la ponderación

Tabla 2: Parámetros para selección de clase de iluminación [16]

Parámetros	Opciones	Valores de la ponderación
Velocidad de los vehículos en la vía	Elevada	1
	Alta	0.5
	Moderada	0
Volumen del tráfico de vehículos	Elevado	1
	Alto	0.5
	Moderado	0
	Bajo	-0.5
Composición del tráfico	Muy bajo	-1
	Mezcla con un alto porcentaje de tráfico no motorizado	2
	Mezclado	1
	Solamente motorizado	0
Separación de vías	No	1
	Si	0
Densidad de la intersección	Alta	1
	Moderada	0
Vehículos parqueados	Se permite	0.5
	No se permite	0
Iluminación	Alta	1

ambiental	Moderada	0
	Baja	-1
Guías visuales	Pobre	0.5
	Moderado o bueno	0

La disposición de los postes de alumbrado público debe basarse en criterios específicos. Para determinar la clase de iluminación más adecuada, se utiliza la fórmula (2) indicada en la Tabla 2, considerando factores como la velocidad del tráfico, el volumen de vehículos y otros parámetros. Esto garantiza que la iluminación sea óptima y se adapte a las necesidades específicas de las vías [17][15]

2.4.1. Parámetros Fotométricos

Para definir la disposición de las luminarias y la distancia entre los postes en el alumbrado público de acuerdo con el proyecto, se emplea la fórmula (3). Esta fórmula toma en cuenta varios factores esenciales, como el ancho de la vía, el flujo luminoso de las lámparas, el factor de utilización y la iluminancia media deseada. La iluminancia media (E_m) es crítica para garantizar una iluminación uniforme y segura [18][19].

$$E_m = \frac{K \times f_m \times \phi l}{W \times d} \tag{3}$$

Donde:

E_m : Iluminancia media

k: Factor de utilización

f_m : Factor de utilización

W: Ancho de la vía

ϕl : Flujo luminoso

d: Distancia entre postes

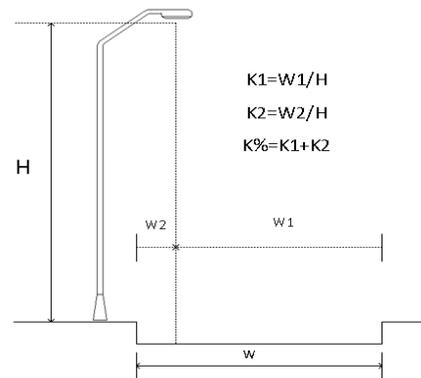


Figura 5: Parámetros para el cálculo del factor de utilización [20]

$$K = K1 + K2 \tag{4}$$

El factor de utilización (K) se determina mediante la fórmula (4) y se basa en factores que incluyen la distribución de la luz de las luminarias y las características del entorno. Asegura que la luz emitida por las lámparas LED se utilice eficazmente en el área específica que se ilumina [16].



$$N = \frac{L}{D} + 1 \quad (4)$$

Donde:

- N: Cantidad de luminarias
- L: Largo de la vía
- H: Altura de la luminaria con respecto a la calzada
- R: Relación separación entre luminarias y altura (H/d).
- D: RxH separación entre puntos de L [20].

La cantidad de postes o luminarias a lo largo una vía se determina mediante la aplicación de la fórmula (5). Esta ecuación considera la longitud de la vía y la relación entre la separación de las luminarias y su altura sobre el nivel de la calzada. Esto garantiza que la vía esté adecuadamente iluminada sin exceso ni falta de luminarias [20] [21].

$$N = \frac{L}{D} + 1 \quad (5)$$

Donde:

- N: Cantidad de luminarias
- L: Largo de la vía
- H: Altura de la luminaria con respecto a la calzada
- R: Relación separación entre luminarias y altura (H/d).
- D: RxH separación entre puntos de L [20].

La diseño del alumbrado público en este proyecto se realiza utilizando varios métodos, como la disposición unilateral, bilateral alternada, bilateral opuesta y central doble, dependiendo del ancho y las características de la vía. También se considera el nivel de suciedad en las carreteras para calcular el factor de mantenimiento (fm) [23]. Además, se determina la iluminancia media necesaria de acuerdo con la velocidad de circulación de los vehículos en diferentes tipos de vías. Esta información se utiliza para establecer una base técnica sólida para la distribución de luminarias en el proyecto de alumbrado público [22].

3. DESARROLLO Y APLICACIONES MULTIPROPÓSITO

3.1. Las estaciones de carga

La infraestructura de movilidad sostenible con energía renovable incluye estaciones de carga eléctrica que son el equivalente a las gasolineras para vehículos eléctricos y son fundamentales para promover la adopción de esta tecnología y se clasifican en tres tipos estaciones de carga:

- Carga Lenta: ideales para hogares o entornos de trabajo. Tienen un bajo consumo eléctrico (alrededor de 3.7 kW) y son convenientes para vehículos que permanecen estacionados durante largos períodos. La carga completa tarda alrededor de 8 horas [24].
- Carga Semi-rápida: estas estaciones de carga operan a una potencia de aproximadamente 7.3 kW, lo que permite

cargar vehículos más rápido que la carga lenta. Aún son adecuadas para uso residencial o en el trabajo y pueden cargar un vehículo por completo en unas 4 horas [25].

- Carga Rápida: estaciones de carga son esenciales en ubicaciones estratégicas como estaciones de servicio o áreas de alto tráfico. Tienen un alto consumo de energía (entre 50 kW y 62.5 kW) y permiten cargar el 80% de la batería en solo 30 minutos o el 50% en 15 minutos. Son ideales para viajes largos o cuando se necesita cargar de manera rápida [26].

La clave para la carga rápida es el uso de un convertidor que transforma la corriente alterna en corriente continua, garantizando una transferencia eficiente de energía a las baterías de los vehículos eléctricos. En general, la expansión de la red de estaciones de carga desempeña un papel fundamental en la promoción de la movilidad eléctrica y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles en el transporte [27].

3.2. Evaluación de Recurso Solar por el Método de Glover & McCulloch

La evaluación del recurso energético utilizando el método de Glover & McCulloch es esencial para el diseño de sistemas solares fotovoltaicos eficientes. La radiación global, que se obtiene a partir de la base de datos de la NASA, es un factor crítico para calcular la generación de energía de los paneles solares. La tabla 3 proporciona datos de radiación global en kWh/m² durante un año a lo largo de cada vía, lo que resulta fundamental en la planificación de estos sistemas.

Tabla 3: Radiación Global de las diferentes localidades de estudio[24]

Meses	E45 (kWh/m ²)	E487 (kWh/m ²)	E28 (kWh/m ²)
Enero	4.17	4.33	3.91
Febrero	3.97	4.21	3.87
Marzo	4.17	4.58	4.29
Abril	4.06	4.40	4.12
Mayo	4.01	4.21	3.87
Junio	3.98	4.18	3.75
Julio	3.90	4.29	3.97
Agosto	4.20	4.60	4.01
Septiembre	4.41	4.59	3.83
Octubre	4.56	4.55	3.81
Noviembre	4.77	4.65	3.7
Diciembre	4.41	4.38	3.63

La evaluación del recurso energético es un proceso mensual que se basa en los valores proporcionados en las tablas 4 y 5, específicamente diseñados para el método de Glover & McCulloch. Estas tablas contienen datos esenciales que se utilizan en el proceso de evaluación.

Tabla 4: Tabla de valores para el método de Glover & McCulloch[24]

Delta	Ws	HRADIAN	Ho	N
-22.930	90.811	1.5849	35.386	12.10
-17.245	90.595	1.5811	36.479	12.07
-7.9149	90.266	1.5754	37.494	12.03
4.4139	89.851	1.5682	37.315	11.98



15.210	89.478	1.5616	35.746	11.93
22.174	89.217	1.5571	34.059	11.89
23.049	89.183	1.5565	33.811	11.89
17.650	89.389	1.5601	35.214	11.91
7.3423	89.752	1.5664	37.018	11.96
-4.611	90.154	1.5734	37.616	12.02
-15.363	90.527	1.5800	36.762	12.07
-22.23	90.7	1.5844	35.538	12.14

Tabla 5: Valores para el método de Glover y McCulloch[24]

n	Irradiación Global (kWh/m2)	H/Ho	n/N
4.57674	4.33	0.1223	0.3779876
5.31333	4.21	0.1154	0.4398658
4.08133	4.58	0.12219	0.3391057
3.77366	4.4	0.11796	0.3149907
4.583	4.21	0.11777	0.3841440
4.641	4.18	0.12272	0.3901410
4.726	4.29	0.12687	0.3974398
6.075	4.6	0.13062	0.5097086
5.8356	4.59	0.12399	0.4876455
4.35233	4.55	0.12095	0.3620715
4.6713	4.65	0.12648	0.3870100
5.50333	4.38	0.12324	0.4550596

En la Fig. 6 se muestra los valores de la regresión lineal para obtener los valores a y b.

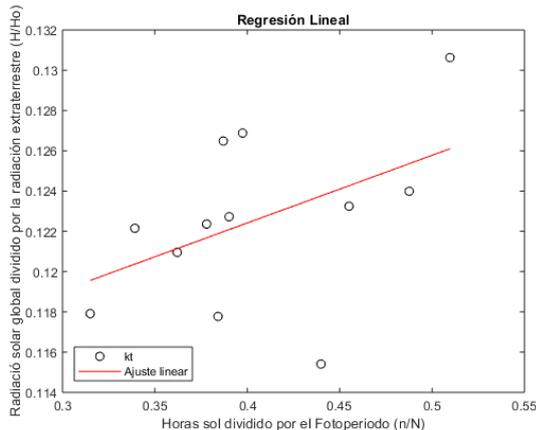


Figura 6: Regresión Lineal[24]

La gráfica presenta el resultado de una regresión lineal aplicada a los datos en el eje X, que corresponden a las horas de sol divididas por el fotoperiodo, mientras que en el eje Y se muestran las cifras de radiación global dividida por la radiación solar extraterrestre. A través de este proceso de regresión lineal, se obtienen los valores de 'a' y 'b', los cuales son claves para el cálculo de la irradiación mediante el método Glover & McCulloch, como se detalla en la tabla 10.

Tabla 6: Valores de irradiación por el método de Glover & McCulloch[24]

Meses	a	b	Glover & McCulloch (KWh/m2)
Enero	0.0336	0.109	4.30441489
Febrero	0.0336	0.109	4.51319667

Marzo	0.0336	0.109	4.51176309
Abril	0.0336	0.109	4.46004918
Mayo	0.0336	0.109	4.3555989
Junio	0.0336	0.109	4.15691534
Julio	0.0336	0.109	4.13492711
Agosto	0.0336	0.109	4.43931525
Septiembre	0.0336	0.109	4.63933282
Octubre	0.0336	0.109	4.55552896
Noviembre	0.0336	0.109	4.48296791
Diciembre	0.0336	0.109	4.41490018

En la Tabla, se presentan los coeficientes de regresión 'a' y 'b' correspondientes a cada mes a lo largo de la vía E435, los cuales se calculan a partir de los valores de irradiación obtenidos mediante el método de Glover & McCulloch. Estos valores se utilizan para elaborar una gráfica de comparación entre los datos provenientes de la base de datos de la NASA y los datos generados por el método propuesto por Glover & McCulloch, tal como se ilustra en la Fig. 14.

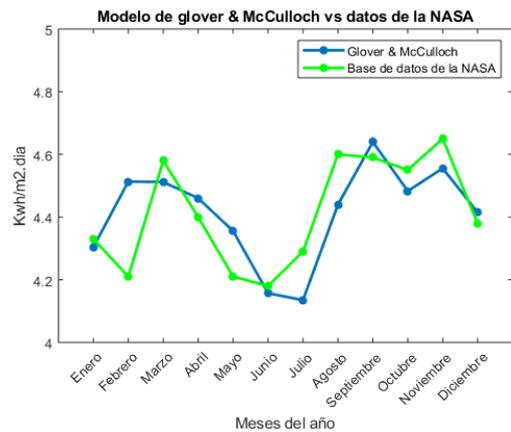


Figura 7: Método de Glover & McCulloch vs Datos de la Nasa[24]

En la Fig. 7 se muestra la irradiación por cada mes la misma que está dada en kWh/m2.dia.

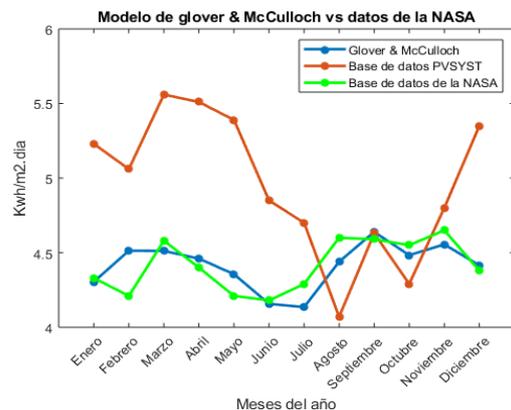


Figura 8: Modelo de G & M vs Datos de la NASA vs datos PVSYST[24]

La Fig. 8 ilustra una comparación entre la irradiación proporcionada por las bases de datos de la NASA, PVSYST y el método de Glover & McCulloch. Se puede observar que la base de datos de PVSYST muestra una



irradiación especialmente favorable para el sector considerado como caso de estudio. Esto se debe a que PVSYST es un programa ampliamente utilizado con fines comerciales y ofrece datos que respaldan la idoneidad de la instalación de un sistema fotovoltaico en esa área, por esta razón los resultados de irradiación no son los mas adecuados.

3.3. Calculo distancia entre luminarias

La correcta disposición de las luminarias en el contexto de los postes de alumbrado público, son elementos fundamentales en el sistema. Estos postes de 500Kgf albergarán componentes esenciales como paneles solares, reguladores de carga, inversores, baterías y las propias luminarias, tal como se ilustra en la Fig. 9.



Figura 9: Poste de alumbrado público [18]

Cada poste tiene una altura de 12 metros y la capacidad de alojar dos paneles de 400 W. Además, cuenta con una unidad de almacenamiento que incluye un inversor, un regulador de carga y baterías. La luminaria se posiciona a una distancia de 1.5 metros desde el poste.



Figura 10: Disposición de luminarias en la vía E487 georreferenciada

Para determinar la separación óptima entre las luminarias, tomamos como caso de estudio la vía E487. En este escenario, aplicamos un factor de mantenimiento

de 0.65, que corresponde a condiciones de luminaria abierta en un entorno con niveles de suciedad considerables debido al alto tráfico vehicular en la vía. A continuación, procedemos al cálculo de los parámetros relacionados con el factor de utilización.

$$K1 = \frac{W1}{H} = \frac{8}{10} = 0.8$$

$$K2 = \frac{W2}{H} = \frac{1}{10} = 0.1$$

$$K = K1 + K2 = 0.8 + 0.1 = 0.9$$

$$d = \frac{K \times fm \times \phi l}{W \times Em} = \frac{0.9 \times 0.65 \times 18200}{9 \times 35}$$

$$d = 33.8 \approx 39 \text{ m}$$

Se obtiene un valor de 39 m la cual es la separación entre postes, a continuación, con el valor obtenido se calcula la iluminación media en el momento en el que se pone en marcha la instalación.

$$Em = \frac{0.9 \times 1 \times 18200}{9 \times 39} = 46.6667 \text{ lx}$$

Para el cálculo del número de postes a lo largo de la vía se realiza lo siguiente.

$$N = \frac{64100 \text{ m}}{39 \text{ m}} + 1 = 1644.58 \approx 1645$$

Se realiza el cálculo para el número de postes que serán instalados en la vía por cada km [18].

$$N = \frac{1000 \text{ m}}{39 \text{ m}} + 1 = 26.64 \approx 27$$

Dentro del software DiaLux, se introducen los parámetros de distancia y el tipo de pavimento con el propósito de verificar si los resultados que se generan son adecuados para el tipo específico de vía en consideración.

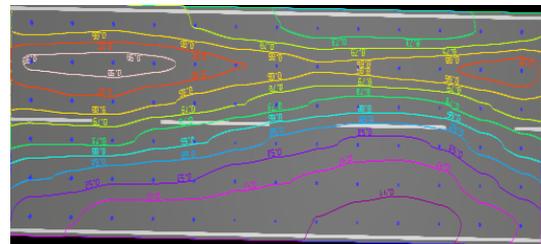


Figura 11: Iluminación de la carretera en el software DiaLux

La Tabla 7 presenta una comparativa entre los parámetros fotométricos de iluminación obtenidos mediante el software DiaLux y los valores nominales correspondientes al tipo de vía, que es M2 en el caso de la vía E487. En esta comparación, garantiza que todos los

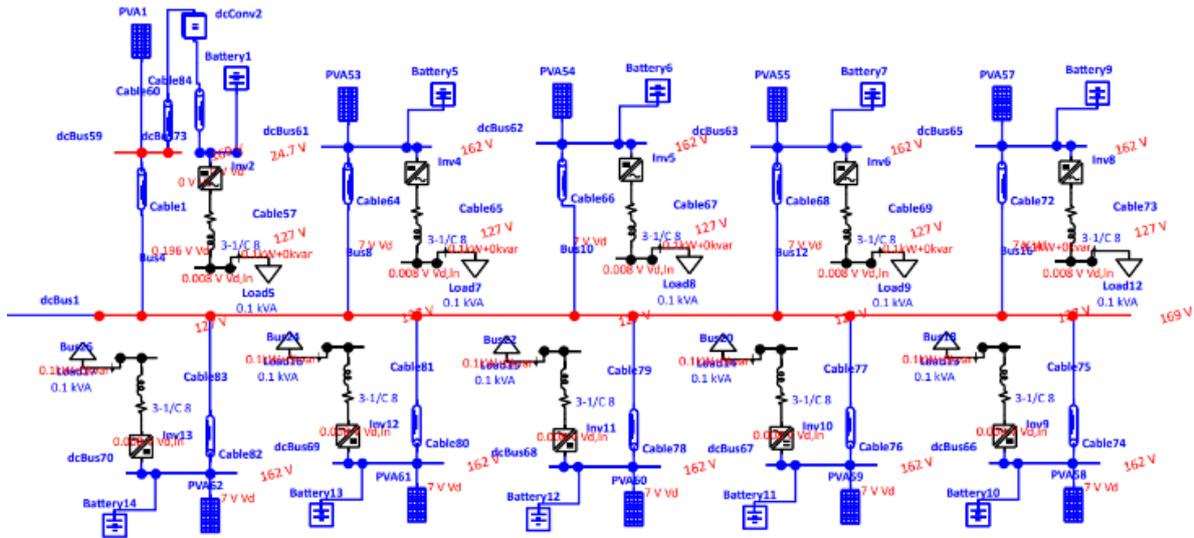


Figura 13: Arreglo por cada 10 postes

valores generados por el software superen los valores nominales, a excepción del Incremento Umbral, que debe ser menor para cumplir con las regulaciones específicas del tipo de vía en cuestión.

Tabla 7: Parámetros fotométricos obtenidos del software DiaLux

Parámetros	DiaLux	Nominal
Lm	1.68 cd/m ²	>1.50 cd/m ²
Uo	0.5	>0.4
Ui	0.76	>0.7
Tl	9%	<10%
R	0.62	>0.35

El panel solar posee especificaciones técnicas detalladas que se presentan en la Tabla 8. Estas especificaciones permiten determinar la cantidad de paneles necesarios en el sistema. Las especificaciones técnicas del panel solar diseñado para las estaciones de carga.

$$E_{postes} = (822 \times 90W \times 12h) + (1 \times 10W \times 24h) = 888 \text{ kWh/día}$$

$$E_{electrolinera} = (3 \times 7.3 \text{ kW} \times 20h) + 7.376 \text{ kWh} = 445.376 \text{ kWh/día}$$

$$E_{cargaTotal} = \frac{888 \text{ kWh}}{\text{día}} + \frac{445.376 \text{ kWh}}{\text{día}} = 1333.376 \text{ kWh/día}$$

Tabla 8: Especificaciones técnicas del panel solar para estaciones de carga[13]

Panel monocristalino de 400 W		
Potencia	405	Wp
V _{max}	176.87	V
V _{nom}	150	V
I _{max}	2.287	A
V _{oc}	216.8	V
I _{sc}	2.520	A
Eficiencia	17.86	%

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de realizar los cálculos necesarios, se efectúa la simulación utilizando el software Etap. En esta etapa inicial, se lleva a cabo la configuración de baterías, reguladores de carga e inversores específicos para cada poste, como se ilustra en la Fig. 13.

La Fig. 12 presenta la disposición diseñada para cada poste, con un enfoque en la iluminación y las comunicaciones. Un convertidor dc/dc se emplea para abordar la necesidad de adaptar el voltaje elevado del panel a los 48V requeridos para el inversor.

Cada panel en la figura representa un poste, y en el interior de cada panel se encuentra una configuración de 2 paneles en paralelo y 1 en serie. Estas configuraciones se conectan a un bus, tal como se ilustra en la Fig. 13.

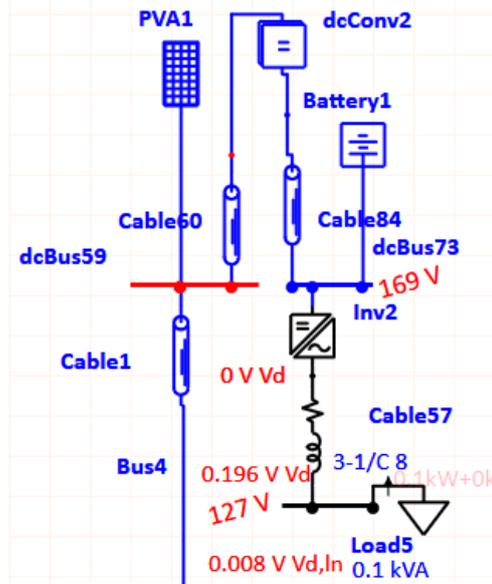


Figura 12: Arreglo por cada poste

La Fig. 12 exhibe un conjunto de 10 postes, cada uno con su propio sistema destinado a las comunicaciones y la iluminación.

Cualquier energía sobrante se redirige hacia las estaciones de carga, y el bus, visible en la misma figura, se encarga de recopilar esta energía excedente. Es importante tener en cuenta que, debido a las distancias involucradas, se producen caídas de voltaje. La Tabla 14 proporciona información detallada sobre la cantidad de energía que contribuye cada poste al bus y muestra las caídas de voltaje en este arreglo de 10 postes.

Tabla 9: Caídas de voltaje del arreglo de 10 postes

Distancia (m)	Voltaje (V)	Caída de voltaje(V)	Voltaje total(V)
39	160.8	1.93	158.90
78	160.8	3.87	156.96
117	160.8	5.80	155.03
156	160.8	7.74	153.09
195	160.8	9.67	151.16
234	160.8	11.61	149.22
273	160.8	13.54	147.29
312	160.8	15.47	145.36
351	160.8	17.41	143.42
390	160.8	19.34	141.49

La Tabla 9 presenta datos sobre las pérdidas de voltaje en los conductores, que varían según las distancias entre los postes. Los valores están expresados en voltios. El voltaje nominal es el voltaje que proviene del panel solar y, a medida que pasa a través de los conductores, experimenta una pérdida de voltaje acumulativa. Notablemente, la pérdida de voltaje en el último poste es de 19.34 V. Por lo tanto, se decide realizar una nueva configuración de conexiones. En lugar de la configuración original, que era en paralelo, se conectan los 10 postes en serie, lo que aumenta el voltaje total. Esta nueva configuración es necesaria debido a las mayores distancias involucradas y permite alcanzar las estaciones de carga.

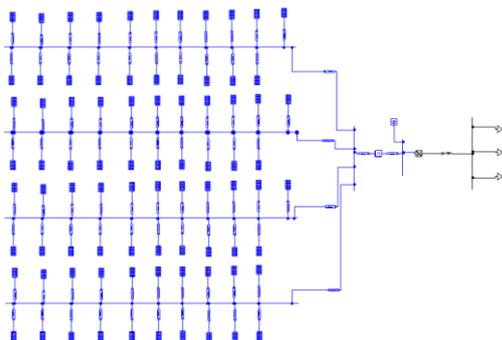


Figura 14: Sistema fotovoltaico multipropósito

La Fig. 14 ilustra el sistema total diseñado para cubrir la mitad de la vía E485, y este sistema se replica para abarcar la totalidad de la vía.

4.1. Resumen Final

El sistema multipropósito que se extiende a lo largo de la carretera para alimentar dos estaciones de carga se desplegará en un área de paneles solar de 13,160 m², equivalente a aproximadamente una hectárea y media de terreno, esto debido a la autonomía de los vehículos eléctricos. A continuación, se proporciona la Tabla 10, que detalla las especificaciones técnicas del sistema de energía solar aislado.

Tabla 10: Características del sistema aislado fotovoltaico [2]

Descripción	Valor	Unidades
Potencia Nominal	666225	W
Potencia instalada	158295.875	W
Área de paneles	13160	m ²
Energía producida diaria	1608822.96	Wh
Energía producida anual	587220380	Wh
Módulos instalados	1645	u



Figura 15: Flujograma del proceso para diseño del sistema multipropósito

Debido a las pérdidas de potencia en los conductores, es necesario aumentar el número de paneles para satisfacer la demanda. Las pérdidas de potencia no permiten alcanzar la potencia necesaria con la cantidad inicial de paneles, por lo que se requiere una mayor



cantidad para cumplir con la demanda de manera efectiva.

Es importante destacar que el sistema se replica en la otra mitad de la vía para abastecer dos estaciones de carga a lo largo de la carretera. Cada conjunto de postes incorpora un convertidor dc/dc debido al alto voltaje de los paneles, lo que hace esencial el uso de convertidores para adecuar el voltaje a las necesidades del sistema.

5. CONCLUSIONES

La implementación de sistemas fotovoltaicos en infraestructuras viales, como estaciones de carga y alumbrado público, es una estrategia eficaz para promover la movilidad sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Estos sistemas aprovechan la energía solar para alimentar tanto la iluminación como la carga de vehículos eléctricos, lo que contribuye significativamente a la reducción de emisiones de carbono y la optimización de la eficiencia energética.

La planificación y el diseño de estos sistemas son fundamentales para garantizar su eficacia. Consideraciones como la ubicación de los postes, la selección de la clase de iluminación y los cálculos técnicos de distancias y pérdidas de energía son esenciales para lograr un funcionamiento óptimo y rentable de las infraestructuras viales que incorporan energía solar.

La implementación de sistemas fotovoltaicos a lo largo de carreteras ofrece una solución eficiente a la inserción a futuro de vehículos eléctricos en el país, evitando cargas en el sistema nacional interconectado y brindando mayor confiabilidad al uso de vehículos eléctricos. Al utilizar estos sistemas, se puede aprovechar el espacio sin necesidad de ocupar terrenos adicionales, lo que representa una ventaja significativa. A pesar de las pérdidas por distancias y las condiciones de irradiación, estos sistemas contribuyen a una mejor utilización de áreas existentes, lo que es fundamental para la generación sostenible de energía.

La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos se beneficia enormemente del uso de concentradores solares fotovoltaicos en comparación con los paneles convencionales. Mientras que los paneles tradicionales tienen una eficiencia típica del 17%, los concentradores solares logran una eficiencia del 170%, es decir, alrededor de diez veces mayor. Esta mejora en la eficiencia representa un avance significativo en la generación de energía solar, lo que contribuye a un rendimiento óptimo y sostenible de los sistemas fotovoltaicos en diversas aplicaciones.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. G. V. Sánchez, Análisis y Estimación de la Demanda Eléctrica con la Implementación de

Vehículos Eléctricos conectados a una Red de Distribución en Cuenca y El Ecuador. 2017.

- [2] A. Catalina and A. Fajardo, "Diseño, simulación y análisis, de sistema solar FV para suministro eléctrico en zonas rurales Design, simulation and analysis of PV solar system for electricity," vol. 11, no. 1, pp. 92–99, 2014.
- [3] D. Adriana and A. Lozano, "Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador," 2017.
- [4] Z. Gao, Y. Tian, J. Chen, and H. Chen, "A GIS-Based Study of Monthly Average Global Solar Radiation," pp. 2–5, 2016.
- [5] A. N. Eddine and I. H. Chehade, "Estimation model for global solar radiation in Lebanon.," pp. 2–6, 2016.
- [6] K. Namrata, S. P. Sharma, and S. B. L. Saksena, "Comparison of Different Models for Estimation of Global Solar Radiation in Jharkhand (India) Region," vol. 2013, no. July, pp. 348–352, 2013.
- [7] J. Osorio, "Design and Implementation of a Solar Tracking Prototype for optimize a PV system.," no. 44, pp. 245–250, 2010.
- [8] C. Cuji and H. D. Sisa, "Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student Evaluation of electricity consumption according to the bioclimatic architecture using the ASHRAE Model and Gauss T-Student," vol. 17, no. 1, 2021.
- [9] R. Espinoza and M. Horn, "Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos aislados," 2018.
- [10] I. Romano, "Estudio de alternativas en el reciclaje de baterías de plomo fuera de uso 1," pp. 1–102, 2015.
- [11] L. Jaime, H. Fonseca, and D. Universidad, "Cells, Batteries And Lithium-Ion Batteries for an Alternative??" pp. 41–48, 2011.
- [12] J. Sebastián and H. Mora, "Desarrollo de un regulador de carga para sistemas fotovoltaicos aplicando instrumentación virtual," pp. 13–18, 2018.
- [13] E. P. Quispe, "Sistemas fotovoltaicos," 2017.
- [14] O. Muñoz, "Optimización de la eficiencia de sistemas fotovoltaicos a través de recolección solar, basada en lentes de Fresnel," vol. 1, no. 9, pp. 66–75, 2009, doi: 10.23881/idupbo.009.1-5i.
- [15] E. Mediavilla and C. Cuji, "Fuzzy Controller for Energy Management in a Transition Process from Thermal Generation Plant to Renewables Controlador Difuso Para Gestión De La Energía En Un Proceso De Transición De Central De



Generación Térmica A Renovables,” no. 18, pp. 61–73, 2022.

- [16] D. P. Cristian Cuji, “Estimación Del Tiempo De Recuperación De Energía Aplicado En Producción De Hidrogeno Con Fines De Generación Eléctrica,” <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/492>.
- [17] A. S. Dresel, “Sistema de concentración solar Fresnel para aplicaciones solares a escala comunitaria,” 2017.
- [18] T. F. Del, R. Por, and T. Por, “Instalación de alumbrado público mediante energía solar fotovoltaica,” 2020.
- [19] M. H. Sheu, L. H. Chang, S. C. Hsia, and C. Sun, “Intelligent System Design for Variable Color Temperature LED Street Light,” pp. 7–8, 2016.
- [20] J. Córdor and A. Águila, “Selección y dimensionamiento óptimo de los sistemas de alumbrado público basado en múltiples criterios”.
- [21] N. A. Bejarano, “Diseño de un sistema de generación eléctrica solar para la iluminación externa del modular de la escuela de ingeniería en ecoturismo,” 2011.
- [22] J. L. Carbo and S. O. Mendoza, “Diseño de construcción y análisis de emplazamiento de electrolinerías en Guayaquil y Samborondón,” 2017.
- [23] L. A. Cuasapaz, “Cálculo del sistema de electrificación solar para cubrir la demanda de iluminación en un barco turístico en el archipiélago de Galápagos,” 2004.
- [24] A. Shukla, A. D. Pai, A. Skific, and S. Paulo, “Angstrom-Prescott modelbased Regression Coefficient Calculation for the Region of,” vol. 9, no. 04, pp. 335–339, 2020.
- [25] P. Panimboza and E. Ormeño, “Modelado y análisis de la planta fotovoltaica de salinas ubicada en la provincia de Imbabura,” 2020.
- [26] G. FLORES and E. GARCÍA, “Factibilidad del sistema de alumbrado público empleando luminarias led y alimentación solar fotovoltaica,” 2016.
- [27] S. Salamanca, “Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá,” vol. 30, no. 30, pp. 263–277, 2017.



Jonathan Gabriel Villarreal Berrones.- (Y'1997 – M'07). Realizo sus estudios en el colegio “Central Técnico” se graduó de bachiller técnico en la especialidad de Electricidad. Egresado de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana,

su trabajo se basa en la propuesta de un despliegue óptimo de un sistema aislado de alta eficiencia y su evaluación en aplicaciones multipropósito para carga de vehículos eléctricos e iluminación en zonas rurales.



Cristian Cristobal Cuji Cuji.- (Y'1983 – M'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Máster en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España 2015. Actualmente es profesor e

investigador en la Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador.